



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**Facultad de Ingeniería**

**Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado**

USO DEL ÓXIDO DE CALCIO EN SUELOS PLÁSTICOS  
EXPANSIVOS DE SAN FRANCISCO TOTIMEHUACAN Y SU  
APLICACIÓN EN CARRETERAS DEL ESTADO DE PUEBLA

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
**Con opción terminal en Tránsito y Transporte**

Presenta:

**ING. ALEJANDRO HERNÁNDEZ RAMOS**

Asesor de tesis:

**M. I. ALEJANDRO CARRILLO VIZCAYA**

Puebla, Pue.

JUNIO 2022

---

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A Dios:**

Porque siempre ha sido el centro en mi vida y me ha acompañado desde que le abrí mi corazón; sé que escucha mis oraciones y peticiones. Gracias simplemente por la salud que me das y que nunca dejare de pedirte. No me soltaré de tu mano.

### **A mi pequeña familia:**

Elsa (mi esposa); que sabe bien lo que este trabajo significa para mí “te amo”. Alejandro y Emiliano (mis pequeños) esperando que en un futuro puedan entender lo que se plasma en este trabajo y sea un aliciente para ellos. A esta mi familia que les he privado de tiempo que nunca será recuperado, pero ahora les puedo decir “Lo logramos”.

### **Mis Asesores:**

M.I. Alejandro Carrillo Vizcaya; por haber dicho sí a dirigir este proyecto, su interés y aportaciones no solo académicas sino también personales.

M.I. José Luis Stefanoni Minutti; que como coasesor también jugó un papel importante y en nuestras aulas virtuales durante pandemia la enseñanza fue grande.

### **Mis compañeros:**

Ing. Elvira e Ing. Gerardo; aunque muy pequeña nuestra generación grande fue el equipo y la amistad que formamos desde inicio y hasta el final. Mucho éxito en sus vidas.

### **La empresa CALIDRA:**

Mtro. José Luis Silva González; porque el viaje que realizó desde su bello estado Monterrey valió la pena. Por sus aportaciones, experiencias y recomendaciones que me ofreció de manera desinteresada en la parte experimental. Espero podamos estrecharnos la mano nuevamente.

Mtro. Francisco Javier Castañeda Garay; que, sin conocernos, me ofreció el apoyo de manera inmediata mostrando ser una persona humilde, profesional y apasionado a la investigación.

### **A la Facultad de Ingeniería de la BUAP:**

Mi segunda casa que desde hace más de 20 años que me recibió como estudiante de la licenciatura, como trabajador y en esta ocasión como becario de la maestría en Tránsito y Transporte.

**“Gracias a todos ustedes”**

---

## ÍNDICE

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	v
OBJETIVO GENERAL: .....	vii
JUSTIFICACIÓN .....	vii
HIPÓTESIS.....	vii
METODOLOGÍA.....	viii
1 LOS SUELOS EXPANSIVOS.....	1
1.1 NATURALEZA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.....	1
1.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.....	3
1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS EXPANSIVOS .....	4
1.3.1 CONTENIDO DE AGUA.....	5
1.3.2 PESOS ESPECÍFICOS SECO.....	5
1.3.3 LÍMITES DE ATEMBERG .....	5
1.3.4 LÍMITES DE CONTRACCIÓN Y CONTRACCIÓN LINEAL .....	6
2 CONCEPTOS DE LA CAL.....	7
2.1 MECANISMO DE ESTABILIZACIÓN DE LA CAL.....	8
2.2 LA CAL COMO AGENTE ESTABILIZADOR .....	8
2.3 CICLO DE LA CAL.....	12
2.4 SOLUBILIDAD.....	13
2.5 DEMANDA MINIMA DE CAL MEDIANTE EL MÉTODO GRÁFICO .....	13
2.6 DEMANDA MÍNIMA DE CAL MEDIANTE EL MÉTODO ASTM.....	15
3 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	17
3.1 MUESTREO .....	17
3.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	19
3.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ÓXIDO DE CALCIO .....	19
3.4 DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA Y DE COMPACTACIÓN DEL SUELO EN ESTADO NATURAL .....	21
3.5 COMPACTACIÓN DEL SUELO MEDIANTE PRUEBA AASHTO ESTANDAR.....	23
3.6 DETERMINACIÓN DEL CBR Y EXPANSIÓN.....	24
3.7 RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE.....	27
4 ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	34
4.1 PROPIEDADES ÍNDICE .....	34
4.2 DEMANDA MÍNIMA DE ÓXIDO DE CALCIO.....	36
4.3 VALOR SOPORTE CALIFORNIA (CBR) .....	36
4.4 CURVAS DE COMPACTACIÓN AASHTO.....	37

---

4.5	ENSAYES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE .....	39
5	CONCLUSIONES .....	45
6	BIBLIOGRAFÍA .....	49

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura de la Montmorilonita (Grim, 1959).....	2
Figura 1.2 Distribución de suelos expansivos (Modificado de G.W. Donaldson, 1969).....	3
Figura 1.3. Arcillas expansivas en regiones de México.....	4
Figura 2.1 Horno de calcinación, Puebla, México.....	10
Figura 2.2 Hoja de seguridad, ficha técnica del producto.....	11
Figura 2.3 Ciclo de la cal.....	12
Figura 2.4 Solubilidad de la cal.....	13
Figura 2.5 Método gráfico para determinar el óptimo de cal (McDowell, 1966) .....	14
Figura 2.6 Determinación del pH.....	15
Figura 3.1 Ubicación del predio donde se realizó el muestreo.....	17
Figura 3.2 Carta de plasticidad de suelos expansivos de varias ciudades de la República Mexicana.....	18
Figura 3.3 Contenido óptimo de óxido de calcio.....	20
Figura 3.4 Determinación del contenido óptimo de óxido de calcio (a) y (b); calibración de equipo para pH 7 (c) y pH 10 (d).....	20
Figura 3.5 Determinación de los límites de consistencia; equipo (a), en estado natural (b) y adición de óxido de calcio (c).....	21
Figura 3.6 Curva de fluidez para determinación del límite líquido (a), ubicación en carta de plasticidad del SUCS (b).....	22
Figura 3.7 Composición de la curva granulométrica.....	22
Figura 3.8 Curvas AASHTO Estándar para determinación de la masa seca máxima y humedad óptima.....	23
Figura 3.9 Determinación del CBR; compactación (a), saturación (b) y penetración (c)....	25
Figura 3.10 Gráfica penetración vs carga; estado natural (a) y con óxido de calcio (b).....	26
Figura 3.11 Determinación del CBR; estado natural (a) y con óxido de calcio (b).....	26
Figura 3.12 Preparación de material para ensaye a compresión simple (a) y proceso de curado o maduración de 24 hr antes de compactar.....	27
Figura 3.13 Pisón de compactación (a), compactación de material (b) y molde de compactación con lámina de acetato (c).....	28

---

Figura 3.14 Muestra compactada (a) y enrase de material (b).....	28
Figura 3.15 Especímenes compactados (a), especímenes colocados dentro del horno (b) y determinación de la temperatura dentro del horno (c).....	29
Figura 3.16 Gráficos de ensayos a compresión simple a 7 días de maduración.....	32
Figura 3.17 Gráficos de ensayos a compresión simple a 14 días de maduración.....	33
Figura 4.1 Comparativa de la curva granulométrica.....	35
Figura 4.2 Curvas AASHTO Estándar.....	38
Figura 4.3 Determinación del número de golpes por capa.....	40
Figura 4.4 Graficas esfuerzo deformación a 7 días de ensaye.....	43
Figura 4.5 Graficas esfuerzo deformación a 14 días de ensaye.....	44
Figura 5.1 Retención de agua de los minerales (Tesier, 1990).....	45
Figura 5.2 Intercambio catiónico de los suelos.....	46

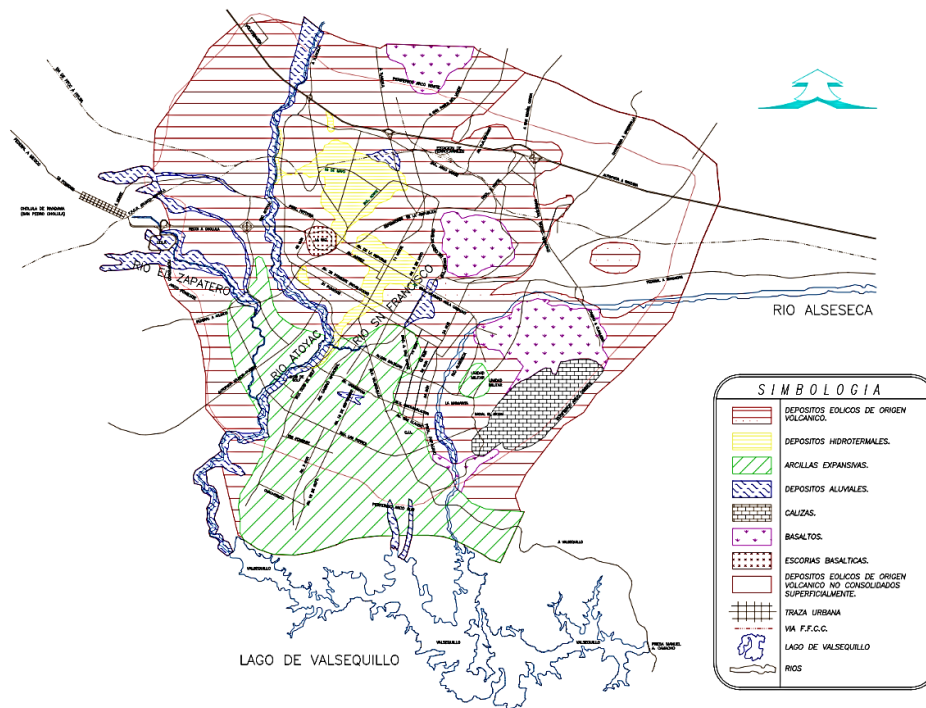
---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Relación entre potencial de expansión versus índice de plasticidad (Chen, 1975).....	6
Tabla 1.2 Determinación del grado de expansión (Altmeyer, 1955) .....	6
Tabla 2.1 Clasificación de la cal por su contenido de carbonato de magnesio.....	9
Tabla 3.1 Determinación del contenido óptimo de cal.....	19
Tabla 3.2 Determinación de los límites de consistencia en estado natural.....	21
Tabla 3.3 Determinación de los límites de consistencia estabilizado con 4% de óxido de calcio.....	21
Tabla 3.4 Determinación de la masa seca máxima y humedad óptima.....	23
Tabla 3.5 Pisones y número de capas para las pruebas AASHTO.....	24
Tabla 3.6 Características de las variantes de las pruebas de compactación.....	24
Tabla 3.7 Energía de compactación y número de golpes para compactar los especímenes.....	25
Tabla 3.8 Resultados obtenidos de CBR de manera gráfica.....	26
Tabla 3.9 Resultados obtenidos del porcentaje de expansión.....	27
Tabla 3.10 Resultados obtenidos en especímenes ensayados a 7 días de maduración...	30
Tabla 3.11 Resultados obtenidos en especímenes ensayados a 14 días de maduración..	31
Tabla 4.1 Relación entre potencial de expansión versus índice de plasticidad (Chen, 1975) ...	34
Tabla 4.2 Comparativa de los límites de consistencia.....	35
Tabla 4.3 Resultados del contenido óptimo de cal.....	36
Tabla 4.4 Resultados obtenidos del porcentaje de expansión.....	37
Tabla 4.5 Comparativa de la masa seca máxima y humedad óptima.....	38
Tabla 4.6 Condiciones de especímenes para ensayos a compresión.....	40
Tabla 4.7 Resumen resistencias a compresión.....	41
Tabla 4.8 Resumen % de compactación.....	42

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Puebla cuenta con una zonificación geotécnica (Figura. 1). Azomoza en 1998, caracterizó los suelos a partir de 400 estudios según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) dividiendo la zona urbana en 8 unidades como: depósitos eólicos de origen volcánico, depósitos aluvio-palustre-lacustre, depósitos hidrotermales, arcillas expansivas, depósitos aluviales, calizas, basaltos y escorias basálticas. En una extensión del sur y poniente de la ciudad de Puebla, se ubica el depósito de arcilla expansiva, este presenta una tonalidad gris oscura y su contenido natural de humedad varia del 15% al 50% con límite líquido superior al 60%, clasificando este material como de mediana expansividad. Sin embargo, esta zonificación geotécnica, no contempla la zona que se pretende estudiar.



**Figura 1. Zonificación geotécnica de la ciudad de Puebla.**

Dado la conurbación en la ciudad de Puebla y el desarrollo urbano horizontal que se presenta en los últimos años, la intensidad del flujo vehicular ha cambiado y seguirá intensificándose en los siguientes años., lo anterior implica mayor carga, fatiga de los materiales y deformación en las estructuras viales que fueron diseñadas en otro contexto de carga vehicular. Por otra parte, el poco control en el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de

---

jurisdicción federal, tanto por parte de las autoridades como de los conductores de los vehículos, el crecimiento vehicular, el aumento en el peso de los vehículos y materiales que no cumplen con la normatividad vigente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), han provocado la falla de algunos pavimentos. Esta problemática se intensifica cuando se utilizan materiales arcillosos plásticos en las terracerías con propiedades de expansión. Una forma de estabilizar estos suelos es a través del uso de agentes químicos.

De los agentes químicos de estabilización de suelos arcillosos (Zepeda, 2004), por mencionar algunos tenemos: uso de cemento Portland, uso de cloruro de sodio, uso de productos asfálticos, tratamiento con resinas y polímeros y el uso de óxido de calcio, que será tema de esta investigación.

Estudios realizados por el Instituto Mexicano del Transporte y de Grupo Calidra (Pérez, 2019), analizó el uso del óxido de calcio como estabilizador., donde se determinaron las propiedades físicas y mecánicas en dos tipos de suelos (limo de alta compresibilidad y arena bien graduada). Obtuvieron parámetros favorables en la mejora de la resistencia del suelo al incorporarle del 4% al 5% de óxido de calcio. Se logró incrementar el Valor Relativo de Soporte (CBR) del 25% en estado natural al 350% con el agente estabilizador. Incrementó la resistencia a compresión simple sin confinar durante el proceso de curado ya que se observó un aumento del 80% a los periodos de reposo de 7, 14 y 28 días.

Flores (2012), identificó que los suelos de San Francisco Totimehuacan son expansivos, ya que están compuestos por minerales de tipo Montmorillonita.

Zepeda (2004), caracterizó los suelos expansivos de varias ciudades del país ubicándolos dentro de la carta de plasticidad del SUCS por arriba de la línea "A".; Flores (2012), determinó que el material arcilloso de San Francisco Totimehuacan también se encuentra por arriba de esta línea. Estos suelos, al ser sometidos a la prueba de índice de plasticidad se obtuvieron parámetros de 45% a 43%, por lo que se clasifican como un suelo con potencial de expansión "alto" según Zepeda 2014.

En este trabajo de investigación, se pretende analizar, el comportamiento de materiales plásticos de San Francisco Totimehuacan al ser sometido a un proceso de estabilización química con el uso del óxido de calcio., Se evaluará el comportamiento mecánico del suelo con esta forma de estabilización a través de la medición de: resistencia al esfuerzo cortante y parámetros de deformabilidad de acuerdo con la normatividad de la SCT para su uso en la construcción de terracerías.

---

La pregunta que guía este trabajo es: ¿Se mejora el comportamiento mecánico de los suelos expansivos de San Francisco Totimehuacan al estabilizarlos con óxido de calcio?, si la respuesta es positiva ¿en qué magnitud? ¿en qué condiciones de estabilización? y ¿será aplicable a la construcción de carreteras en el estado?

### **OBJETIVO GENERAL:**

Analizar el comportamiento mecánico de los suelos expansivos de San Francisco Totimehuacan estabilizados químicamente con el óxido de calcio. Con el propósito de mejorar: el CBR y su resistencia al esfuerzo cortante.

### **JUSTIFICACIÓN**

El presente trabajo de tesis servirá para establecer los porcentajes óptimos de mejoramiento de los materiales expansivos con uso de óxido de calcio. Se pretende usarlo en las capas de las terracerías de los pavimentos, de tal forma que aporte un incremento en el CBR mayor al 20% y expansiones inferiores al 2%. Con estos parámetros garantizamos el cumplimiento de requisitos de calidad para capas subrasante tratadas con óxido de calcio indicadas en la normativa de la SCT en el apartado de características de los materiales (N-CMT-01-04, 2019).

El uso de otras técnicas comunes de estabilización de suelos plásticos (como el cemento, sustitución por materiales de bancos) encarece el costo en la construcción de los pavimentos del orden del 30% comparado al 5% del óxido de calcio (citado en conferencia “Experiencias en la construcción y reconstrucción de caminos con óxido de calcio 2021”). Con la estabilización con óxido de calcio en estos materiales expansivos, originará menores costos en la construcción y conservación de las carreteras al tener estructuras de apoyo que aporten más resistencia a las cargas inducidas por los vehículos. Además, se tendrán otras ventajas asociadas a tener buenas condiciones de circulación como son: ahorro de tiempo en los traslados de personas y mercancías, disminuir consumos de combustibles, bajos costos de operación de los vehículos, disminución de congestionamientos viales, etc.

### **HIPÓTESIS**

A través de la estabilización química con óxido de calcio en los materiales plásticos expansivos se mejora el comportamiento mecánico al aumentar: el CBR y su resistencia al esfuerzo cortante. Con ello se reducen los problemas al volverlo más estable en términos de plasticidad, expansión y deformación.

---

## METODOLOGÍA

En esta investigación, se realizaron las actividades siguientes:

- a) Obtención de muestras alteradas de material expansivo en la zona de San Francisco Totimehuacan.
- b) Identificación, etiquetado y traslado al laboratorio para sus ensayos correspondientes.
- c) Obtención de curvas de compactación tipo ASTHOO estándar para determinación del peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima del material en estado natural.
- d) Determinación del porcentaje de cal óptimo para la cual se buscó que la mezcla correcta fuera aquella que lograra un pH mayor a 12.40.
- e) Elaboración de especímenes remodelados de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para conocer su resistencia al esfuerzo cortante sin confinar a edades de curado o maduración que variaron de 7 y 14 días.
- f) Para conocer los parámetros de deformabilidad y expansión, se realizaron especímenes compactados con óxido de calcio confinados en moldes para prueba de CBR y se obtuvieron gráficas de deformaciones versus carga.

Para caracterizar el suelo expansivo de San Francisco Totimehuacan, se ejecutaron también pruebas de rutina como:

<b>Norma</b>	<b>Nombre</b>
M-MMP-1-06/03	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.
M-MMP-1-07/07	Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.
M-MMP-1-08/03	Determinación de la gravedad específica del suelo.
M-MMP-1-09/06	Determinación de las características de compactación de un suelo. Prueba AASHTO estándar.
M-MMP-1-11/16	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.

---

De los resultados obtenidos, se comparó con la normativa indicada por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes vigentes en el apartado de Característica de los Materiales en la parte uno de Materiales para Terracerías del Título cuatro Materiales tratados con Cal para Terracerías (N-CMT-1-04-19).

---

## 1 LOS SUELOS EXPANSIVOS

### 1.1 NATURALEZA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

Se entiende por suelo expansivo como aquel que es susceptible de sufrir cambios volumétricos por variaciones de humedad. Puede decirse que los suelos expansivos son un fenómeno que se origina por la presencia de un suelo arcilloso con mineral montmorilonita y un clima semiárido, donde la evapotranspiración potencial media anual es mayor que la precipitación media anual.

Los asentamientos que sufren las estructuras debido a las deformaciones que provocan los aumentos de carga sobre el suelo que los soporta, fueron identificados, generalmente, como los causantes de los daños en las estructuras, sin embargo, el United States Bureau of Reclamation fue el primero en reconocer, en 1938, el problema de la expansión de los suelos, cuando intervino en el proyecto Owyhee en Oregón en la cimentación para un sifón de acero (Zepeda, 2004).

Donalson clasificó en dos grupos los materiales que pueden dar origen a los suelos expansivos. El primer grupo comprende las rocas ígneas básicas, como los basaltos y los gabros. En los suelos expansivos los minerales como el feldespato y el piroxeno de las rocas madre, se descomponen para formar la montmorilonita y otros minerales secundarios. En segundo grupo comprende la roca sedimentaria que contiene montmorilonita como constituyente, el cual se desintegra mecánicamente para formar suelos expansivos.

La mayoría de los sistemas de clasificación definen arbitrariamente a las partículas de arcilla como aquellas que poseen un diámetro efectivo de 2 micras (0.002 mm) o menos. El tamaño de la partícula no determina el mineral de arcilla por sí solo; probablemente, la propiedad más importante de los suelos finos es su composición mineralógica. En las partículas pequeñas (de tamaño menor a 2 micras), las fuerzas eléctricas que actúan en su superficie tienen marcada influencia y gobiernan su comportamiento, a diferencia de los suelos de grano grueso, donde la gravedad es el factor determinante.

Los tres grupos más importantes de minerales arcillosos son: montmorilonita, illita y caolinita, estos materiales están formados por silicatos de aluminio hidratados. Los suelos que presentan mayores problemas de expansividad son aquellos en los que los minerales de montmorilonita están presentes.

Las montmorilonitas están formadas por una lámina alumínica entre dos sílicas cuyos enlaces son débiles, pudiéndose así presentarse la penetración de las moléculas del agua en su estructura reticular, debido sobre todo a la naturaleza dipolar de dichas moléculas. En estas condiciones los cristales de arcilla se hinchan (Juárez y Rico, 1976).

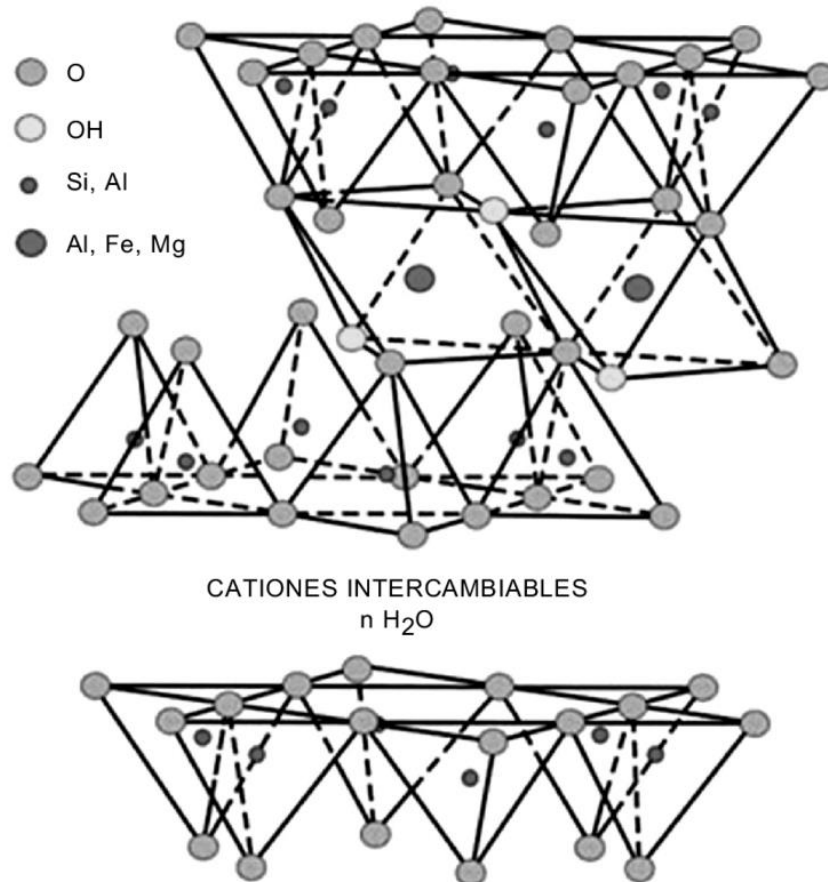


Figura 1.1 Estructura de la Montmorilonita (Grim, 1959)

## 1.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

Existen muchos países en el mundo que tienen el problema de los suelos expansivos, por ejemplo: México, Canadá, Estados Unidos, Venezuela, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Perú, Argentina, Brasil, Cuba, Angola, Mozambique, Kenia, Argelia, Marruecos, Gana, Israel, Turquía, Irán, Irak, India y Australia, entre otros (Fig. 1.2).



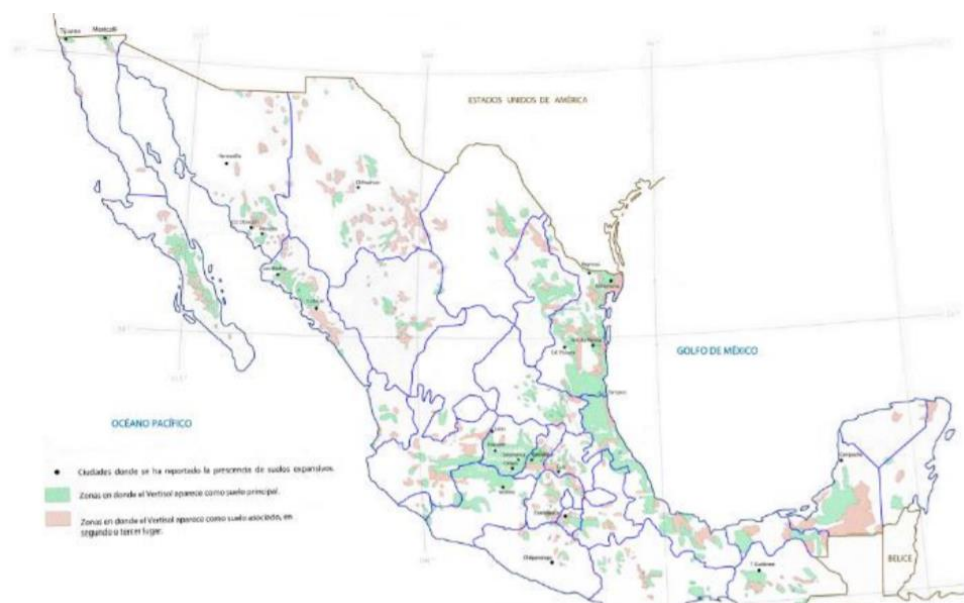
**Figura 1.2 Distribución de suelos expansivos (Modificado de G.W. Donaldson, 1969)**

En México, varias regiones en los estados de Querétaro, Guanajuato y Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Sonora, Baja California Norte, Veracruz, Chiapas y Campeche presenta formaciones de este tipo de suelo (Figura 1.3).

Flores (2012) comprobó que, en la ciudad de Puebla, en la localidad de San Francisco Totimehuacán, existe la presencia de suelo expansivo. Por otro lado, Romero (2004) también encontró suelos expansivos en colonia El Mirador de la ciudad de Puebla. Por otro lado, trabajos de campo realizados por la Facultad de Ingeniería de la BUAP (FI-BUAP) en 2004 encontró que en el fraccionamiento habitacional denominado Barrios de Santa Catarina, se hallaba un material expansivo de color negro clasificado como arcilla de alta plasticidad (CH) además de encontrar muros y banquetas con agrietamientos y vialidades con deformaciones del orden de 20 mm. En otra zona de estudio realizado por la FI-BUAP en el Fraccionamiento Lomas del Valle, al realizar trabajos de exploración por medio de pozos a cielo abierto (PCA)

se pudo observar que también existe un material expansivo clasificado como CH con una tonalidad oscura.

Los suelos expansivos se presentan en regiones con depósitos de arcilla donde ocurren variaciones significativas de humedad; en zona como las monzónicas, con estaciones muy diferentes, y en las zonas semidesérticas en las cuales se alternan extensas temporadas de sequía con pequeños periodos de precipitación. En especial, los suelos expansivos se encuentran en las zonas semiáridas de las regiones con clima templado y tropical. En estos lugares la evapotranspiración anual es mayor que la precipitación anual.



**Figura 1.3. Arcillas expansivas en regiones de México**

### 1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

Es bien sabido por los ingenieros de suelos que las arcillas montmorilonitas se expanden cuando su contenido de agua aumenta mientras que las caolinitas suelen ser relativamente estables en presencia de agua, debido a que la unión entre todas las reticulares es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de las moléculas de agua entre ellas. Las ilitas suele presentar una expansividad menor que las montmorilonitas.

### 1.3.1 CONTENIDO DE AGUA

Independientemente de que el potencial de expansión de un suelo sea alto, si la humedad de la arcilla permanece constante, no habrá cambio de volumen y, por tanto, una estructura cimentada sobre una arcilla con humedad constante no estará sujeta a movimientos causados por la expansión. Cuando el contenido de agua aumenta en la arcilla, entonces pueden ocurrir expansiones tanto en la dirección vertical como en la horizontal. No es necesaria la saturación por completo para que se presente la expansión, cambios leves humedad del 1% a 2%, puede ser suficientes para provocar expansiones inconvenientes.

### 1.3.2 PESOS ESPECÍFICOS SECO

El peso específico seco de la arcilla es otro índice de expansión. Los suelos con pesos específicos secos mayores de  $17.6 \text{ kN/m}^3$  ( $1.76 \text{ ton/m}^3$ ) generalmente exhiben altos potencial de expansión.

El peso específico de las arcillas también se refleja en los resultados de las pruebas de penetraciones estándar. Las arcillas con N (resistencia a la penetración estándar) mayor de 15 generalmente poseen potencial de expansión. En las arcillas de alta expansividad como las de Denver Colorado se tiene valores de N en ocasiones hasta de 30.

### 1.3.3 LÍMITES DE ATEMBERG

Holtz y Gibas (1956) demostraron que el índice de plasticidad y el límite líquido son índices de utilidad para determinar las características de expansión de la mayoría de las arcillas.

El potencial de expansión se define como el porcentaje de aumento de volumen en una muestra confinada lateralmente, la cual se satura bajo una sobrecarga de  $6.9 \text{ kN/m}^2$  ( $0.07 \text{ kg/cm}^2$ ) después de ser compactada a su peso específico máximo en la humedad óptima, de acuerdo a la prueba AASHO estándar. De lo anterior Seed, Woodward y Lundgren (1962) establecen la siguiente relación simplificada:

$$S = 60 K (Ip)^{2.44}$$

en la cual:

S = Potencial de expansión

K =  $3.6 \times 10^{-5}$  y es una constante

Ip = Índice de plasticidad

Esta ecuación sólo se aplica para suelos con porcentajes de arcilla comprendidos entre 8 y 65% y el acercamiento de esta forma de cálculo es de aproximadamente un 33% de diferencia respecto a la determinación en laboratorio del potencial de expansión.

Puesto que el límite líquido y la expansión de las arcillas dependen ambas de la cantidad de agua que la arcilla trata de absorber, no es sorpresa que estén relacionados.

La relación entre el potencial de expansión de las arcillas y el índice de plasticidad puede establecerse como a continuación se indica:

**Tabla 1.1 Relación entre potencial de expansión versus índice de plasticidad (Chen, 1975)**

Potencial de expansión	Índice de plasticidad
Bajo	0 - 15
Medio	10 - 35
Alto	20 - 55
Muy alto	35 ó mas

#### 1.3.4 LÍMITES DE CONTRACCIÓN Y CONTRACCIÓN LINEAL

Se supone que el potencial de expansión está relacionado con la propiedad opuesta de medición de la contracción lineal. Teóricamente parece ser que las características de contracción de las arcillas deben ser índices consistentes y confiables del potencial de expansión.

Altmeyer 1955 (citado en Zepeda 2004) sugirió a manera de guía para la determinación del potencial de expansión, varios valores de límite de contracción lineal, como se muestra a continuación:

**Tabla 1.2 Determinación del grado de expansión (Altmeyer, 1955)**

Límite de contracción %	Contracción lineal %	Grado de expansión
< 10	>8	Crítico
10 - 12	5 - 8	Marginal
> 12	0 - 5	No crítico

La investigación ha sido insuficiente y falta evidencia concluyente con respecto a la correlación entre el potencial de expansión y el límite de contracción.

---

## 2 CONCEPTOS DE LA CAL

Los ingenieros, arquitectos, contratistas han tratado de muchas formas reducir los efectos dañinos provocados por los suelos expansivos. Sus acciones se basan en acercamientos de prueba y error. Han utilizado estabilización mecánica como extensión práctica sin embargo han encontrado también necesario alternar las propiedades físico-químicas de los suelos arcillosos para estabilizarlas permanentemente (Petry, et al, 2002).

Paul Garnica (2002) propone varios medios para mejorar la condición de un suelo que ha de ser utilizado en el mejoramiento de los pavimentos y reducir la fatiga debido a la carga repetitiva de los vehículos. Para un mejor análisis, estos los dividen en tres grupos:

- a) Procedimientos mecánicos (compactación):
  - Amasado (rodillos pata de cabra).
  - Impactos de carga (pisonos).
  - Presión estática (rodillos lisos y neumáticos).
  - Vibración (rodillos vibratorios).
  - Métodos mixtos (combinación de los métodos anteriores).
- b) Procedimientos químicos (estabilizaciones):
  - Cal y Cemento Portland.
  - Ceniza Volante (Fly Ash).
  - Asfaltos y Otros.
- c) Procedimientos físicos:
  - Mezcla (suelo con suelo).
  - Confinamiento (suelos friccionantes).
  - Consolidación previa (suelos finos arcillosos).
  - Vibroflotación.

En el caso de este trabajo de investigación, se emplearon procedimientos químicos de estabilización mediante el uso del óxido de calcio, que son más frecuente empleados en las capas de bases y subrasantes de las estructuras de los pavimentos y/o carreteras.

## 2.1 MECANISMO DE ESTABILIZACIÓN DE LA CAL

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

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

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

## 2.2 LA CAL COMO AGENTE ESTABILIZADOR

El empleo de materiales de calidad que cumplan con especificaciones en la construcción de caminos y carreteras será importante para evitar problemas futuros en las capas inferiores, sin embargo, en ocasiones encontramos materiales que por sus propiedades de plasticidad ofrecen bajas resistencias y altas deformaciones. En estos casos, algunos constructores de estas estructuras recurren al uso de los materiales de la región utilizando técnicas de estabilización, las cuales pueden aportar mayor rigidez de los materiales, mayor vida útil, disminución de los porcentajes de expansión o reducción en el diseño de los espesores de las capas subsecuentes etc.

De acuerdo con la norma N.CMT.4.03.001/17 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la cal es el producto de calcinación de rocas calizas; constituidas principalmente por óxido de calcio (CaO) y otros componentes. Según su composición química, se clasifican en:

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

**Cal hidratada:** La cal hidratada es un polvo seco, obtenida al tratar cal viva con la suficiente agua para satisfacer su afinidad química, provocando su hidratación. Consiste esencialmente en hidróxido de calcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  o una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio (MgO) e hidróxido de magnesio  $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ .

Asimismo, como se muestra en la tabla 2.1, la cal puede clasificarse por su porcentaje de calcio magnesio o dolomítica, dependiendo del contenido de carbonato de magnesio en la roca caliza de la cual se formó.

**Tabla 2.1 Clasificación de la cal por su contenido de carbonato de magnesio.**

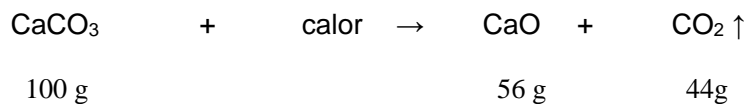
Tipo de cal	Porcentaje de $\text{MgCO}_3$
Alto calcio	0 a 5
Magnesiána	5 a 35
Dolomítica	35 a 46

La roca caliza es un mineral constituido principalmente por carbonatos de calcio, que se expresa químicamente como  $\text{CaCO}_3$ ; puede clasificarse de acuerdo con su origen, formación geológica, estructura y composición. Existen depósitos de roca caliza en todo el planeta, dado que el calcio es el quinto elemento más abundante en la corteza terrestre; por ello, desde tiempos muy antiguos el hombre aprendió a usarla y transformarla para su beneficio.

Hoy en día en el territorio mexicano afloran considerables yacimientos de calizas. De los 27 estados productores de este material, los principales son Nuevo León, Quintana Roo, Puebla, Estado de México, San Luis Potosí, y Veracruz (Castañeda, 2022).

La cal viva se obtiene de la disociación térmica de la caliza. Esta descomposición térmica es conocida por los productores de cal con el término de *calcinación* y requiere de una presión de disociación de 1 atm, que se alcanza con una temperatura de alrededor de los 900 °C en hornos

de calcinación como los representados en la figura 2.1, notoriamente distintos a sus homólogos artesanales que consistían en excavaciones de pozos circulares en la tierra reforzados con lajas de piedra, cuyo principal combustible era la leña. La reacción de disociación para el carbonato de calcio es la siguiente:





**Figura 2.1 Horno de calcinación, Puebla, México.**


La densidad aparente (peso volumétrico de material a granel) de la cal viva de alta pureza está comprendida entre los 880 y 960 kilos por metro cúbico. Este dato es importante para evaluar de manera rápida el material que se recibe en la obra ya que, si se tiene una góndola de 30 m<sup>3</sup> que contiene un peso mucho mayor a las 30 t, considerando que pudiera llevar más de 30 m<sup>3</sup> de volumen excedente, se puede suponer que contiene mucho material crudo (carbonatos) que no reaccionará con el suelo.

Para su manejo se recomienda el uso de equipo de protección personal como mascarilla de polvos, guantes de carnaza, camisa de manga larga y lentes.

Los envases deberán colocarse sobre tarimas y protegerse con lonas para evitar que la lluvia humedezca el material. Tanto los super sacos como las góndolas que lo transporten a granel tendrán que ser debidamente cubiertos con lonas. En la obra es necesario contar con la hoja de seguridad (Figura 2.2) y seguir las indicaciones.





ESPECIFICACION DE PRODUCTO			
W.p-01-FI Rev. 2			
			
I. INFORMACION DEL PRODUCTO			
<b>Nombre Comercial</b>	ESTABILICAL		
<b>Nombre Químico</b>	Óxido de Calcio		
<b>Formula</b>	CaO		
<b>Descripción del producto</b>	Estabilical OX es un producto utilizado en la estabilización de suelos, permitiendo la compactación permanente de arcillas y tierras de alto grado de expansión formando una mezcla cementante natural, lo que permite obtener un incremento en su resistencia y capacidad de soporte, así como la disminución de sensibilidad al agua y a los cambios de volumen constantes.		
II. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DEL PRODUCTO			
PROPIEDADES QUÍMICAS TÍPICAS	Referencia	Especificaciones	
Oxido de Calcio (Total)	CaO	ASTM C-25	94.0 % min.
Oxido de Calcio (disponible)	CaO	ASTM C-25	90.0 % min.
Oxido de Magnesio*	MgO	XRF	0.5 % máx.
Silíce*	SiO <sub>2</sub>	XRF	0.5 % máx.
Oxido de Hierro y Aluminio*	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	XRF	0.2 % máx.
PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS			
Granulometría (% que pasa)	1/4" – 0"	ASTM C-110	95.0 % min.
*XRF: Fluorescencia de Rayos X, reportado si el cliente lo solicita.			
III. PRESENTACION			
Presentación	Granel y Super Saco.		
IV. RECOMENDACIONES DE ALMACENAMIENTO			
Guardar en un lugar seco a temperatura ambiente y libre de humedad.			
V. CERTIFICACIONES			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO 9001 : 2015</li> </ul>			
VI. FECHA DE CADUCIDAD Y/O CONSUMO PREFERENTE			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 meses</li> </ul>			


VII. INFORMACION DEL FABRICANTE

**Producido por:** PLANTA ACAJETE.  
Ex Hacienda San Martín La Joya S/N Acajete, Puebla.  
C.P. 75110 Tel: 01 (223) 2 7536 00  
[www.calidra.com](http://www.calidra.com)

VIII. CAMBIOS RESPECTO A LA VERSION ANTERIOR

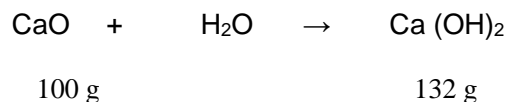
Formato nuevo. Rev.0 Diciembre 2019

La información proporcionada aquí está destinada a ayudar a los clientes a determinar si nuestro producto es adecuado para sus aplicaciones. El uso del producto es responsabilidad del consumidor, así como la idoneidad de utilizar el producto en sus procesos o aplicaciones. La necesidad de modificar esta especificación debe ser hecha por escrito por la empresa y con al menos 6 meses de antelación.



**Figura 2.2 Hoja de seguridad, ficha técnica del producto.**

La cal hidratada o apagada es el producto de la reacción de la cal viva con el agua, lo que forma el hidróxido de calcio. La reacción es la siguiente:



Esta reacción es exotérmica, propiedad por la que se le conoce como *cal viva*, dada sus características de reacción al contacto con el agua. Al adicionar este líquido ocurre dos efectos: expansión y liberación de calor, que dan lugar a que la partícula se fragmente permitiendo a la nueva superficie absorber más agua y continuar la reacción.

Industrialmente, este proceso se logra mediante la incorporación de agua con exceso controlado para compensar el efecto de evaporación, ya que se obtiene temperaturas cercanas a los 100 °C, por tanto, el producto final no debe de tener humedad mayor al 1% para facilitar su manejo. La densidad aparente de la cal hidratada de alta pureza está entre los 400 y 560 k/m<sup>3</sup>.

### 2.3 CICLO DE LA CAL

Las reacciones anteriores forman un ciclo, dado que la cal hidratada al tomar el dióxido de carbono de la atmósfera nos lleva nuevamente al punto de partida, la roca caliza. Este ciclo le confiere la característica de ecológica, lo que permite considerarla como un producto sustentable.

El hidróxido de calcio reacciona con el dióxido de carbono de la atmósfera (Figura 2.3), esto implica que la cal debería reaccionar con el suelo, se re carbonata, reacción que se debe evitar en campo y para ello, lo recomendable es no dejar la mezcla suelo-cal durante más de 3 días en maduración, hacer riegos a la superficie compactada para inhibirla, y permite que la cal adicionada reaccione plenamente con el suelo.

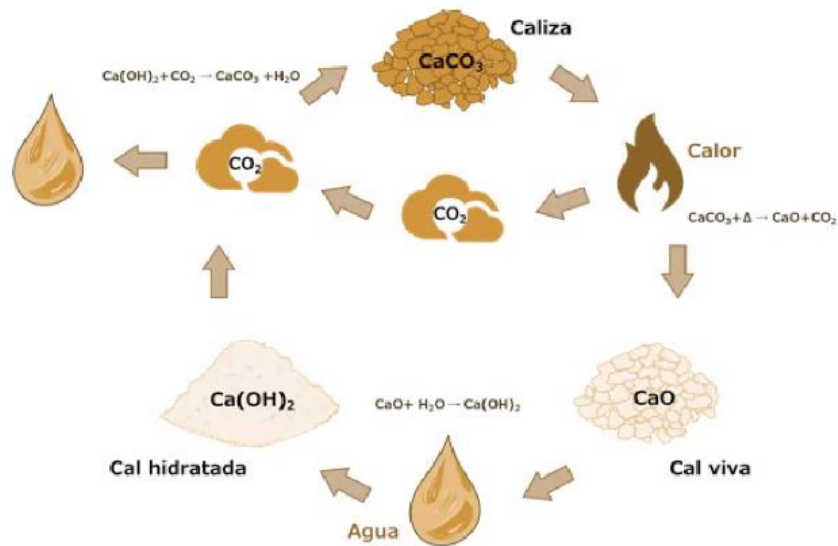


Figura 2.3 Ciclo de la cal.

## 2.4 SOLUBILIDAD

Dado que las reacciones del suelo con la cual se dan en fase acuosa del primero, es importante conocer cómo se comporta la solubilidad de esta última en el agua. La máxima solubilidad de la cal se obtiene a los 25 °C, lo que producirá un ambiente alcalino con un ph de 12.4 (Figura 2.4), este valor es muy importante y debemos tenerlo presente, ya que será la base para comprender la prueba de Eades and Grim.

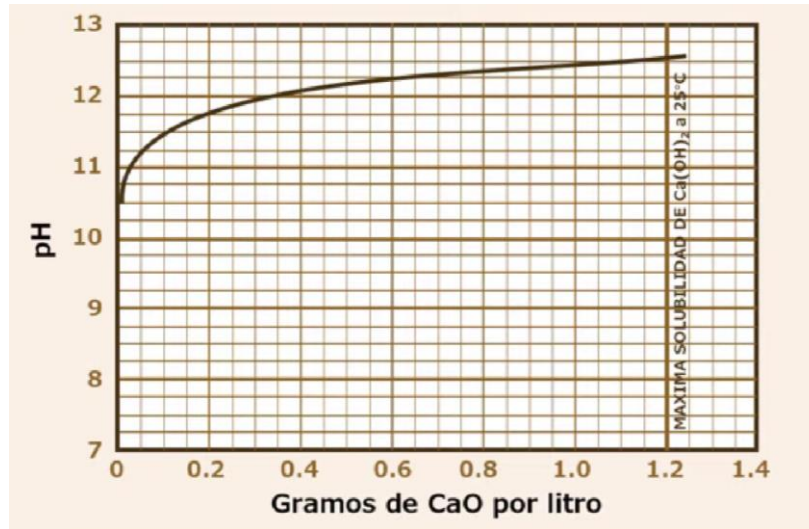


Figura 2.4 Solubilidad de la cal.

## 2.5 DEMANDA MINIMA DE CAL MEDIANTE EL MÉTODO GRÁFICO

La demanda mínima de cal es aquella en la que hemos logrado las condiciones propicias para que se lleven a cabo todas las reacciones del suelo con la cal y que se han satisfecho cada una de las reacciones que implica el adicionar la cal al suelo, es decir, tanto las reacciones de cambio catiónico como las reacciones puzolánicas. Las reacciones puzolánicas son las que van a garantizar la efectividad a largo plazo, es decir, que hemos logrado llevar al punto de estabilización del suelo, por su parte, el contenido óptimo de cal es cuando adicionamos una cantidad mayor a la mínima de cal que nos permite tener mayor desempeño mecánico de la mezcla suelo-cal esto hasta el punto donde se obtiene un beneficio económico que justifica esta mayor adición de cal.

Chester McDowell en 1966, publicó en el Consejo de investigación de autopistas, un método gráfico para la determinación del contenido óptimo de cal como se observa en la figura 2.5,

observamos en el eje de las ordenadas el porcentaje de material que pasa la malla No.40 y en el eje de las abscisas encontramos el índice plástico del material.

Este método se adoptó por la AASHTO en su normativa del apartado T- 220-66-2013 y por el departamento del transporte de Texas en su normativa del apartado TEX-121-E, de la cual estas normativas se emplean en la actualidad incluso por los contratistas que utilizan la cal para la estabilización de suelos (Castañeda, 2022).

El método consiste básicamente en cuatro pasos:

1. Entrar por el eje superior con el índice plástico, bajar de manera paralela a la curva más cercana.
2. Ubicar el porcentaje de material que pasa la malla número 40 en el eje de las ordenas y posteriormente interceptar con una línea curva que hemos proyectado del índice plástico.
3. En ese punto de intersección subir una recta de manera vertical llevándola al eje superior.
4. Finalmente, la curva inmediata a la derecha será el porcentaje óptimo de calcio que estamos buscando.

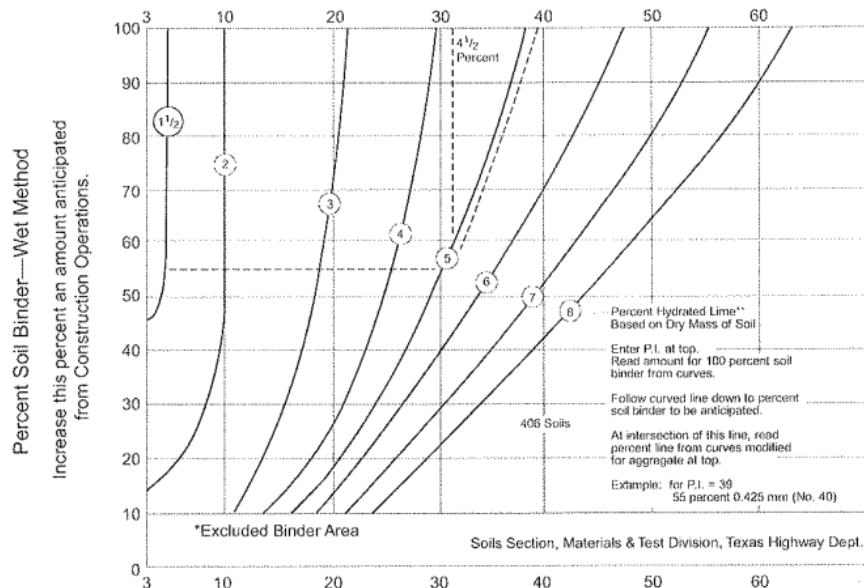


Figura 2.5 Método gráfico para determinar el óptimo de cal (McDowell, 1966)

## 2.6 DEMANDA MÍNIMA DE CAL MEDIANTE EL MÉTODO ASTM

Eades and Grim propusieron una serie de pasos para determinar el contenido óptimo de cal, con el paso del tiempo, este procedimiento fue adoptado por la normativa de la ASTM asignada actualmente como D6276-2019. La normativa tiene por nombre *Uso del pH para estimar la proporción suelo-cal requerida para la estabilización del suelo*.

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

1. Se criba el suelo por la malla No. 40.
2. Se obtienen 5 muestras de 25 g de suelo secado al horno.
3. Se colocan las muestras en frascos de plásticos.
4. Se pesan muestras de cal representativas que sean 2, 3, 4, 5 y 6 por ciento con respecto a peso seco del suelo.
5. El sexto frasco de 2.0 g de cal representa la solución saturada.
6. Se adiciona la cal a cada una de las muestras de suelo y se marca el frasco con cada porcentaje.
7. Se cierra el frasco y se mezcla el suelo con cal.
8. Se adicionan 100 ml de agua destilada a cada frasco.
9. Se tapan los frascos y se agitan durante 30 segundos cada 10 minutos, esto durante una hora.
10. La temperatura de prueba debe ser 25°C.
11. Dentro de los primeros 15 minutos posteriores a la hora, se mide el pH y se registra su valor.
12. 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.

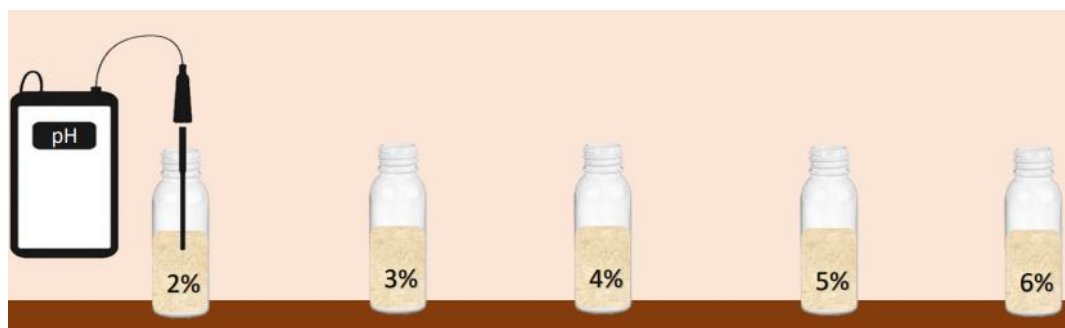


Figura 2.6 Determinación del pH.

---

Por su mineralogía, no todos los suelos tendrán un comportamiento similar, por ello, será necesario tener presente las siguientes observaciones antes de decidir cuál será el contenido óptimo de cal que se tomará como definitivo:

- A. Habrá ocasiones en que el pH de algunos suelos exceda 12.4 con una adición mínima de 2%, y otras que sea ligeramente menor (entre 12.3 y 12.4). Si esto ocurre, se selecciona el porcentaje de cal donde el cambio de pH de 3 frascos consecutivos no sea mayor de 0.04 al incrementar el porcentaje.
- B. Si el mayor pH medido es 12.3 en al menos 2 frascos sucesivos, se tomará el porcentaje medio de cal de los frascos en donde se obtuvo el 12.3
- C. Si el mayor valor medido de pH es 12.3, se tendrán que preparar muestras adicionales usando mayores porcentajes de cal.
- D. Si aun así no se alcanza mínimo 12.3, será necesario revisar la calibración del equipo, estado del electrodo, así como asegurar que la solución de referencia de 2g de cal mide 12.4 pH.

### 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen las pruebas que se realizaron al material arcilloso expansivo en estado natural y con la estabilización con óxido de calcio.

Todos los procedimientos de ensayos en esta investigación fueron realizados apegados a lo señalado en la normatividad de la SCT y los recomendados por CALIDRA como son normas ASTM y normas AASHTO.

#### 3.1 MUESTREO

Las muestras fueron obtenidas en un predio ubicado en la localidad de San Francisco Totimehuacan sobre la Av. Libertad No.4311 (Figura 3.1), para ello se procedió a obtener muestras de tipo alteradas representativas a una profundidad de 1.20 m respetando en todo momento lo señalado en la normatividad de Métodos de Muestreo y Pruebas de materiales (*M-MMP-1-01/03*). Se realizó la toma de 3 porciones de material de aproximadamente 30 kg. Estas fueron envasadas en bolsas de plásticos resistentes para evitar la pérdida de humedad y fueron transportadas al laboratorio para sus correspondientes ensayos.

Es importante indicar que en esta investigación no buscamos fórmulas matemáticas o correlaciones, en este caso, solo nos interesa conocer el comportamiento del material en estado natural, conocer su comportamiento al estabilizarlo con óxido de calcio, por ello, el muestreo fue localizado en un solo punto y no a lo largo de una carretera, tramo en ejecución, reparación o conservación.

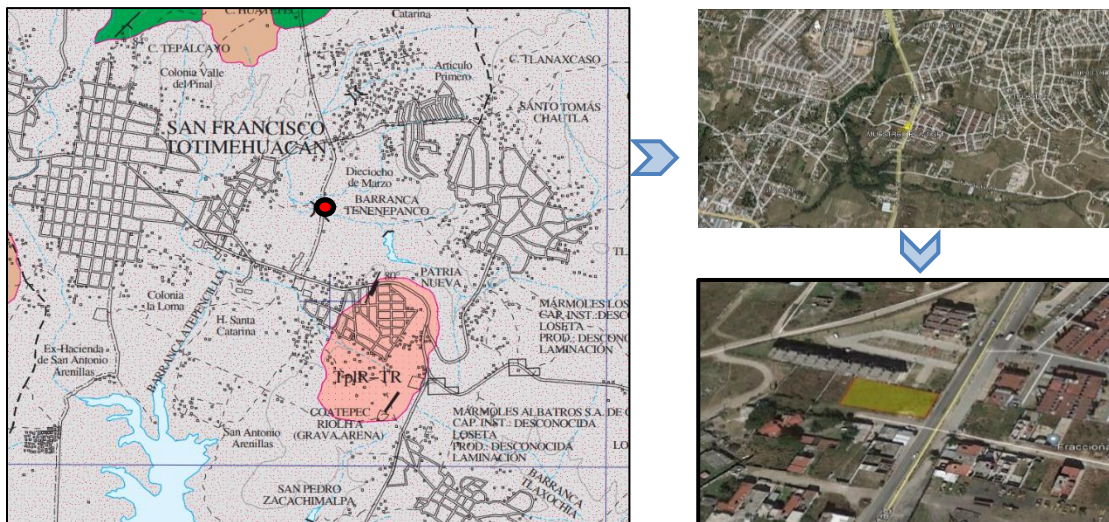
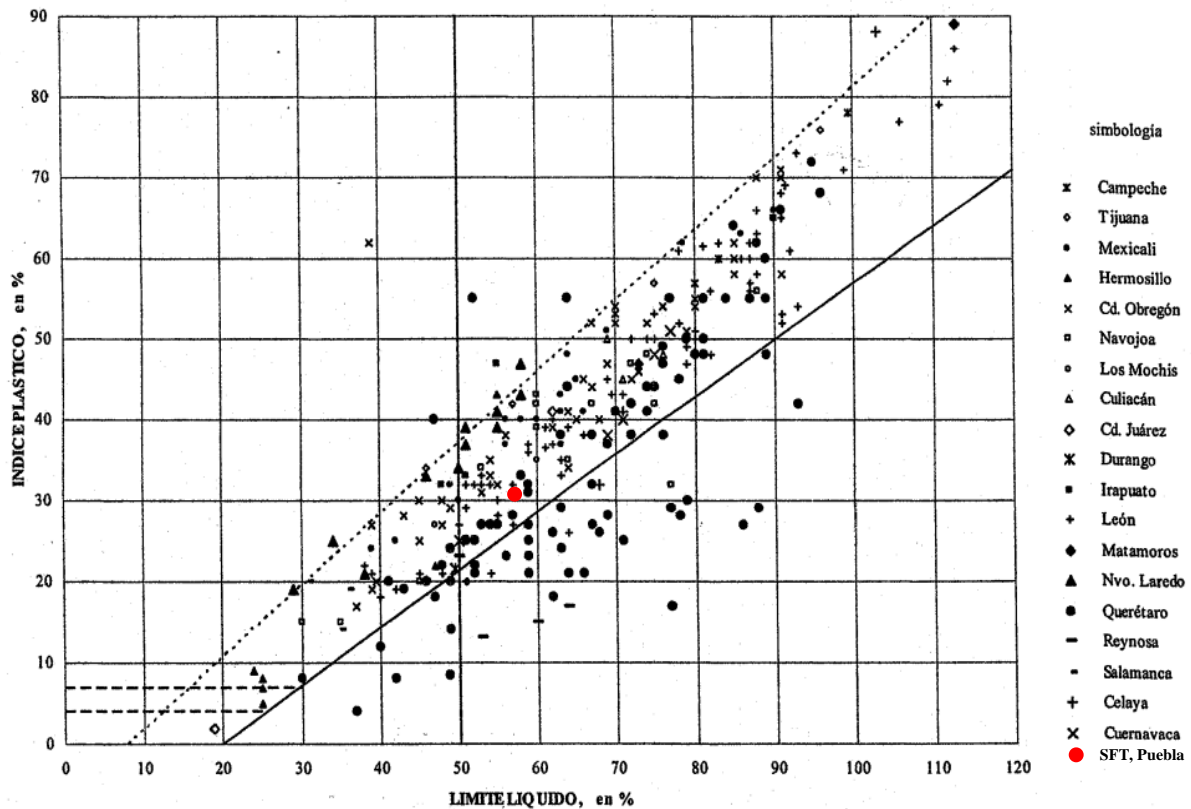


Figura 3.1 Ubicación del predio donde se realizó el muestreo.

En investigaciones anteriores como lo señala Flores (2012), comprobó la existencia de arcilla expansiva en la localidad de San Francisco Totimehuacán en el barrio de Guadalupe Tlaltelpa; por su parte, Romero (2004), ubicó la existencia de material arcilloso expansivo en Colonia El Mirador de la Ciudad de Puebla. En trabajos realizados por el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la BUAP en el año 2004, encontraron la presencia de este mismo material en estudios de capacidad de carga para el fraccionamiento habitacional de Barrios de Santa Catarina, Fraccionamiento La Guadalupana, Fraccionamiento Lomas del Valle y en el control y calidad del Boulevard Capitán Carlos Camacho Espíritu (Boulevard Valsequillo) en el tramo de la Av. José María la Fragua al Río Alseseca.

En base a las investigaciones anteriores, podemos afirmar, que el material estudiado en este proyecto de tesis corresponde a un material de características similares. Además, podemos observar, que se ubica de manera grafica en la carta de plasticidad propuesta por Zepeda (2004).



**Figura 3.2** Carta de plasticidad de suelos expansivos de varias ciudades de la República Mexicana.

### 3.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Después de realizado el muestreo del material, se realizaron los procesos de secado, disgregado y cuarteo.

Con el fin de reducir el contenido de humedad natural, en laboratorio se procedió al tendido del material en una superficie plana y limpia para evitar la contaminación, el fácil manejo al recogerla y evitar la pérdida de finos.

Este material se dejó a un proceso de secado al aire y sol a temperatura ambiente por varios días y al observar los terrones o grumos de material se redujo el tamaño realizando un proceso de disgregado hasta reducirlo a lo que pasa la malla o criba No 4 (4.75 mm). Finalmente se realizó un proceso de cuarteo con el objetivo de homogenizar el material y obtener muestras representativas de igual tamaño y proporción para realizar los ensayos necesarios.

### 3.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ÓXIDO DE CALCIO

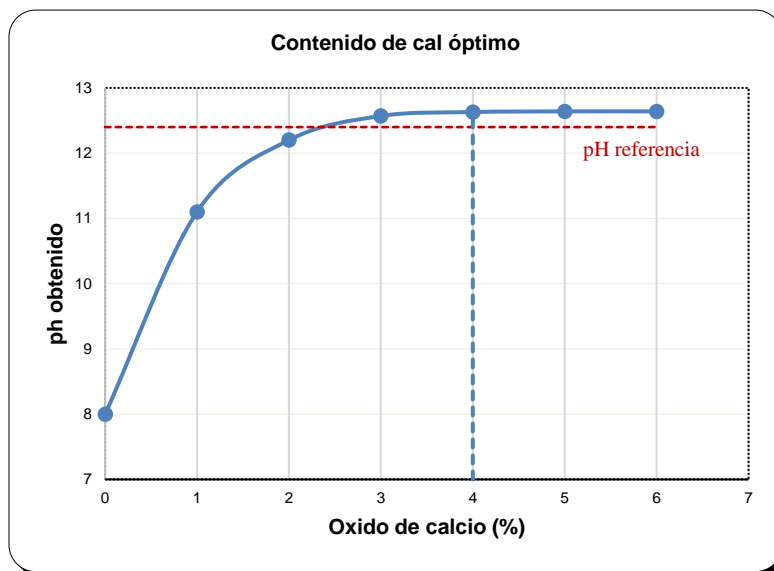
En primera instancia, para conocer el porcentaje de cal por agregar al suelo, se realizó el procedimiento señalado por Eades and Grim adaptado por la norma ASTM D6276-2019.

El procedimiento de preparación y ejecución para la determinación del contenido óptimo de cal se describió en el capítulo 2 en el apartado 2.6.

De la determinación del contenido óptimo de cal se obtuvieron los siguientes resultados:

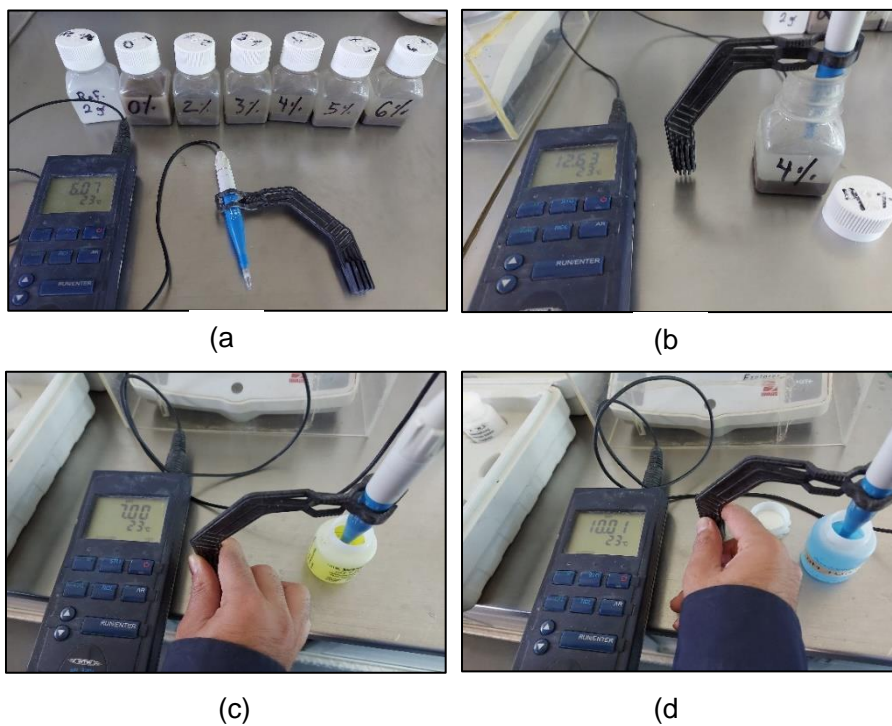
**Tabla 3.1 Determinación del contenido óptimo de cal.**

ENSAYE	CAL (%)	pH
1	0	8
2	1	11.1
3	2	12.2
4	3	12.57
<b>5</b>	<b>4</b>	<b>12.63</b>
6	5	12.64
7	6	12.64



**Figura 3.3** Contenido óptimo de óxido de calcio.

Es importante señalar que previo a obtener estos resultados, el equipo para la determinación de pH fue calibrado en un rango de 7 a 10 de pH de las soluciones Buffer testigo.

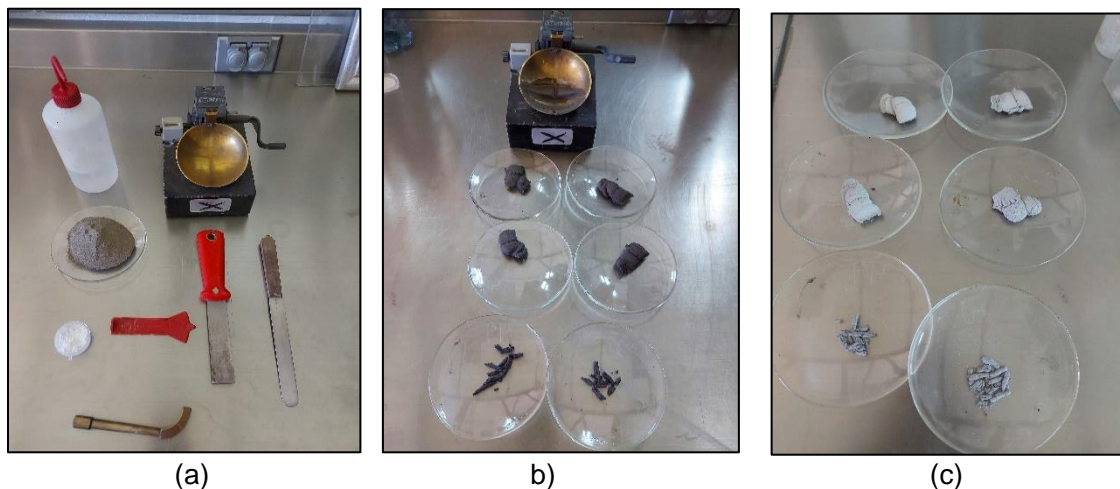


**Figura 3.4** Determinación del contenido óptimo de óxido de calcio (a) y (b); calibración de equipo para pH 7 (c) y pH 10 (d).

### 3.4 DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA Y DE COMPACTACIÓN DEL SUELO EN ESTADO NATURAL

Los parámetros de límite líquido y límite plástico se determinan como el cálculo de un contenido de humedad y para el cálculo del índice plástico se determinó como la diferencia del límite líquido menos el límite plástico.

Se realizaron los límites de Atterberg con el uso de la Copa de Casagrande con el fin de permitirnos identificar la clasificación del material de acuerdo con la Carta de Unificada de Clasificación de Suelos (SUCS) y apegándonos en lo señalado en la normativa de la *SCT M-MMP-1-07-07* vigente a esta fecha de investigación.



**Figura 3.5 Determinación de los límites de consistencia; equipo (a), en estado natural (b) y adición de óxido de calcio (c).**

Para la preparación del material, se obtuvo dos porciones con una masa de 70 g que pasara la malla número 40 (0.420 mm) y a una de ellas se le incorporo 2.8 g de óxido de calcio. Los resultados obtenidos fueron los siguiente:

**Tabla 3.2 Determinación de los límites de consistencia en estado natural**

Límite líquido ( $\omega_L$ %)	límite plástico ( $\omega_p$ %)	Índice plástico (Ip %)	SUCS
58.35	26.55	31.8	CH

**Tabla 3.3 Determinación de los límites de consistencia estabilizado con 4% de óxido de calcio**

Límite líquido ( $\omega_L$ %)	límite plástico ( $\omega_p$ %)	Índice plástico (Ip %)	SUCS
50.211	38.92	11.29	SM

Posterior a calcular sus contenidos de agua, para ambos materiales, se procedió a graficarlo dentro de la carta de plasticidad y también poder determinar su curva de fluidez para que de manera analítica se pudiera conocer el límite líquido a los 25 golpes tal como se muestra en la figura 3.6.

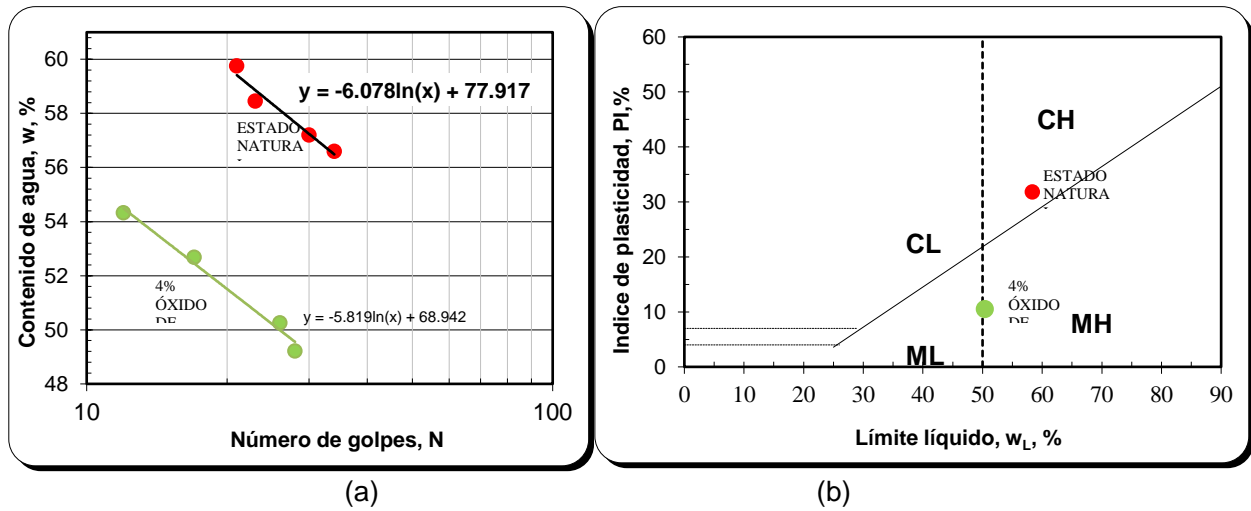
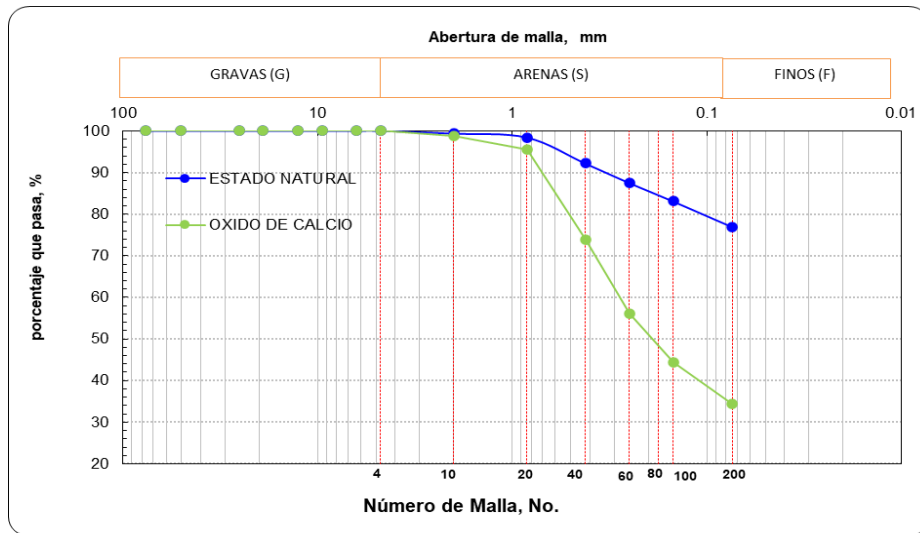


Figura 3.6 Curva de fluidez para determinación del límite líquido (a), ubicación en carta de plasticidad del SUCS (b).

También fue necesario determinar los porcentajes de tamaños del material analizado, para ello se realizó su correspondiente análisis granulométrico en estado natural y con el óxido de calcio, del cual se obtuvo las siguientes curvas granulométricas:



	Grava (G%)	Arena (S%)	Finos (F%)
Estado natural	0.00	23.00	77.00
Óxido de calcio	0.00	65.70	34.30

Figura 3.7 Composición de la curva granulométrica.

### 3.5 COMPACTACIÓN DEL SUELO MEDIANTE PRUEBA AASHTO ESTANDAR

Fue fundamental conocer el peso específico seco máximo y su humedad óptima del material en estudio, ya que, con estos resultados, se comparó el peso específico de los especímenes remoldeados para su ensaye a compresión simple (se comentará en el apartado 3.6), por ello, se determinó la curva de compactación Aashto estándar para el suelo en estado natural y con la adición del óxido de calcio al 4% (figura 3.8).

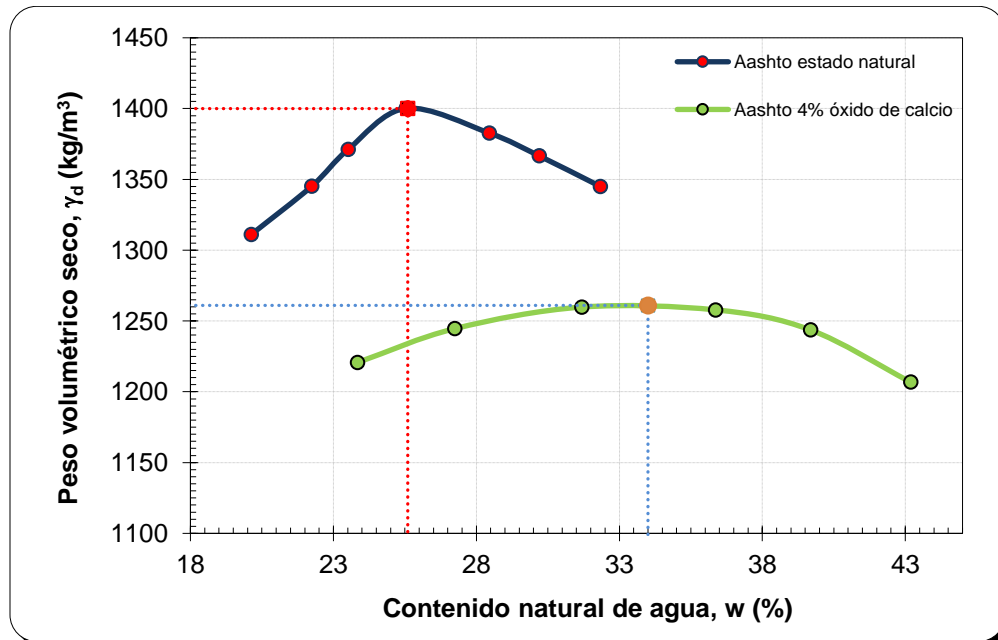


Figura 3.8 Curvas AASHTO Estándar para determinación de la masa seca máxima y humedad óptima.

Los resultados obtenidos se puede observar la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Determinación de la masa seca máxima y humedad óptima.

	Peso Vol. Seco Max. $\gamma_d$ $kg/m^3$	Wopt  <b>w</b> %
<b>ESTADO NATURAL</b>	1400	26
<b>CON ÓXIDO DE CALCIO</b>	1261	34

Para la determinación de las masas secas máximas y humedades óptimas, se empleó lo señalado en la normatividad M-MMP-1-09/06 vigente a esta fecha de investigación empleando la prueba AASHTO estandar variante **A** (materiales que pasan la malla No 4 y con molde de 101.6 mm de diámetro interior) con las características que se indican en la tabla 3.5 y 3.6.

**Tabla 3.5 Pisones y número de capas para las pruebas AASHTO.**

Tipo de prueba	Estándar	Modificada
Masa de pisón, kg	2.5 ± 0.01	4.54 ± 0.01
Número de capas del material	3	5

**Tabla 3.6 Características de las variantes de las pruebas de compactación.**

Variante	A	B	C	D
Tamaño máximo del material, mm	4.75 (No 4)		19.0 (3/4")	
Tamaño de la muestra de prueba, kg	4.0	7.5	4.0	7.5
Diámetro int. del molde, mm	101.6 ± 0.4	152.4 ± 0.7	101.6 ± 0.4	152.4 ± 0.7
Número de golpes por capa	25	56	25	56

### 3.6 DETERMINACIÓN DEL CBR Y EXPANSIÓN

Uno de los parámetros principales que se usan para alimentar los programas de diseño de los espesores de las capas de los pavimentos, es el uso del CBR (California Bearing Ratio).

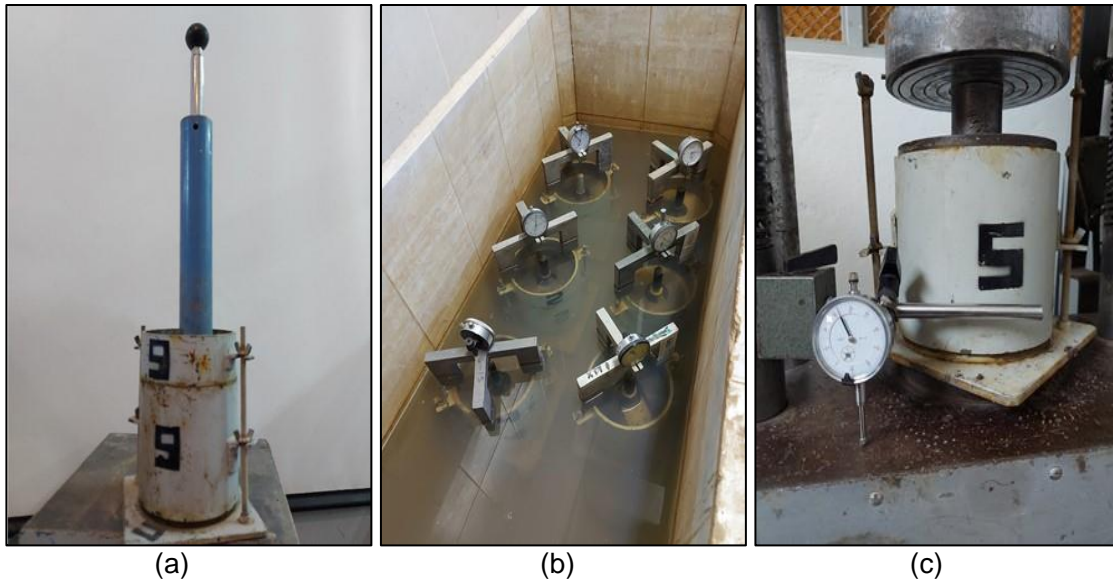
En este trabajo hemos evaluado el comportamiento del CBR para el caso del material expansivo en estado natural y con la adición del óxido de calcio.

Este procedimiento consiste en compactar dinámicamente tres especímenes del material, con diferentes energías de compactación y un contenido de agua inicial igual al determinado en laboratorio conocido como su humedad óptima ( $\omega_o$ ), estimado para la masa volumétrica seca máxima del material ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ); someter a cada espécimen a un proceso de saturación para obtener su cambio volumétrico y una vez saturado, introducir en él un pistón de penetración de acero, con el propósito de cuantificar las cargas necesarias para lograr magnitudes de penetración específicas. La expansión ( $Exp$ ) de cada espécimen es la relación en porcentaje del incremento de su altura debido a la saturación, entre su altura original y la menor relación en porcentaje de las cargas aplicadas para producir penetraciones de 2.54 mm y 5.08 mm, entre las cargas de referencia de 13.34 kN (1360 kg) y 20.01 kN (2040 kg) respectivamente, en su correspondiente Valor Soporte California ( $CBR$ ).

En este trabajo de investigación, se propuso trabajar el material contemplando las características de la tabla 3.7 considerándolo como un material tipo subrasante y empleando lo señalado en la normativa de la SCT en su apartado M-MMP-1-11/16 vigente a esta fecha de trabajo.

**Tabla 3.7 Energía de compactación y número de golpes para compactar los especímenes.**

Material para	Especimen N°	Energía específica de compactación kg-cm/cm <sup>3</sup>	Número de golpes por capa	
			Pisón 2.5 kg	Pisón 4.54 kg
Terraplén	1	6.03	56	--
	2	2.69	25	--
	3	1.08	10	--
Subyacente	1	6.03	56	--
	2	2.69	25	--
	3	1.08	10	--
Subrasante	1	27.42	--	56
	2	6.03	56	--
	3	2.69	25	--



**Figura 3.9 Determinación del CBR; compactación (a), saturación (b) y penetración (c).**

Se realizó el CBR para tres porciones de material de 7 kg cada una en estado natural y 3 porciones de material de 7 kg cada uno adicionando 280 g de óxido de calcio que representan el 4%. Para el cálculo del CBR, se determinaron las gráficas 3.10 y 3.11, donde de manera gráfica se intercepta el peso volumétrico seco del material con la línea de tendencia que se genera de los tres puntos de CBR de cada espécimen y esta se prolonga al eje de las ordenadas obteniendo el CBR final. Los parámetros obtenidos se pueden observar en la tabla 3.8.

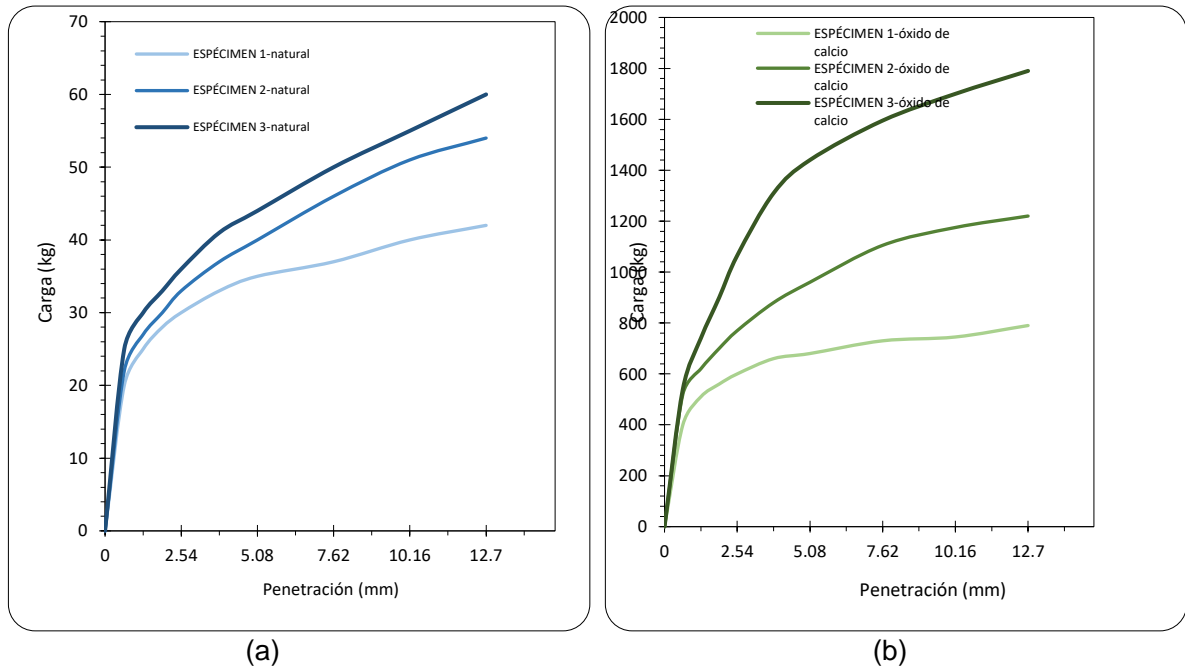


Figura 3.10 Gráfica penetración vs carga; estado natural (a) y con óxido de calcio (b).

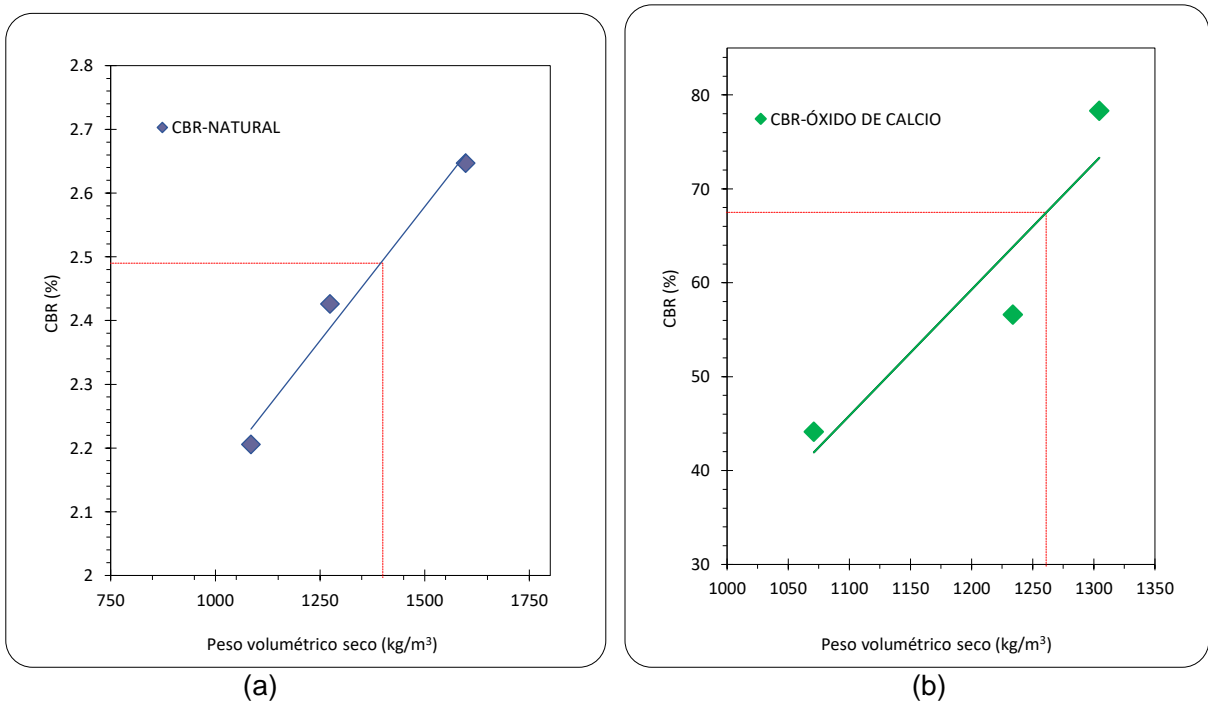


Figura 3.11 Determinación del CBR; estado natural (a) y con óxido de calcio (b).

Tabla 3.8 Resultados obtenidos de CBR de manera gráfica.

Muestra	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3	CBR Obtenido
CBR – natural	2.21	2.43	2.65	2.49
CBR-óxido de calcio	44.118	56.618	78.309	67.5

De manera conjunta, se calculó el porcentaje de expansión de cada espécimen después de estar por 96 horas en proceso de saturación en agua. De estos parámetros, se pueden observar en la tabla 3.9.

**Tabla 3.9 Resultados obtenidos del porcentaje de expansión.**

Muestra	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3	Expansión promedio (%)
CBR – natural	6.39	5.28	5.19	5.62
CBR-óxido de calcio	1.04	0.96	0.12	0.71

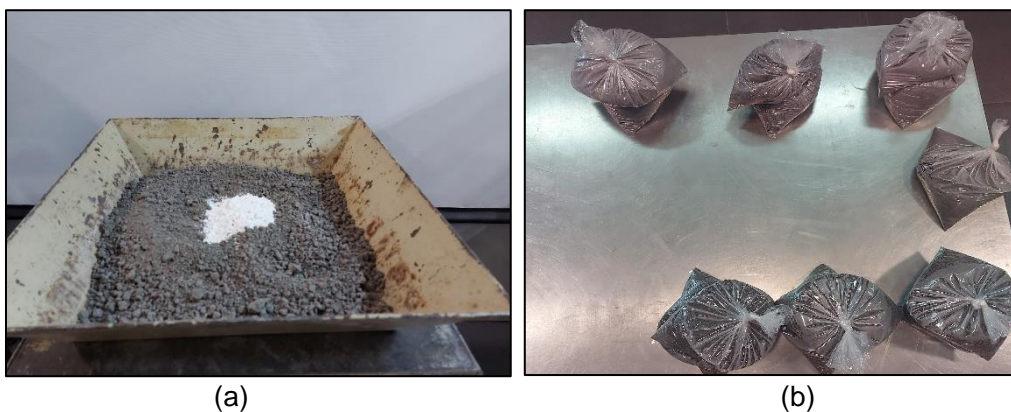
### 3.7 RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Otro de los parámetros evaluados en esta investigación fue la resistencia a compresión simple no confinada. En algunos programas de diseño de los espesores de las capas del pavimento, este parámetro es necesario para poder alimentarlos.

Los procedimientos para preparación de especímenes fue el siguiente:

Se preparó la mezcla suelo-óxido de calcio-agua (Figura 3.12) y se permitió curado de la mezcla durante 24 horas.

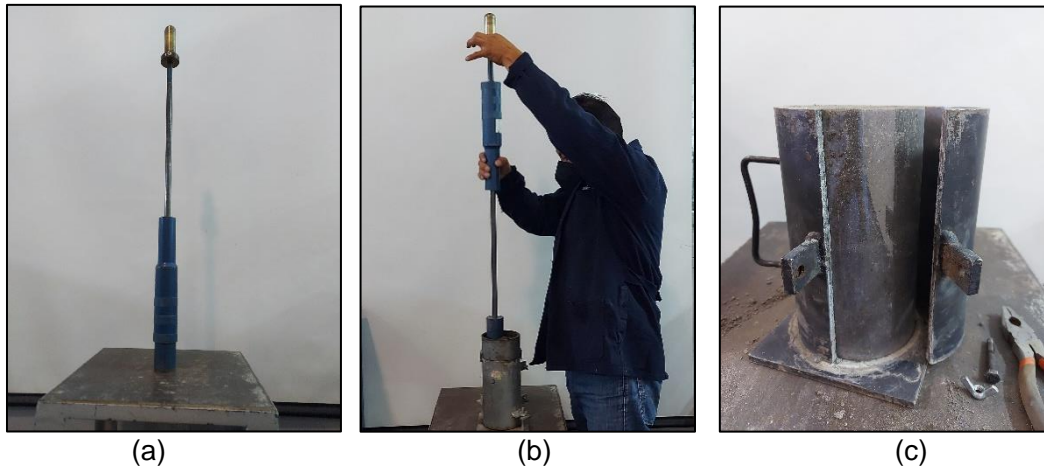
Para las muestras en estado natural, solo se adicionó el agua de compactación; tras mezclarla, se permitió tiempo de curado de 24 horas.



**Figura 3.12 Preparación de material para ensaye a compresión simple (a) y proceso de curado o maduración de 24 hr antes de compactar.**

Después del mezclado, el material fue densificado de manera manual; se utilizaron moldes de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura (sin collarín). Las muestras fueron compactadas en 4 capas, aplicando 8 golpes por capa para el suelo natural y suelo con óxido de calcio (Figura

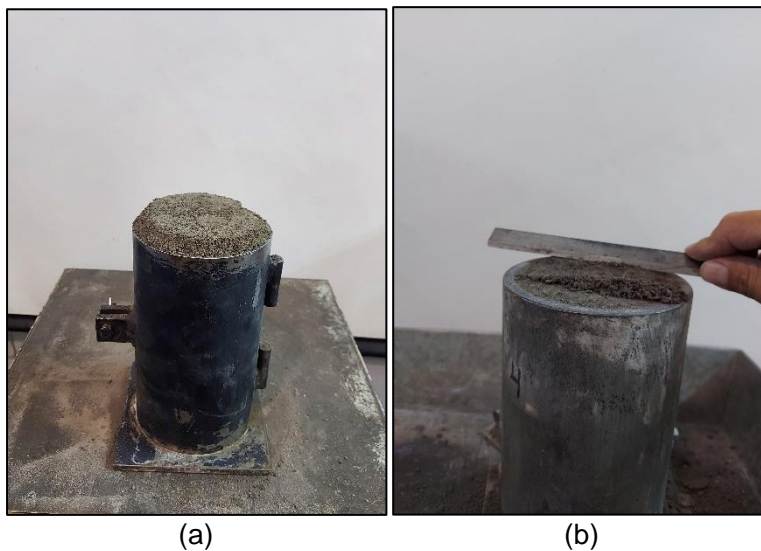
3.13); se colocó una lámina de acetato para evitar que el material compactado se pegara en las paredes interiores del molde.



**Figura 3.13 Pisón de compactación (a), compactación de material (b) y molde de compactación con lámina de acetato (c).**

Para el procedimiento de compactación, se utilizó el pisón de 4.5 kg de masa y altura de caída de 45.7 cm. Se propuso realizar los remoldeos llevándolos a una densificación del 95% con respecto a su peso volumétrico seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ).

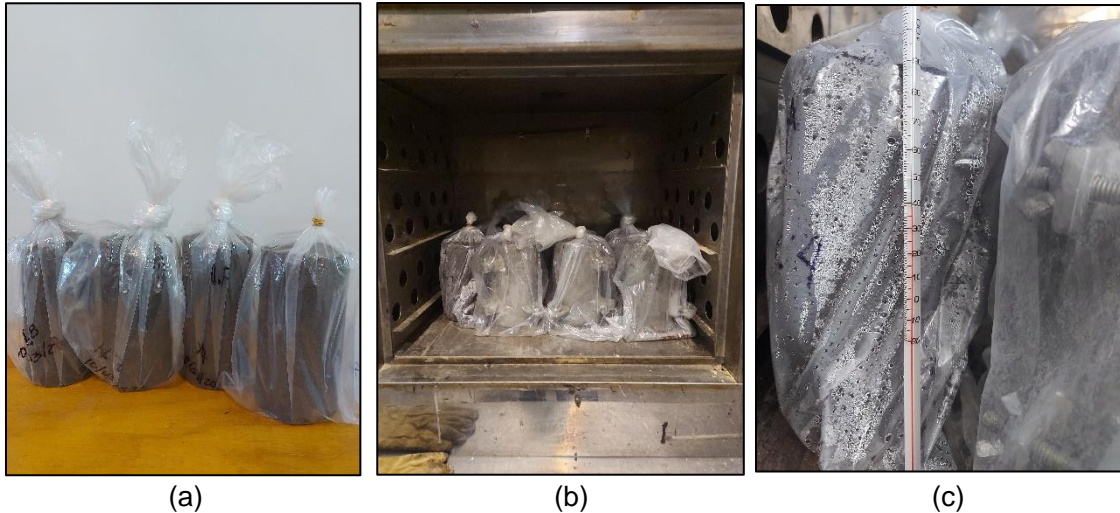
Posterior a la compactación, se enrasó la superficie de la muestra, se pesó y se midió (Figura 3.14).



**Figura 3.14 Muestra compactada (a) y enrase de material (b).**

Después de la compactación de los especímenes, estos fueron colocados en una bolsa de poliestireno para que, cumplido su tiempo de maduración, se pudieran ensayar a compresión simple cumpliendo las siguientes características:

- Embolsados y colocados dentro del horno a una temperatura de 40°C.
- Ensayados a compresión simple cumpliendo 7 días de maduración.
- Ensayados a compresión simple después de cumplir 14 días de maduración.



**Figura 3.15 Especímenes compactados (a), especímenes colocados dentro del horno (b) y determinación de la temperatura dentro del horno (c).**

Se compactaron 14 especímenes de los cuales 5 de ellos se estabilizaron con óxido de calcio al 4% y fueron ensayados a 7 días de maduración; 5 más, se ensayaron a 14 días de maduración de los cuales también fueron mezclados con óxido de calcio y finalmente 4 especímenes fueron compactados sin ser estabilizados para ensayar 2 a 7 días y 2 a 14 días de maduración.

Los resultados obtenidos en los ensayos a compresión simple a 7 días y 14 días de maduración se pueden apreciar en la tabla 3.10 y 3.11 en la cual también se muestran algunas características generales de cada espécimen ensayados y sus gráficas esfuerzo deformación comparándolos con los especímenes en estado natural.

Tabla 3.10 Resultados obtenidos en especímenes ensayados a 7 días de maduración.

		ESTABILIZADOS CON ÓXIDO DE CALCIO					EDO. NATURAL	
		ENSAYE A 7 DÍAS						
		E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-11	E-12
HUMEDAD COMP. ( $\omega$ )		34.5	34.5	35.6	35.2	34	26	26
DIÁMETRO (cm)		10.1	10.1	10.1	10	10.1	10	10.1
ALTURA (cm)		20.3	20.3	20.1	20	20	20	20
ÁREA (cm <sup>2</sup> )		80.12	80.12	80.12	78.54	80.12	78.54	80.12
PESO (g)		2617.95	2630	2615	2548	2580	2620	2663
$\gamma_{\text{nat}}$ (kg/m <sup>3</sup> )		1610	1617	1624	1622	1610	1668	1662
$\gamma_{\text{d máx}}$	(kg/m <sup>3</sup> )	1197	1202	1198	1200	1202	1324	1319
	(kN/m <sup>3</sup> )	11.97	12.02	11.98	12.00	12.02	13.24	13.19
Gc (%)		94.9	95.3	95.0	95.1	95.3	94.6	94.2
CARGA FALLA (kg)		335	300	335	365	365	160	180
ESFUERZO	(kg/cm <sup>2</sup> )	<b>4.11</b>	<b>3.68</b>	<b>4.13</b>	<b>4.59</b>	<b>4.50</b>	<b>2.02</b>	<b>2.23</b>
	(kPa)	<b>402.87</b>	<b>360.60</b>	<b>404.64</b>	<b>449.65</b>	<b>440.82</b>	<b>197.91</b>	<b>218.50</b>
MOD. ELÁSTICO	(kg/cm <sup>2</sup> )	250	194	333	300	269	250	227.3
	(kPa)	24517.5	19025.58	32657.31	29421	26380.83	24517.5	22291.31
DEFORMACIÓN $\epsilon$ (mm/mm)		0.018	0.018	0.013	0.013	0.013	0.01	0.008

**Tabla 3.11 Resultados obtenidos en especímenes ensayados a 14 días de maduración.**

	ESTABILIZADOS CON ÓXIDO DE CALCIO					EDO. NATURAL		
	ENSAYE A 14 DÍAS							
	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-13	E-14	
HUMEDAD COMP. ( $\omega$ )	34.3	34.5	34	34.6	34.3	26	26	
DIÁMETRO (cm)	10	10	10	10	10	10	10	
ALTURA (cm)	20	20	20	20	20	20	20	
ÁREA (cm <sup>2</sup> )	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	
PESO (g)	2554.8	2528.9	2497.8	2535.1	2550.5	2590	2585	
$\gamma_{\text{nat}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1626	1610	1590	1614	1624	1649	1646	
$\gamma_{\text{d máx}}$	(kg/m <sup>3</sup> )	1211	1197	1187	1199	1209	1309	1306
	(kN/m <sup>3</sup> )	12.11	11.97	11.87	11.99	12.09	13.09	13.06
Gc (%)	96.0	94.9	94.1	95.1	95.9	93.5	93.3	
CARGA FALLA (kg)	965	985	995	975	980	235	250	
ESFUERZO	(kg/cm <sup>2</sup> )	<b>12.13</b>	<b>12.43</b>	<b>12.59</b>	<b>12.30</b>	<b>12.36</b>	<b>2.95</b>	<b>3.14</b>
	(kPa)	<b>1189.69</b>	<b>1219.01</b>	<b>1234.51</b>	<b>1205.87</b>	<b>1212.05</b>	<b>289.70</b>	<b>308.23</b>
MOD. ELÁSTICO	(kg/cm <sup>2</sup> )	867	1182	1500	1333	1091	300	333.3
	(kPa)	85026.69	115918.7	147105	130727.3	106994.4	29421	32686.73
DEFORMACIÓN $\epsilon$ (mm/mm)	0.013	0.009	0.006	0.01	0.01	0.013	0.013	

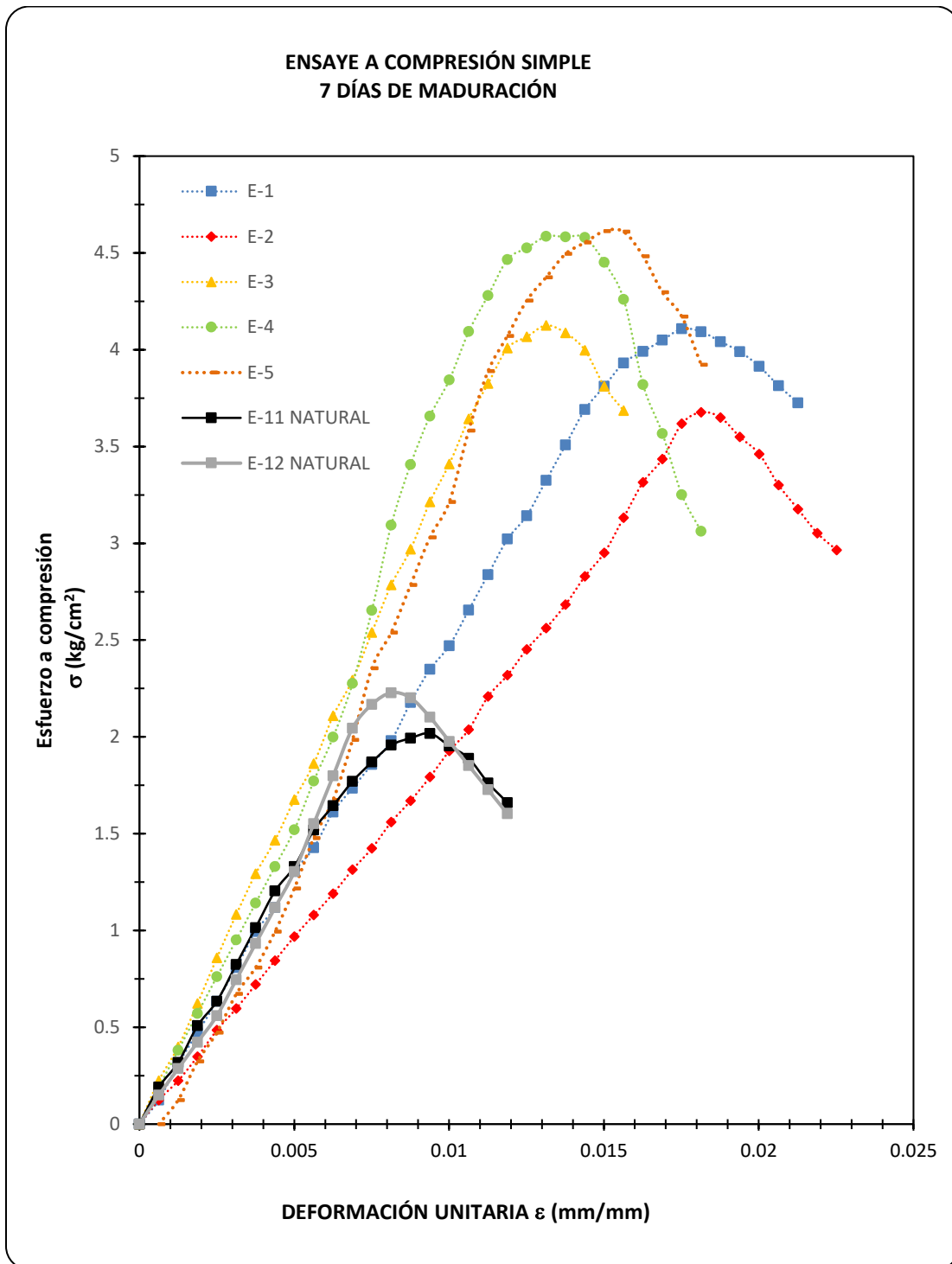


Figura 3.16 Gráficos de ensayos a compresión simple a 7 días de maduración.

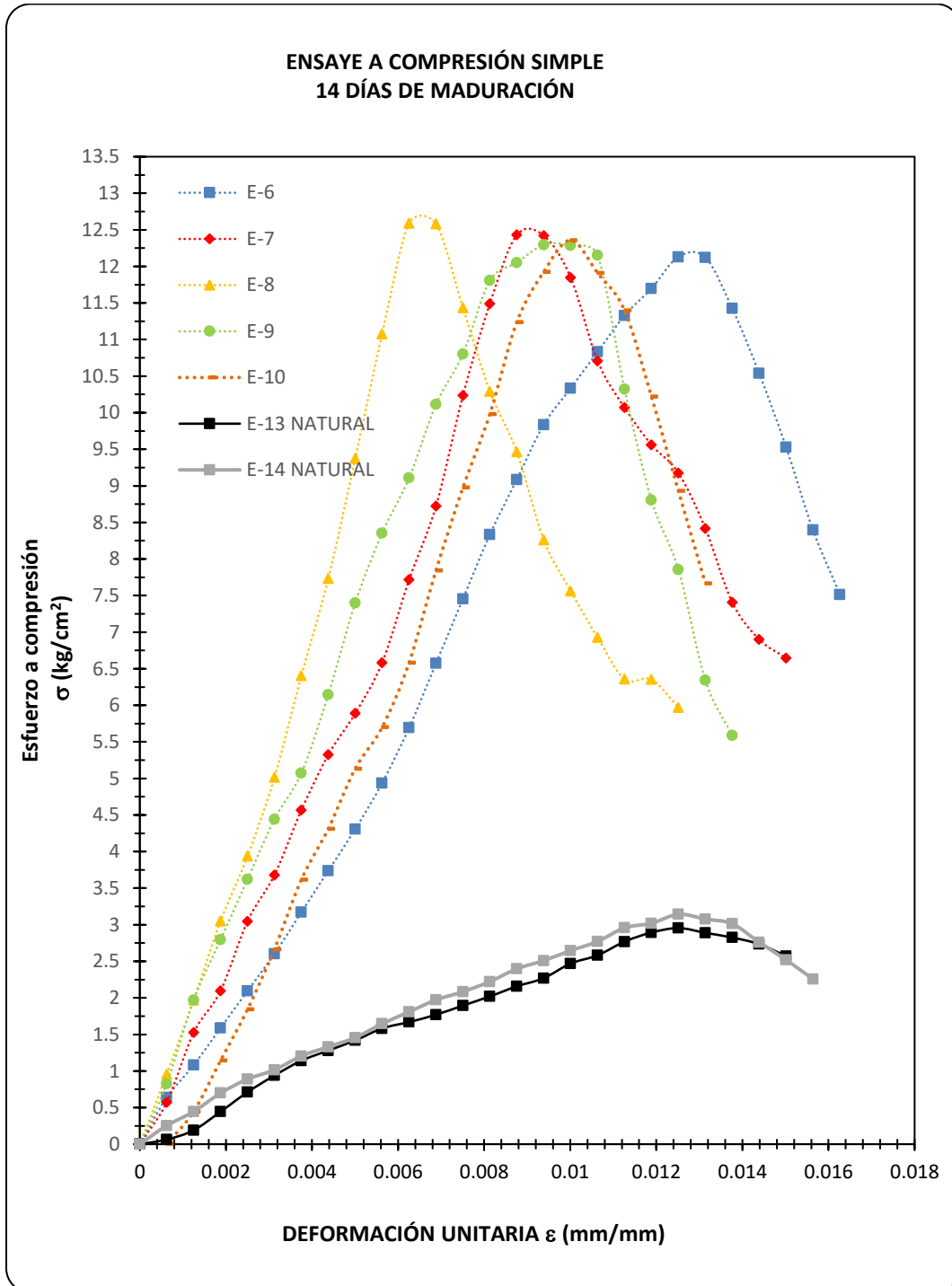


Figura 3.17 Gráficos de ensayos a compresión simple a 14 días de maduración.

## 4 ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo analizaremos los resultados obtenidos de cada una de las pruebas ejecutadas al material arcilloso expansivo en estado natural y estabilizado con óxido de calcio.

### 4.1 PROPIEDADES ÍNDICE

En primera instancia podemos mencionar que se corrobora de la existencia de un material expansivo en la localidad de San Francisco Totimehuacan al poderlo comparar con la tabla propuesta por Chen (1975), en función con su Índice de plasticidad y así conocer su potencial de expansión.

**Tabla 4.1 Relación entre potencial de expansión versus índice de plasticidad (Chen, 1975).**

Potencial de expansión	Índice de plasticidad
Bajo	0 - 15
Medio	10 - 35
Alto	20 - 55
Muy alto	35 ó mas

En los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio, se observa que, el índice de plasticidad ( $I_p$ ) en estado natural obtenido en esta investigación fue de **31.8%** por lo que lo podríamos clasificar como un material de medio a alto en lo que se refiere a su potencial de expansión.

Como se pudo observar en el capítulo 3 de la Carta de plasticidad de suelos expansivos de varias ciudades de la República Mexicana propuesta por Cepeda (2004), el material analizado en esta investigación se ubica dentro de la mayor densidad de puntos, esto nos conduce una vez más a comprobar que se ha trabajado con un material arcilloso expansivo.

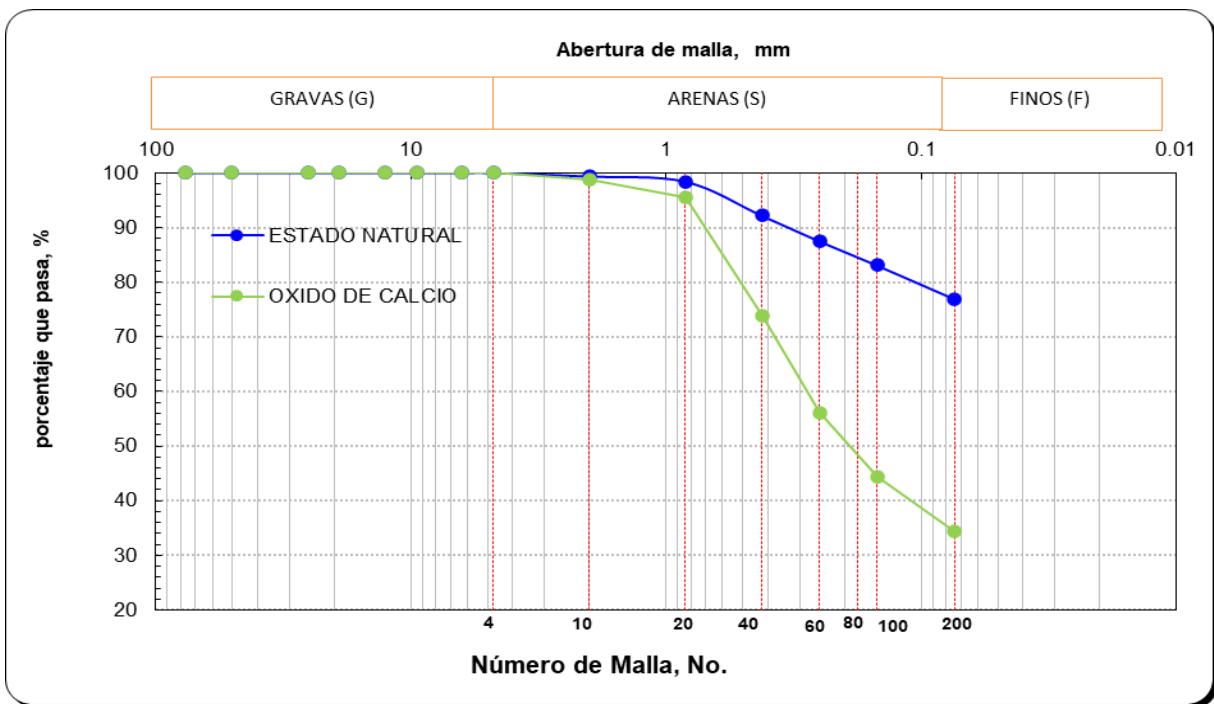
En el caso de las propiedades índice del material, podemos mencionar que en estado natural fue clasificado como una arcilla de alta plasticidad (CH) y cuando se realizó la estabilización con oxido de calcio al 4%, este cambió en su clasificación SUCS y se obtuvo una arena limosa (SM).

En la práctica profesional, se ha podido observar que en el proceso de estabilización de suelos con el uso de cal, provoca que los materiales presenten un mayor consumo de agua en su propiedad de limite líquido y que el índice plástico disminuya, sin embargo, en este

trabajo de investigación, se observa que no sucedió de esa forma debido a que la recomendación es permitir el proceso de maduración del material con el óxido de calcio provocando que exista un intercambio catiónico entre los minerales de la arcilla y la cal. Lo que, si es evidente, es la disminución del índice plástico.

**Tabla 4.2 Comparativa de los límites de consistencia.**

	Límite líquido ( $\omega_L$ %)	límite plástico ( $\omega_p$ %)	Índice plástico ( $I_p$ %)	SUCS
EDO. NAT.	58.35	26.55	31.8	CH
ÓXIDO DE CALCIO	50.211	38.92	11.29	SM



	Grava (G%)	Arena (S%)	Finos (F%)
Estado natural	0.00	23.00	77.00
Óxido de calcio	0.00	65.70	34.30

**Figura 4.1 Comparativa de la curva granulométrica.**

Un segundo efecto que se produce al realizar la estabilización de suelos con cal es en su granulometría. Debido al fenómeno de floculación y aglomeración entre las partículas del suelo provocado por el intercambio catiónico, la reducción de la parte fina paso de 77% en estado natural a 34.3% con el uso del óxido de calcio dando como consecuencia que el material cambiara en su composición granulométrica de un fino (CH) a una arena (SM) tal como se observa en la figura 4.1.

## 4.2 DEMANDA MÍNIMA DE ÓXIDO DE CALCIO

Como se observa en la tabla 4.3, el contenido óptimo de óxido de calcio fue de 4 % al obtener un pH de 12.63, el cual es el necesario que demanda los minerales de la arcilla.

De la tabla 4.3 podemos observar que el material arcilloso presenta un pH de 8 en estado natural con 0% de óxido de calcio, es decir, los iones del material arcillosos se encuentran libres al no tener reacción con otros materiales o agentes de estabilización. A medida que se aumenta el porcentaje de cal, el pH tiende a incrementarse hasta llegar a un equilibrio. Si bien, en un inicio la norma de ASTM - D6276 indica que 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, observamos que en nuestro caso no ocurrió de esta forma. Esto se debe a que la mineralogía del material arcilloso demandó más consumo de iones de calcio al perder minerales de sodio y potasio hasta llegar a un equilibrio del 12.63 de pH que representa el 4% de óxido de calcio.

**Tabla 4.3 Resultados del contenido óptimo de cal.**

ENSAYE	CAL (%)	pH
1	0	8
2	1	11.1
3	2	12.2
4	3	12.57
<b>5</b>	<b>4</b>	<b>12.63</b>
6	5	12.64
7	6	12.64

También podemos observar que del ensaye 2 al ensaye 4 con una adición de cal del 2%, el pH subió muy rápido al pasar de un pH de 11.1 a un pH de 12.57, sin embargo, aún no se puede señalar que se ha cumplido con la demanda de cal que requiere el material arcilloso, y esto se logró al observar que del 4% al 6% de cal se obtenían lecturas de pH muy similares y las cuales no difieren de la recomendación señalada de ***no ser mayor a 0.004 en las lecturas de pH en tres frascos consecutivos.***

## 4.3 VALOR SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

Indiscutiblemente, el CBR fue uno de los parámetros a evaluar en este trabajo de investigación, ya que como se sabe, los evaluadores para el diseño de los espesores de las capas de la

estructura de un pavimento, el parámetro es fundamental al emplearlo en los programas de diseño como capa de apoyo.

En nuestro caso, el CBR obtenido en estado natural fue de 2.49% y presentando una expansión del 5.62%; al realizar la estabilización con óxido de calcio al 4% el CBR aumentó a 67.5% y el porcentaje de expansión disminuyó al 0.71%.

**Tabla 4.4 Resultados obtenidos del porcentaje de expansión.**

Muestra	CBR (%)	Expansión promedio (%)
CBR – natural	2.49	5.62
CBR-óxido de calcio	67.5	0.71

Los altos niveles de pH favorecen a la disolución del sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); generando de esta forma el desarrollo de las reacciones puzolánicas que da como consecuencia una cristalización de las partículas de suelo y por ende favorece a las propiedades de carga-deformación; por tal motivo, la propiedad de CBR con cal aumenta en comparación con el CBR en estado natural y las deformaciones tienden a disminuir.

#### 4.4 CURVAS DE COMPACTACIÓN AASHTO

Las pruebas de compactación han sido muy empleadas en los estudios de materiales de terracerías, ya que nos proporcionan parámetros fundamentales durante el control de la obra de las estructuras de los pavimentos, plataformas industriales y de viviendas. A partir de estas pruebas, se obtienen los grados de compactación de los suelos.

Para determinar el CBR final de los especímenes compactados, fue necesario conocer el valor de peso volumétrico seco máximo ( $\gamma_d$ ) y la humedad óptima del material en estado natural y con la adición de óxido de calcio; este resultado también fue necesario para poder compactar los especímenes para su ensaye a compresión simple llevándolos a una densificación del 95%.

En la figura 4.2 se observa que la curva de compactación AASHTO estándar del material estabilizado con óxido de calcio, la aplicación de cal en el suelo le provoca que la curva se desplace hacia abajo y a la derecha. También se puede observar que la cal origina una menor sensibilidad a la compactación a la humedad que se proporciona.

La reducción de la densidad que se obtiene es menor en los suelos tratados que en los originales y el consumo de agua es mayor, esto se manifiesta en un aplanamiento de la curva que se convierte en otra más abierta.

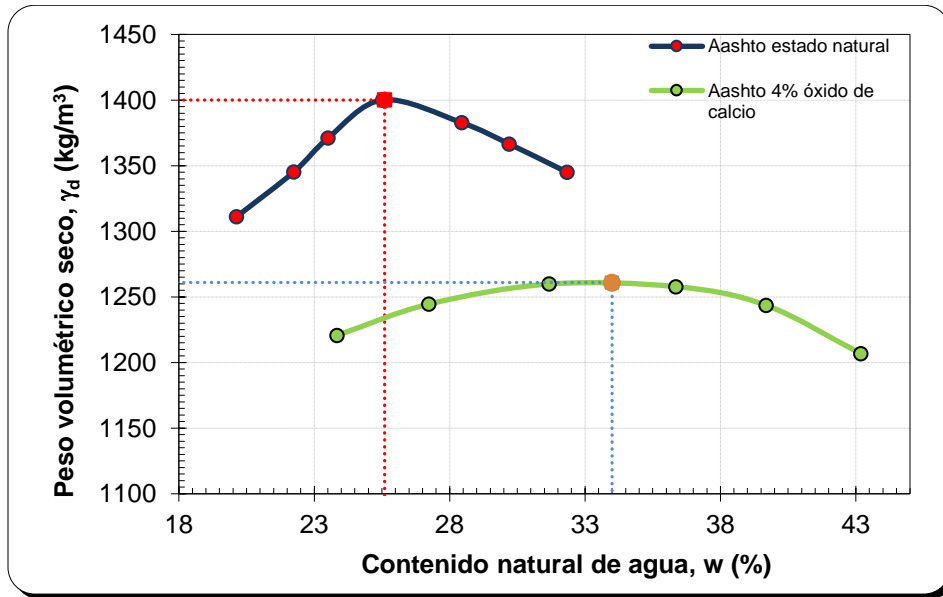


Figura 4.2 Curvas AASHTO Estándar.

Tabla 4.5 Comparativa de la masa seca máxima y humedad óptima.

	Peso Vol. Seco Max. γ <sub>d</sub> kg/m <sup>3</sup>	Wopt w %
ESTADO NATURAL	1400	26
CON ÓXIDO DE CALCIO	1261	34

En este caso la energía de compactación empleada fue de 593 kN-m/m<sup>3</sup> el cual se calculó mediante la siguiente expresión:

$$E = \frac{N * n * W * h}{V}$$

Donde:

- E.- Energía de compactación.
- N.- Numero de golpes por capa.
- n.- Numero de capas.
- W.- Peso del martillo.
- h.- altura de caída del martillo.
- V.- Volumen del molde.

#### 4.5 ENSAYES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Al igual que el CBR, un dato fundamental que se emplea en los programas de diseños de pavimentos para la obtención de los espesores de capas es el uso de la **resistencia a compresión simple no confinada**, ya que con este parámetro se puede estimar con mayor aproximación los módulos resilientes de los materiales.

Como se mencionó en el capítulo 3, se realizaron remoldeos de probetas dentro de un molde cilíndrico de 10 cm (4 in) de diámetro por 20 cm (8 in) de altura con una extensión (collarín) para poder enrasar el material al final de la compactación.

En base y en apego a la normativa AAHTO PP-2019 vigente a esta fecha de investigación, la normativa señala el procedimiento de cálculo para determinar el esfuerzo a compresión simple ( $\sigma$ ), el cálculo de la deformación axial ( $\varepsilon_1$ ) y el cálculo del área promedio de la sección transversal ( $A_c$ ); expresiones que se indican a continuación:

$$A_c = \frac{A_o}{1 - \varepsilon_1}$$

Donde:

$A_c$ = área corregida.

$A_o$ = área inicial de la sección transversal.

$\varepsilon_1$ = deformación axial.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L_o} \times 100$$

Donde:

$\varepsilon_1$ = deformación axial.

$\Delta L$ = cambio de longitud del espécimen.

$L_o$ = longitud inicial del espécimen.

$$\sigma = P/A_c$$

Donde:

$\sigma$ = esfuerzo a compresión simple.

P= carga de falla.

$A_c$ = área corregida.

Se buscó una relación para poder ajustar el número de golpes por capa y poder alcanzar el grado de compactación requerido (figura 4.3).

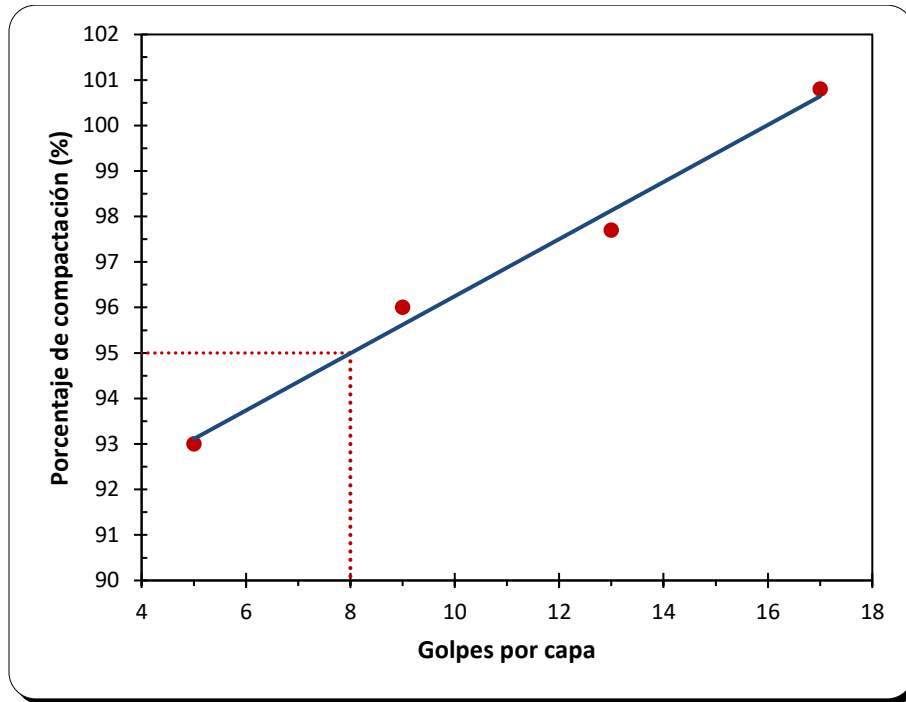


Figura 4.3 Determinación del número de golpes por capa.

Empleando el pisón de 4.5 kg, con 4 capas de material, altura de caída de 45.7 cm y con 8 golpes por cada capa, se compactaron 14 especímenes y se programaron sus ensayos a diferentes días de maduración tal como se indica en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Condiciones de especímenes para ensayos a compresión.**

Condiciones espécimen	Especímenes (N°)	Ensaye (7 días)	Ensaye (14 días)
Natural	4	2	2
Cal CaO	10	5	5
total	14	7	7

De los resultados obtenidos se pudo observar (tabla 4.7) que la resistencia a compresión simple en todas las muestras estabilizadas con óxido de calcio es mayor que los especímenes en estado natural. La resistencia promedio obtenida a 7 días aumento del 2.13 kg/cm<sup>2</sup> en estado natural a 4.2 kg/cm<sup>2</sup> estabilizada con óxido de calcio; mientras que en las muestras ensayadas a 14 días resultó de 3.05 kg/cm<sup>2</sup> en estado natural a 12.36 kg/cm<sup>2</sup> estabilizadas con óxido de calcio.

**Tabla 4.7 Resumen resistencias a compresión.**

ENSAYE N°	RESISTENCIA 7 DÍAS MAD. kg/cm <sup>2</sup>	RESISTENCIA 14 DÍAS MAD. kg/cm <sup>2</sup>	RESISTENCIA PROMEDIO kg/cm <sup>2</sup> (kPa)
E-1	<b>4.11</b>		<b>4.2</b> (414.54)
E-2	<b>3.68</b>		
E-3	<b>4.13</b>	-	
E-4	<b>4.59</b>		
E-5	<b>4.50</b>		
E-11	<b>2.02</b>		<b>2.13</b> (210.23)
E-12	<b>2.23</b>	-	
E-6		<b>12.13</b>	<b>12.36</b> (1219.93)
E-7		<b>12.43</b>	
E-8	-	<b>12.59</b>	
E-9		<b>12.30</b>	
E-10		<b>12.36</b>	
E-13		<b>2.95</b>	<b>3.05</b> (299.11)
E-14	-	<b>3.14</b>	

También podemos observar que en el proceso de maduración se refleja el aumento de resistencia en los especímenes estabilizados con óxido de calcio presentando un aumento de 4.2 kg/cm<sup>2</sup> a 12.36 kg/cm<sup>2</sup> con el paso de los días.

En el proceso de compactación de los especímenes para su ensaye a compresión simple, se trató de cuidar en todo momento las condiciones de humedad, la efectividad de los golpes de compactación, las capas y pesos de capa para no alterar el porcentaje de compactación del 95% con respecto a la masa volumétrica seca máxima del material en estado natural y con óxido de calcio obtenidos en la curva AASHTO estándar.

Tabla 4.8 Resumen % de compactación.

CONDICIÓN DE ENSAYE	ENSAYE N°	$\gamma_d$ máx (kg/m <sup>3</sup> )	COMPACTACIÓN (%)
CON ÓXIDO DE CALCIO (CaO)	E-1	1197	<b>94.91</b>
	E-2	1202	<b>95.34</b>
	E-3	1198	<b>95.00</b>
	E-4	1200	<b>95.10</b>
	E-5	1202	<b>95.30</b>
	E-6	1211	<b>96.00</b>
	E-7	1197	<b>94.90</b>
	E-8	1187	<b>94.10</b>
	E-9	1199	<b>95.10</b>
	E-10	1209	<b>95.90</b>
ESTADO NATURAL	E-11	1324	<b>94.60</b>
	E-12	1319	<b>94.20</b>
	E-13	1309	<b>93.50</b>
	E-14	1306	<b>93.30</b>
$\gamma_d$ máx = 1261 kg/m <sup>3</sup> (12.61 kN/m <sup>3</sup> ) con óxido de calcio			
$\gamma_d$ máx = 1400 kg/m <sup>3</sup> (14.00 kN/m <sup>3</sup> ) en estado natural			
<b>w<sub>opt</sub> = 26% (nat)</b>		<b>w<sub>opt</sub> = 34% CaO</b>	
<b>PROM. COMP. =</b>			<b>94.8%</b>

Podemos indicar que el proceso de estabilización provocará mejoras a corto, mediano y largo plazo, solo de esta forma se permitirá que las reacciones puzolánicas por la hidratación de los aluminatos y los silicatos de calcio aporten a la resistencia a los suelos. Las reacciones puzolánicas dependen del tiempo, ya que están en función de factores como la temperatura, la cantidad de calcio, la alcalinidad y la cantidad de sílice y alúmina presentes en el suelo (Castañeda, 2022).

Finalmente, en las gráficas obtenidas de esfuerzo deformación, observamos que es evidente la diferencia que existe en cuanto al aumento de las resistencias a ensayos a compresión simple de los especímenes estabilizados con el óxido de calcio respecto a los ensayos en estado natural. Así también se observa las deformaciones pequeñas que sufren cada uno de los especímenes estabilizados con la cal.

De la figura 4.4 a los 7 días de ensaye, se observa que las deformaciones fueron muy similares en los especímenes estabilizados con óxido de calcio obteniendo aproximadamente 1.5% de la deformación con respecto a su altura inicial.

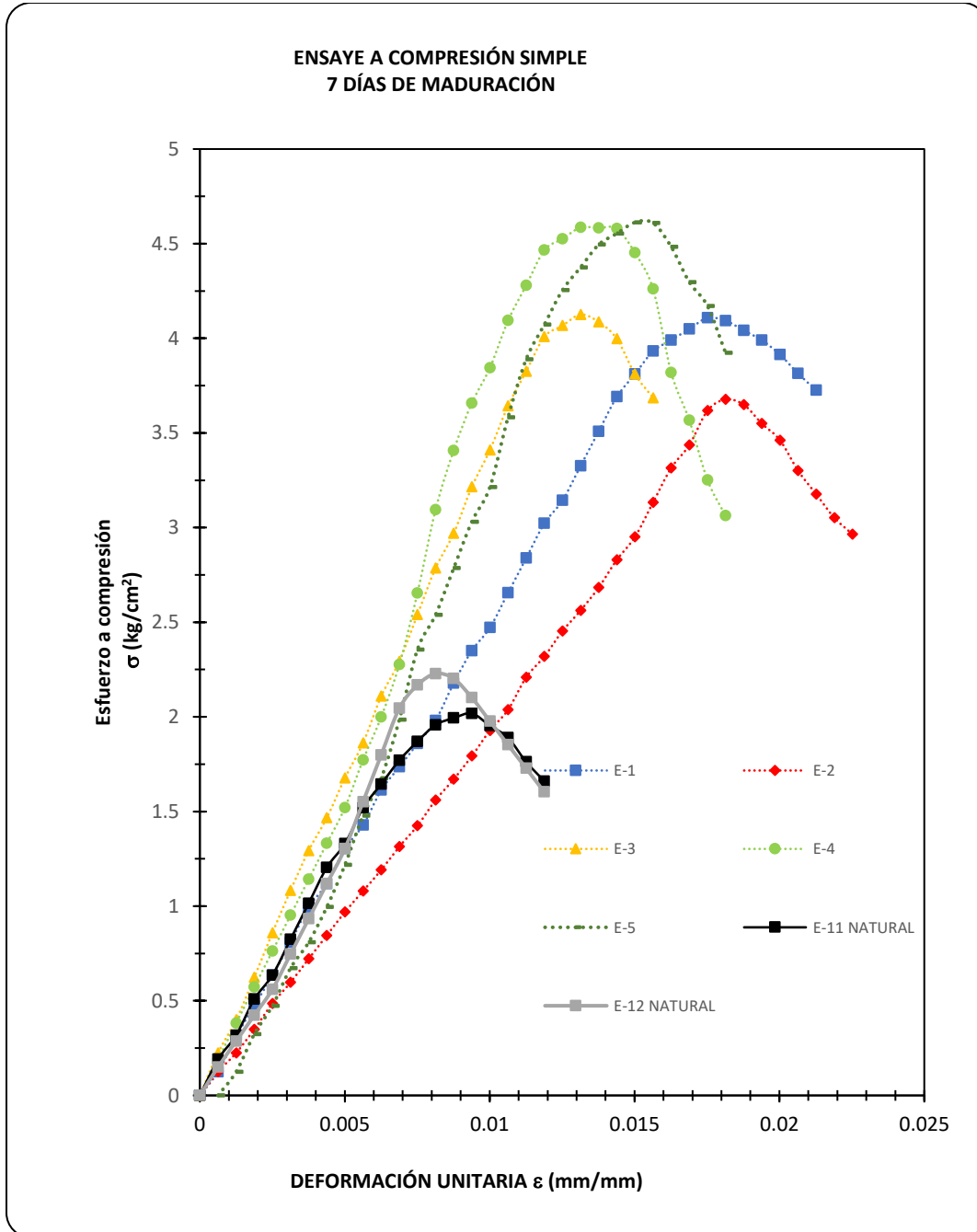
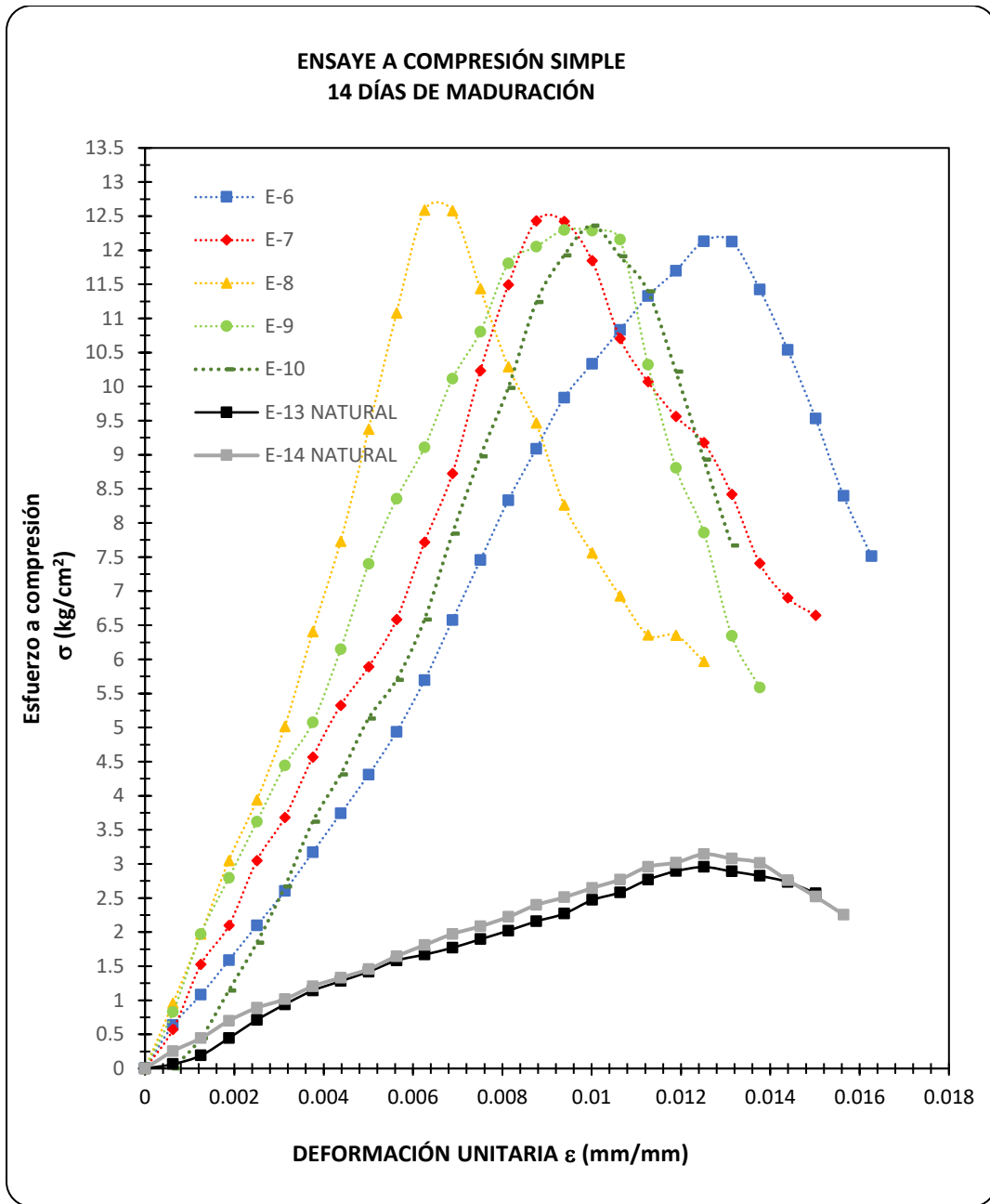


Figura 4.4 Graficas esfuerzo deformación a 7 días de ensaye.



**Figura 4.5 Graficas esfuerzo deformación a 14 días de ensaye.**

De la figura 4.5, los ensayos a 14 días arrojaron deformaciones ligeramente menores en comparación a los de 7 días, los cuales representan el 0.8% aproximadamente con respecto a su altura inicial. Finalmente hay que mencionar que por el tipo de grafica que se obtiene para los ensayos a 7 y 14 días es de tipo frágil.

## 5 CONCLUSIONES

La presencia de material arcilloso expansivos en la localidad de San Francisco Totimehuacan es evidente y se ha clasificado como un material que presenta un potencial de expansión de nivel medio a nivel alto al compararlo con su índice de plasticidad.

El trabajo realizado en esta investigación aporta varios elementos interesantes en la etapa de experimentación, al ser estabilizado, este material, con el óxido de calcio (reacciones químicas) y en sus comportamientos mecánicos y de deformabilidad.

- El uso de una cal de buena calidad es un factor primordial para la obtención de resultados satisfactorios a nivel de laboratorio y durante los procesos de construcción de las carreteras.
- En la prueba de Eades y Grin, se obtuvo que una cantidad del 4% de óxido de calcio, respecto al volumen, es la óptima para poder estabilizar el material arcilloso de la zona de San francisco Totimehuacan.
- A nivel químico, se comprueba que el fenómeno de intercambio catiónico provoca un ambiente impermeable en el material arcilloso, ya que, el contenido de humedad disminuirá según la mineralogía del material (Figura 5.1). Al entrar en contacto el calcio (Ca) con las partículas del suelo (Figura 5.2), este tenderá a perder minerales de magnesio (Mg), potasio (k) y de sodio (Na), que son los minerales que tienen la capacidad de retener agua.

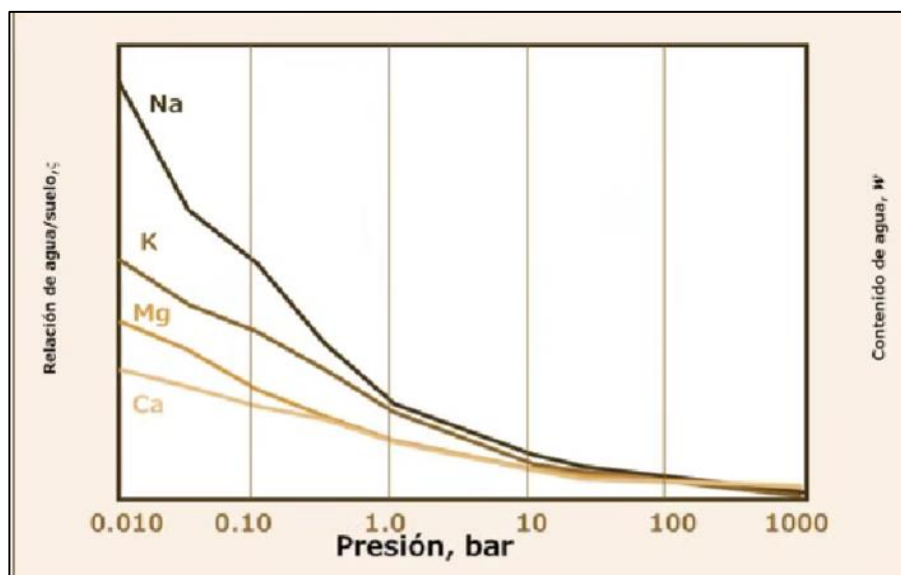
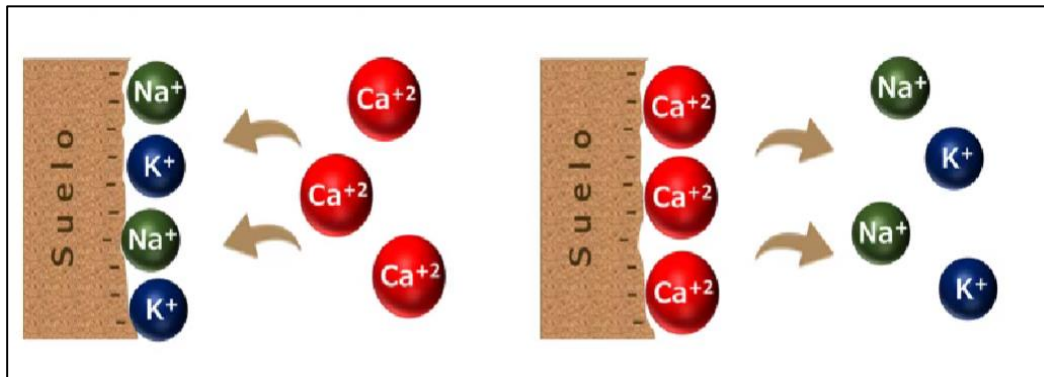


Figura 5.1 Retención de agua de los minerales (Tessier, 1990).



**Figura 5.2 Intercambio catiónico de los suelos.**

- Con el 4% de óxido de calcio, el material arcilloso expansivo de San Francisco Totimehuacan, logra mejorar sus propiedades de resistencia a la **compresión simple** y del **CBR** debido al fenómeno de cristalización, que es ocasionado por la producción de silicatos y aluminatos que favorecen al endurecimiento de las partículas de arcilla. Así también, se reducen los problemas de **plasticidad, expansión y deformabilidad** al volverlos más estables.
- El mejoramiento de los suelos a nivel químico con el uso del óxido de calcio da paso a un mejoramiento físico de larga duración; esto se pudo observar en los ensayos de 7 días de maduración a compresión simple, al aumentar su resistencia de estado natural de 2.13 kg/cm<sup>2</sup> a 4.2 kg/cm<sup>2</sup> con óxido de calcio, lo cual representa casi el doble del aumento de su resistencia. Al transcurrir los 14 días de maduración, la resistencia aumenta a casi seis veces de valor original, pasa de 2.13 kg/cm<sup>2</sup> en estado natural a 12.36 kg/cm<sup>2</sup> con la adición de cal.
- Se han definido procedimientos de curado acelerado bajo temperaturas altas (40°C) que permiten proyectar las resistencias previsibles a largo plazo de los tratamientos.
- Conociendo el porcentaje de contenido óptimo de cal, podemos estimar sin ningún problema, la cantidad de cal empleada por metro cuadrado (m<sup>2</sup>) para poder emplearlo en alguna obra carretera.

$$\text{Cantidad de cal} = \gamma_m \times \text{espesor} \times \% \text{ de cal.}$$

- Se pone en evidencia que las mejoras conseguidas con la cal, se optimizan cuando los tratamientos se realizan aplicando las densidades máximas y humedades óptimas de los ensayos de compactación.

**Líneas de investigación:**

- A nivel de laboratorio, se puede analizar el comportamiento dinámico de suelos expansivos con ensayos de tipo triaxial cíclico para medir de manera más exacta sus módulos de resiliencia de los suelos estabilizados con óxido de calcio.
- Una etapa de investigación en campo es el uso del Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD- *Low Weight Deflectometer*) para poder determinar los módulos de rigidez de una capa o multicapas de los pavimentos, lo que permitiría observar la ganancia progresiva que proporciona el desarrollo de las reacciones puzolánicas.
- El abatimiento de la presión de expansión mediante el uso del óxido de calcio en este tipo de arcilla expansiva, puede ser un dato muy interesante en lo referente al mejoramiento de suelos compactados y estabilizados con cal, ya que nos permitirá conocer y analizar su capacidad de carga de estos materiales arcillosos.

---

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Castelló, J. D. (2015). *El tratamiento de suelos arcillosos con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Garay, F. J. (2022). *Estabilización de suelos con cal*. México: Trillas.
- Gerardo Azomosa Ponce, A. V. (1998). Zonificación Goetécnica Para el Área Urbana del Valle de Puebla. *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*.
- López, I. J. (Mayo 2017). *Mejoramiento de suelos de NAICM usando Óxido de Calcio*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Materials, A. S. (2010). *ASTM D4318-10 Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad*.
- Materials, A. S. (2012). *ASTM D698-12 Determinación de las características de compactación de un suelo. Prueba Proctor Estandar*.
- Materials, A. S. (2014). *ASTM C136-14 Método de prueba estándar para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos*.
- Materials, A. S. (2014). *ASTM D854-14 Determinación de la gravedad específica del suelo*.
- Materials, A. S. (2016). *ASTM D1883-16 Método estándar para la determinación del CBR de suelos compactados en laboratorio*.
- Materials, A. S. (2016). *ASTM D2166-16 Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión no confiada de suelos cohesivos*.
- Materials, A. S. (2019). *Materials, A. S. (2019). ASTM D6276-19 Estimación del pH para la determinación del porcentaje de cal para la estabilización de suelos*. .
- Natalia Pérez García, A. P. (Publicación Técnica No. 560, Sanfandila, Qro, 2019). Evaluación del óxido de calcio (estabilical) como estabilizador de suelos. *Instituto Mexicano del Transporte*, 81.
- Natalia Pérez García, P. G. (Publicación Técnica No. 638 Sanfandila, Qro. 2021). Evaluación de las propiedades de suelos estabilizados con óxido de calcio. El caso de suelos de la Ciudad de México. *Intituto Mexicano del Transporte*, 84.
- Oswaldo Flores Castrellón, A. H. (2012). Caracterización de la arcilla expansiva de San Francisco Totimehuacan.
- Zepeda Garrido, J. A. (2004). *Mecánica de Suelos no Saturados*. México D.F.: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.

ANEXOS

ANEXO A PRUEBAS A MATERIAL EN ESTADO NATURAL

LÍMITE LÍQUIDO

COPA DE CASAGRANDE

Ensaye No.	Número de golpes	Peso de tara+ suelo húmedo	Peso de tara + suelo seco	Peso del agua	Peso de la tara	Peso del suelo seco	Contenido de agua
		g	g	g	g	g	%
1	34	35.730	33.070	2.660	28.370	4.700	56.60
2	30	64.750	61.850	2.900	56.780	5.070	57.20
3	23	64.530	61.660	2.870	56.750	4.910	58.45
4	21	64.110	61.660	2.450	57.560	4.100	59.76

$w_L = 58 \%$   
 $w_P = 27 \%$   
 $PI = 32 \%$   
 $w = 23 \%$

LÍMITE PLÁSTICO

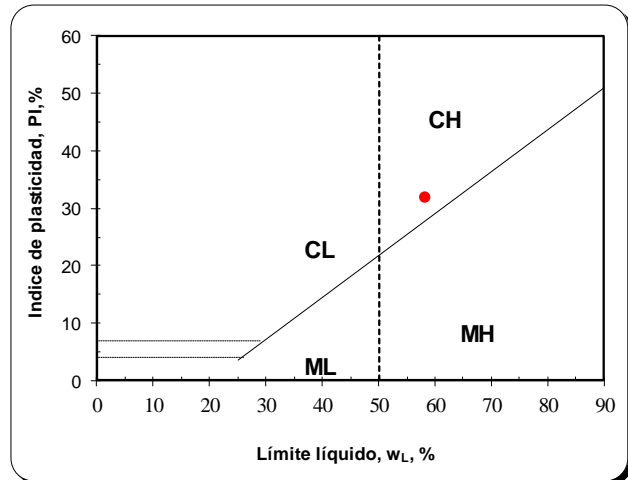
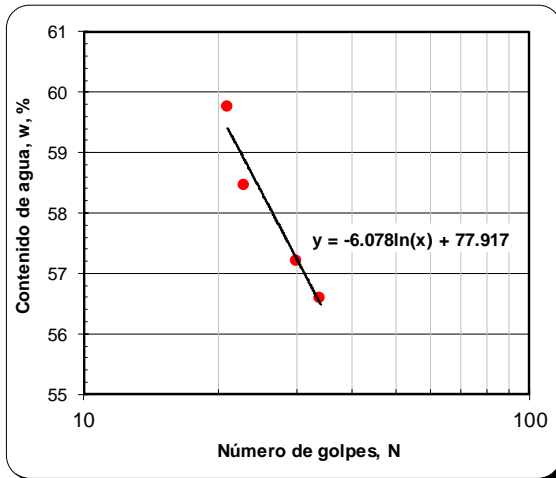
No.	Tara No.	Peso de tara+ suelo húmedo	Peso de tara + suelo seco	Peso del agua	Peso de la tara	Peso del suelo seco	Contenido de agua
		g	g	g	g	g	%
1	6	104.830	104.530	0.300	103.400	1.130	26.55

CONTENIDO NATURAL DE AGUA

Ensaye No.	Tara No.	Peso de tara+ suelo húmedo	Peso de tara + suelo seco	Peso del agua	Peso de la tara	Peso del suelo seco	Contenido de agua
		g	g	g	g	g	%
1	1	2417.100	2032.500	384.60	341.800	1690.70	22.75

CLASIFICACIÓN SUCS:

CH.- ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD



**GRANULOMETRÍA**

Malla número	Abertura malla <i>mm</i>	Peso retenido <i>gr</i>	Retenido <i>%</i>	Pasa <i>%</i>
3"	76.200	0.00	0.00	100.00
2"	50.800	0.00	0.00	100.00
1"	25.400	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.100	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.520	0.00	0.00	100.00
1/4"	6.350	0.00	0.00	100.00
4	4.750	0.00	0.00	100.00
PASA 4		1690.70		
SUMA=		1690.70		
10	2.000	0.66	0.66	99.34
20	0.840	0.92	0.92	98.42
40	0.420	6.24	6.24	92.18
60	0.250	4.65	4.65	87.53
100	0.149	4.40	4.40	83.13
200	0.074	6.14	6.14	76.99
PASA 200		76.99	76.99	0.00
SUMA=		100.00		

**Coefficientes de uniformidad y curvatura**

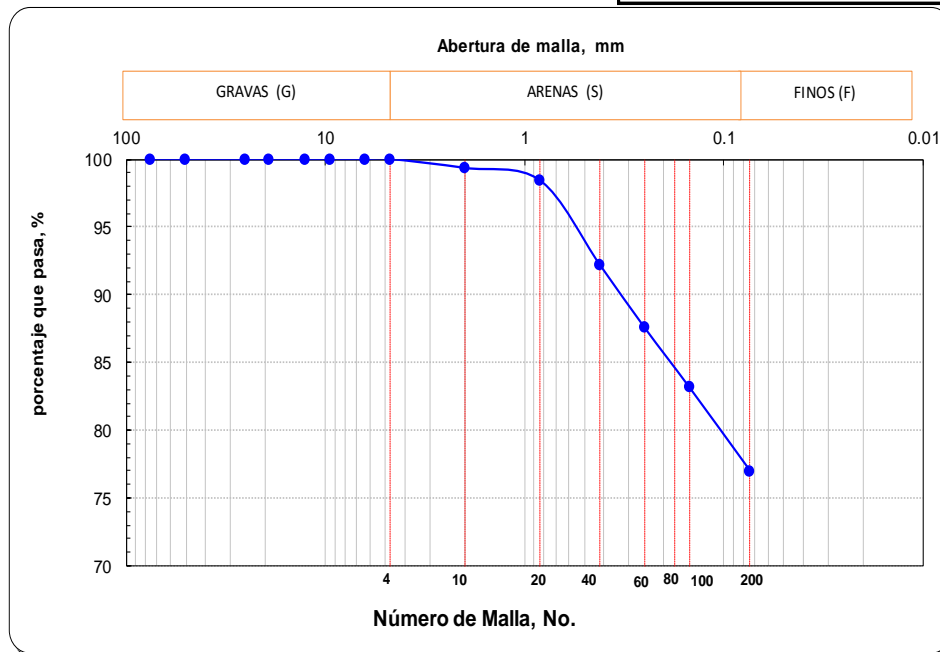
$D_{60} = 0.000$  mm  
 $D_{30} = 0.000$  mm  
 $D_{10} = 0.000$  mm  
 $C_u = \text{NO DETERMINADO}$   
 $C_c = \text{NO DETERMINADO}$

**Porcentajes de material**

$G = 0$  %  
 $S = 23$  %  
 $F = 77$  %

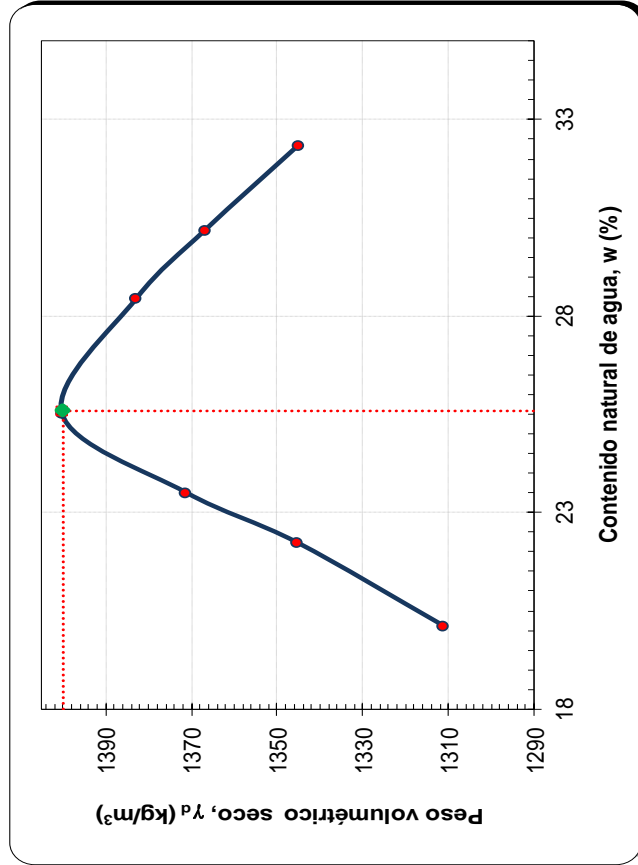
**Propiedades índice**

$w_L = 58$  %  
 $w_P = 27$  %  
 $PI = 32$  %



$W_{\text{molde}} = 2015.9 \text{ g}$   
 $V_{\text{molde}} = 945.38 \text{ cm}^3$

Peso molde + muestra Wcm kg	Peso muestra húmeda Wm kg	Muestra tomada del corazón para la determinación del contenido de agua							Peso muestra seca Ws kg	Peso vol. seco $\gamma_d$ kg/m <sup>3</sup>
		Tara No.	Peso de la tara Wt g	Peso tara + muestra húmeda Wtm g	Peso tara + muestra seca Wts g	Peso del agua Ww g	Peso muestra seca Ws g	Contenido de agua w %		
3504.90	1489.00	1	123.30	197.30	184.90	12.40	61.60	20.13	1239.49	1311.10
3570.50	1554.60	2	135.50	198.70	187.20	11.50	51.70	22.24	1271.72	1345.19
3616.90	1601.00	3	125.50	171.20	162.50	8.70	37.00	23.51	1296.21	1371.10
3677.60	1661.70	4	124.20	176.80	166.10	10.70	41.90	25.54	1323.67	1400.15
3695.00	1679.10	5	122.80	182.40	169.20	13.20	46.40	28.45	1307.22	1382.74
3698.00	1682.10	6	123.60	176.20	164.00	12.20	40.40	30.20	1291.96	1366.59
3698.60	1682.70	7	122.50	197.80	179.40	18.40	56.90	32.34	1271.52	1344.98

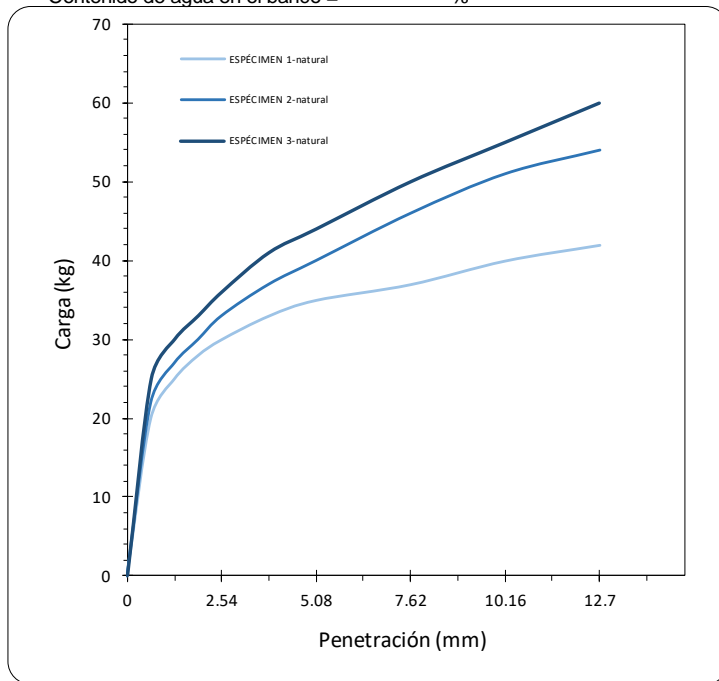


Peso Vol. Seco Max. $\gamma_d$ kg/m <sup>3</sup>	Wopt w %
1400	26

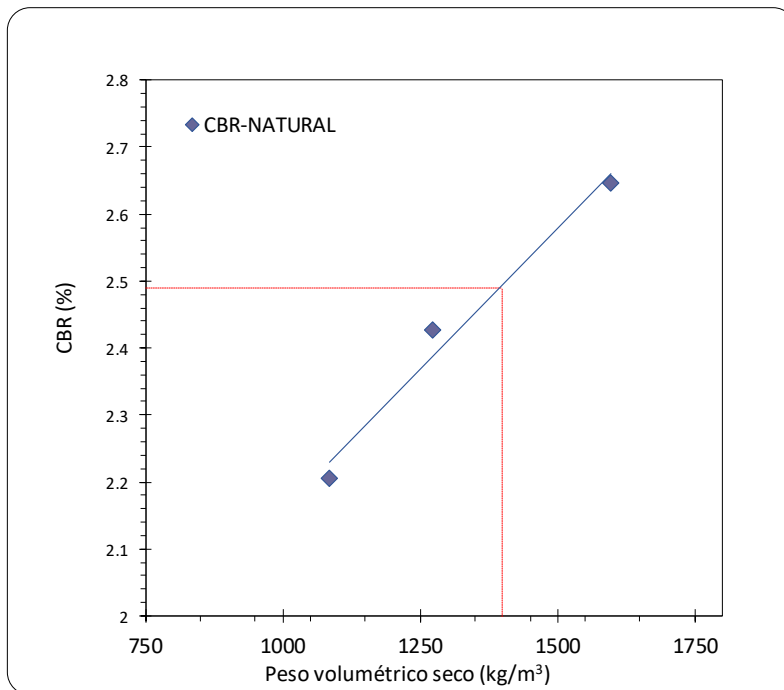
Peso volumetrico seco máximo (gmax)= 1400.0 kg/m<sup>3</sup>

Contenido de agua de comp = 26 %

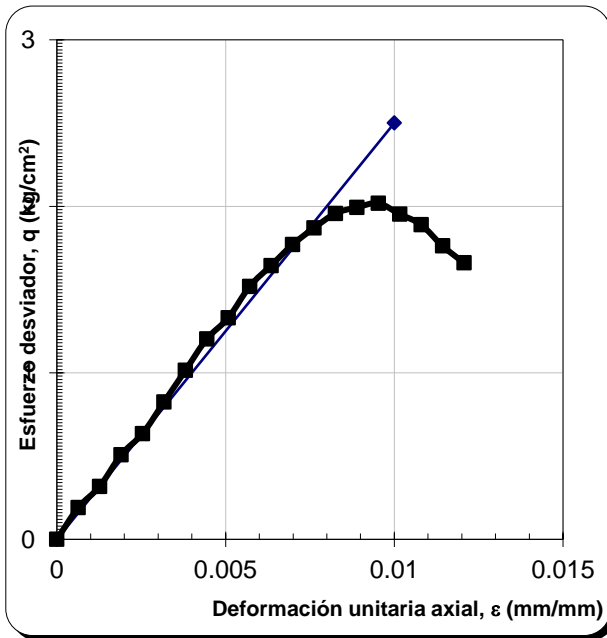
Contenido de agua en el banco = - %



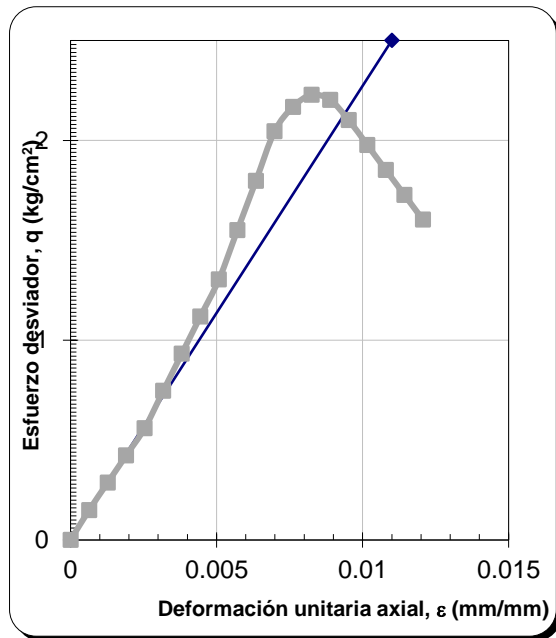
CBR			
MOLDE	1	2	3
φ molde (cm)	15.2	15.2	15.2
Altura molde Hm (cm)	17.8	17.9	17.9
Area molde (cm <sup>2</sup> )	181.5	181.5	181.5
Peso molde Wm (g)	7300	7185	7374
Disco espaciador	1	2	3
Altura disco espaciador	6.3	6.3	6.3
Pes. Mold + esp. Comp. (g)	10089	10212	10780
Pes. Mold + esp. Comp. Sat (g)	11050	11426	12540
Capsula	1	2	3
Peso cap (g)	334	359.9	364.6
P. cap+suelo hum. (g)	501.6	553.8	528.6
P. cap+suelo seco. (g)	435.2	482.5	471.4
Cont. hum.sat. W(%)	65.61	58.16	53.56
Peso.vol.seco γd (kg/m <sup>3</sup> )	1085	1274	1598
Cont. de agua de comp (%)	26	26	26
Lectura inicial de exp. (cm)	7.352	7.862	7.723
Lectura final de exp. (cm)	6.617	7.25	7.12
Diferencia D (cm)	0.735	0.612	0.603
Expansión (%)	6.391	5.276	5.198
Exp.Prom. (%)	5.62		
Penetración (mm)	Cargas de Penetración (kg)		
0.64	20	22	25
1.27	25	27	30
1.91	28	30	33
2.54	30	33	36
3.81	33	37	41
5.08	35	40	44
7.62	37	46	50
10.16	40	51	55
12.7	42	54	60
C <sub>2.54</sub>	30	33	36
CBR <sub>2.54</sub> (%)	2.206	2.426	2.647
C <sub>5.08</sub>	35	40	44
CBR <sub>5.08</sub> (%)	1.715	1.96	2.156
CBR (%)	2.49		



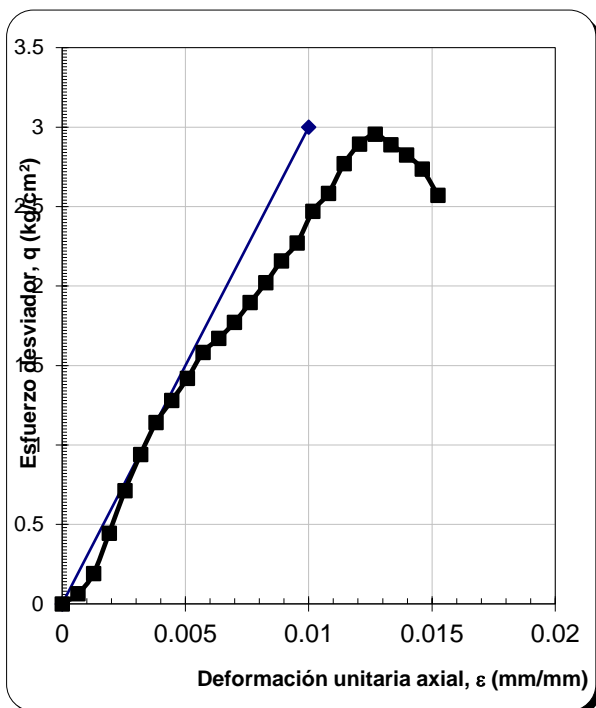
:SENOICAVRESBO



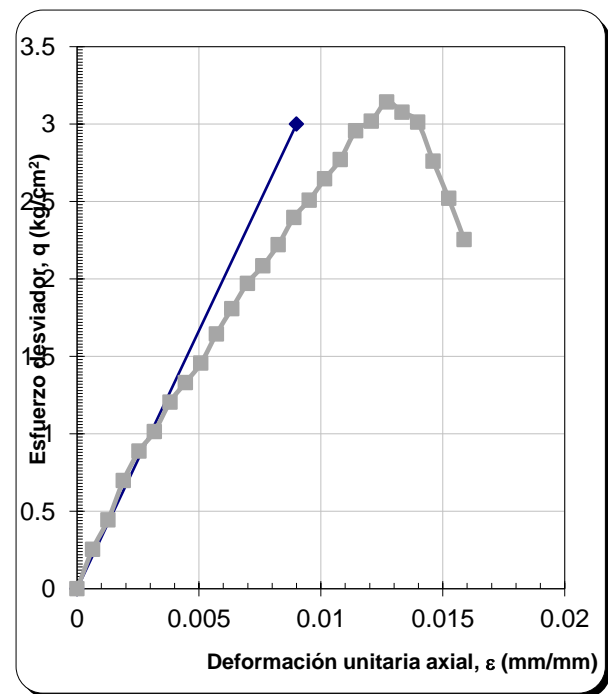
E-11 MADURACIÓN 7 DÍAS



E-12 MADURACIÓN 7 DÍAS



E-13 MADURACIÓN 14 DÍAS



E-14 MADURACIÓN 14 DÍAS

**ANEXO B PRUEBAS A MATERIAL CON ÓXIDO DE CALCIO**

**LÍMITE LÍQUIDO COPA DE CASAGRANDE**

Ensaye No.	Número de golpes	Peso de tara+ suelo húmedo	Peso de tara + suelo seco	Peso del agua	Peso de la tara	Peso del suelo seco	Contenido de agua
		g	g	g	g	g	%
1	28	115.480	111.420	4.060	103.170	8.250	49.21
2	26	115.640	110.780	4.860	101.110	9.670	50.26
3	17	115.690	110.280	5.410	100.010	10.270	52.68
4	12	117.490	112.470	5.020	103.230	9.240	54.33

$w_L = 50.21 \%$   
 $w_p = 38.92 \%$   
 $PI = 11.30 \%$   
 $w = 22.75 \%$

**LÍMITE PLÁSTICO**

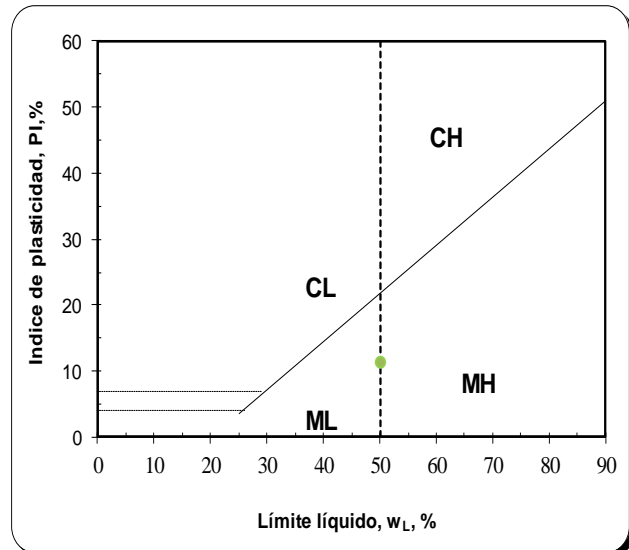
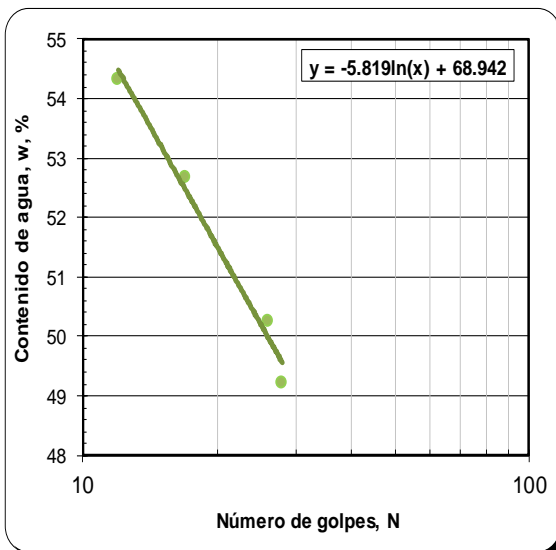
No.	Tara No.	Peso de tara+ suelo húmedo	Peso de tara + suelo seco	Peso del agua	Peso de la tara	Peso del suelo seco	Contenido de agua
		g	g	g	g	g	%
1	6	102.830	102.040	0.790	100.010	2.030	38.92

**CONTENIDO NATURAL DE AGUA**

Ensaye No.	Tara No.	Peso de tara+ suelo húmedo	Peso de tara + suelo seco	Peso del agua	Peso de la tara	Peso del suelo seco	Contenido de agua
		g	g	g	g	g	%
1	1	2417.100	2032.500	384.60	341.800	1690.70	22.75

**CLASIFICACIÓN SUCS:**

**SM.- ARENA LIMOSA**



## GRANULOMETRÍA

Malla número	Abertura malla <i>mm</i>	Peso retenido <i>gr</i>	Retenido %	Pasa %
3"	76.200	0.00	0.00	100.00
2"	50.800	0.00	0.00	100.00
1"	25.400	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.100	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.520	0.00	0.00	100.00
1/4"	6.350	0.00	0.00	100.00
4	4.750	0.00	0.00	100.00
PASA 4		1690.70		
SUMA=		1690.70		
10	2.000	2.59	1.30	98.71
20	0.840	6.38	3.19	95.52
40	0.420	43.21	21.61	73.91
60	0.250	35.45	17.73	56.19
100	0.149	23.57	11.79	44.40
200	0.074	20.15	10.08	34.33
PASA 200		68.65	34.33	0.00
SUMA=		200.00		

## Coeficientes de uniformidad y curvatura

$$D_{60} = \underline{\underline{0.000}} \text{ mm}$$

$$D_{30} = \underline{\underline{0.000}} \text{ mm}$$

$$D_{10} = \underline{\underline{0.000}} \text{ mm}$$

$$C_u = \underline{\underline{\text{NO DETERMINADO}}}$$

$$C_c = \underline{\underline{\text{NO DETERMINADO}}}$$

## Porcentajes de material

$$G = \underline{\underline{0.0}} \%$$

$$S = \underline{\underline{65.7}} \%$$

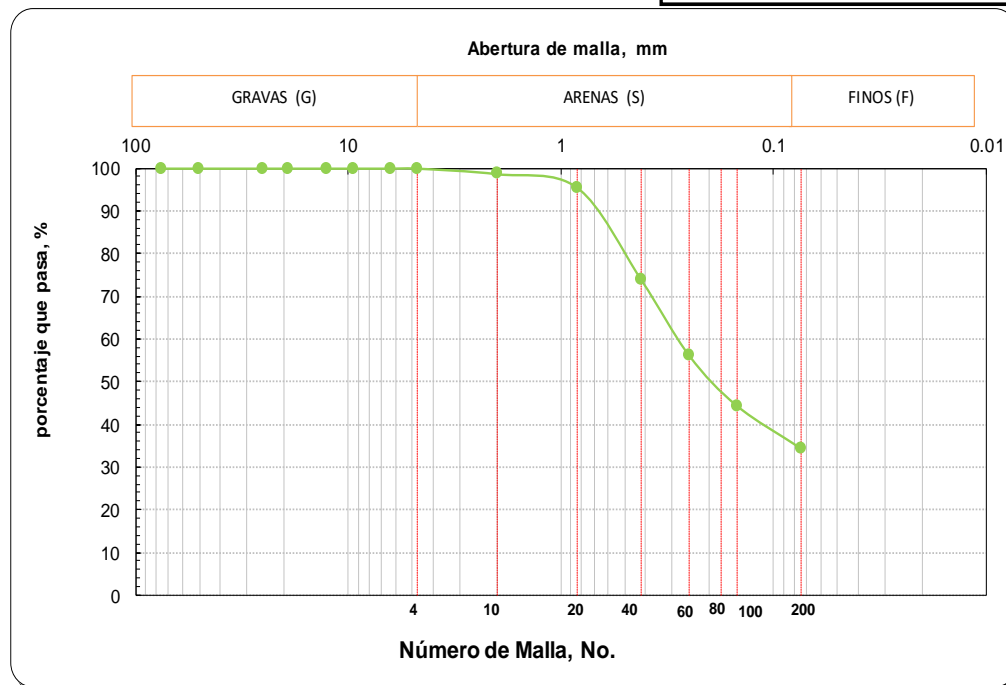
$$F = \underline{\underline{34.3}} \%$$

## Propiedades índice

$$w_L = \underline{\underline{50.2}} \%$$

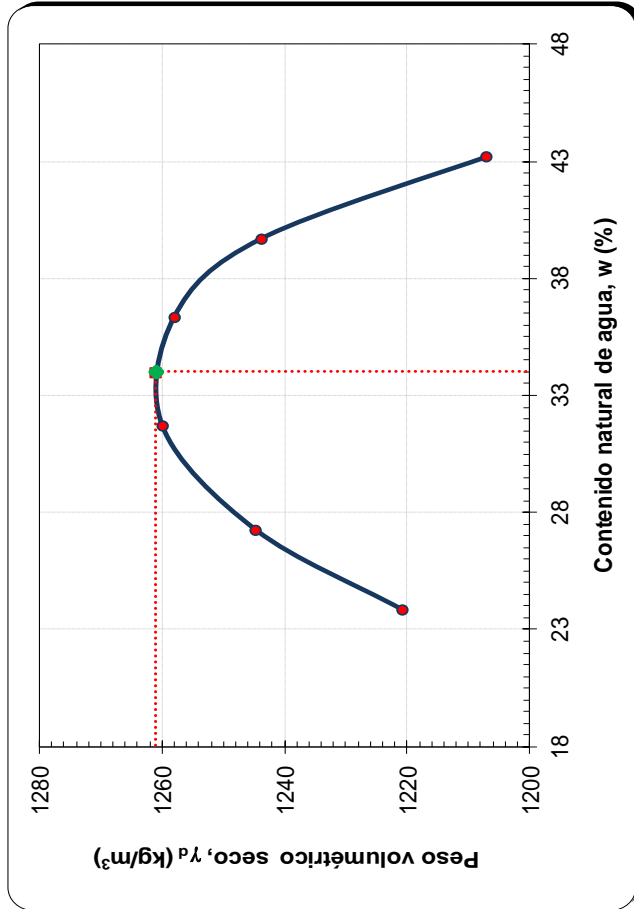
$$w_P = \underline{\underline{38.9}} \%$$

$$PI = \underline{\underline{11.3}} \%$$



$W_{\text{molde}} = 1830.2 \text{ g}$   
 $V_{\text{molde}} = 932.58 \text{ cm}^3$

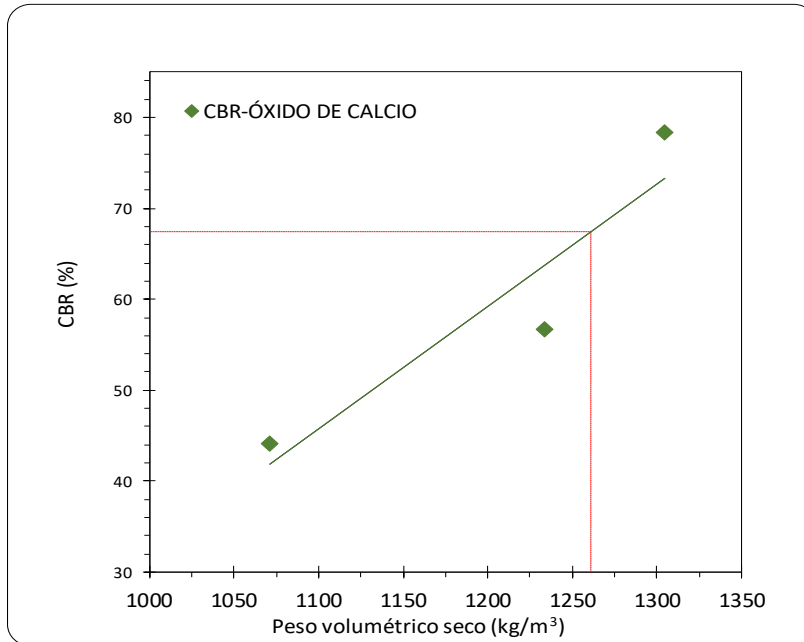
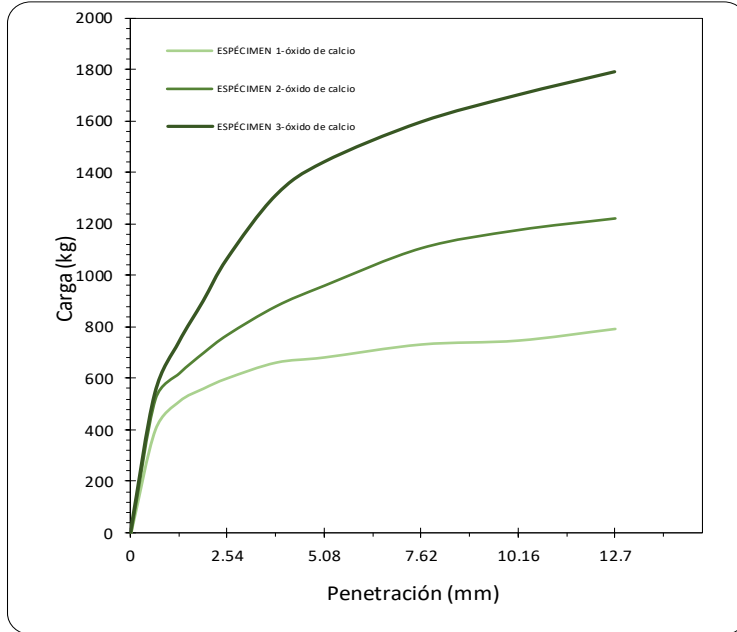
Peso molde + muestra $W_{cm}$ kg	Peso muestra húmeda $W_m$ kg	Muestra tomada del corazón para la determinación del contenido de agua						Peso muestra seca $W_s$ kg	Peso vol. seco $\gamma_d$ $\text{kg/m}^3$
		Tara No.	Peso de la tara $W_t$ g	Peso tara + muestra húmeda $W_{tm}$ g	Peso tara + muestra seca $W_{ts}$ g	Peso del agua $W_w$ g	Peso muestra seca $W_s$ g		
3240.00	1409.80	1	342.60	529.60	493.60	36.00	151.00	23.84	1220.69
3307.00	1476.80	2	347.80	488.40	458.30	30.10	110.50	27.24	1244.55
3377.30	1547.10	3	354.70	538.00	493.90	44.10	139.20	31.68	1259.82
3429.80	1599.60	4	283.50	405.00	372.60	32.40	89.10	36.36	1257.84
3450.30	1620.10	5	351.00	539.30	485.80	53.50	134.80	39.69	1243.64
3441.70	1611.50	6	519.70	700.40	645.90	54.50	126.20	43.19	1206.83



Peso Vol. Seco Max. $\gamma_d$ $\text{kg/m}^3$	Wopt w %
1261	34

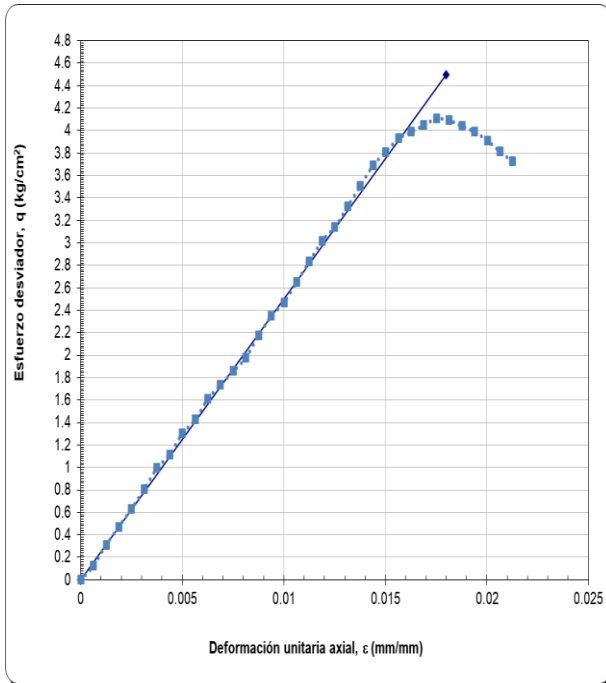
Peso volumetrico seco máximo (gmax)= 1261.0 kg/m<sup>3</sup>  
 Contenido de agua en el banco = - %

Contenido de agua de comp = 34 %

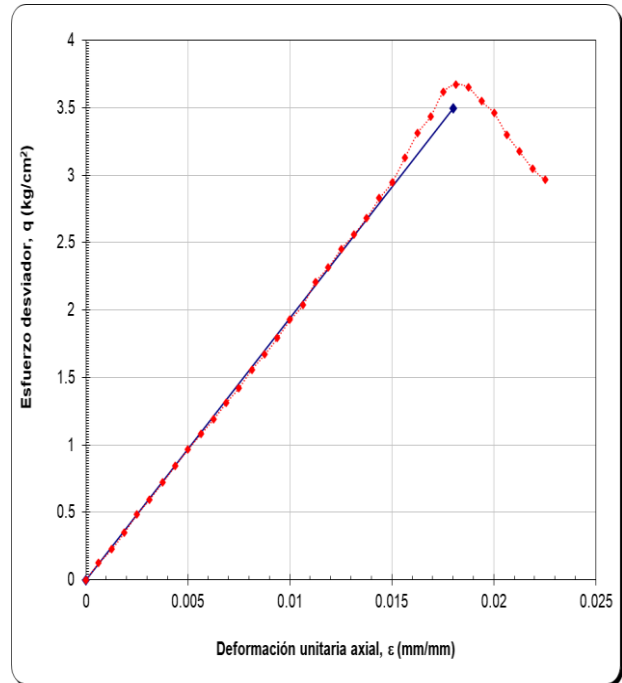


:SENOICAVRESBO

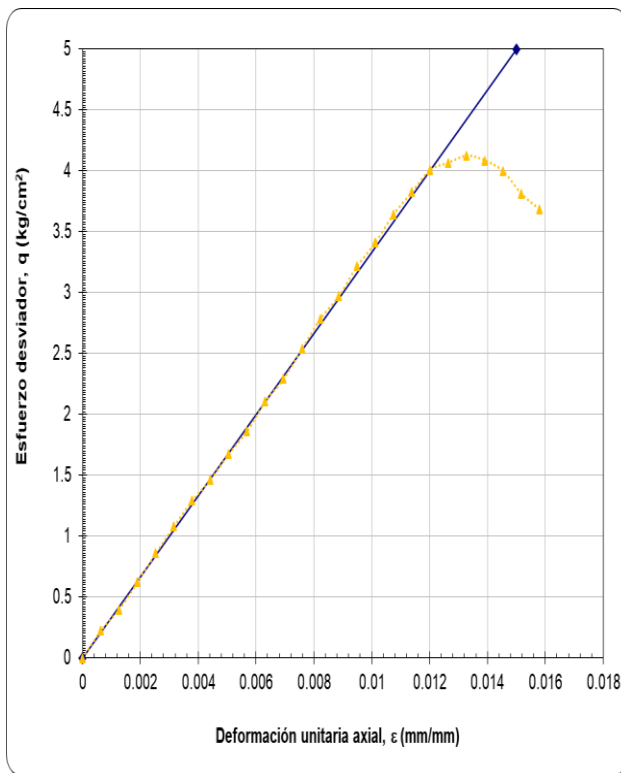
CBR			
MOLDE	1	2	3
φ molde (cm)	15.2	15.2	15.2
Altura molde Hm (cm)	17.8	17.8	17.8
Area molde (cm <sup>2</sup> )	181.5	181.5	181.5
Peso molde Wm (g)	6833	7389	7243
Disco espaciador	1	2	3
Altura disco espaciador	6.3	6.3	6.3
Pes. Mold + esp. Comp. (g)	9842	10784	10853
Pes. Mold + esp. Comp. Sat (g)	10250	11050	10980
Capsula	1	2	3
Peso cap (g)	350.8	283.4	354.3
P. cap+suelo hum. (g)	563.6	483.9	520
P. cap+suelo seco. (g)	490	424.4	475
Cont. hum.sat. W(%)	52.87	42.2	37.28
Peso.vol.seco γd (kg/m <sup>3</sup> )	1071	1234	1304
Cont. de agua de comp (%)	34	34	34
Lectura inicial de exp. (cm)	7.98	8.57	7.704
Lectura final de exp. (cm)	7.86	8.46	7.69
Diferencia D (cm)	0.12	0.11	0.014
Expansión (%)	1.043	0.957	0.122
Exp.Prom. (%)	0.71		
Penetración (mm)	Cargas de Penetración (kg)		
0.64	400	520	540
1.27	510	620	740
1.91	560	700	900
2.54	600	770	1065
3.81	660	880	1310
5.08	680	960	1440
7.62	730	1105	1595
10.16	745	1175	1700
12.7	790	1220	1790
C <sub>2.54</sub>	600	770	1065
CBR <sub>2.54</sub> (%)	44.12	56.62	78.31
C <sub>5.08</sub>	680	960	1440
CBR <sub>5.08</sub> (%)	33.33	47.05	70.57
CBR (%)	67.5		



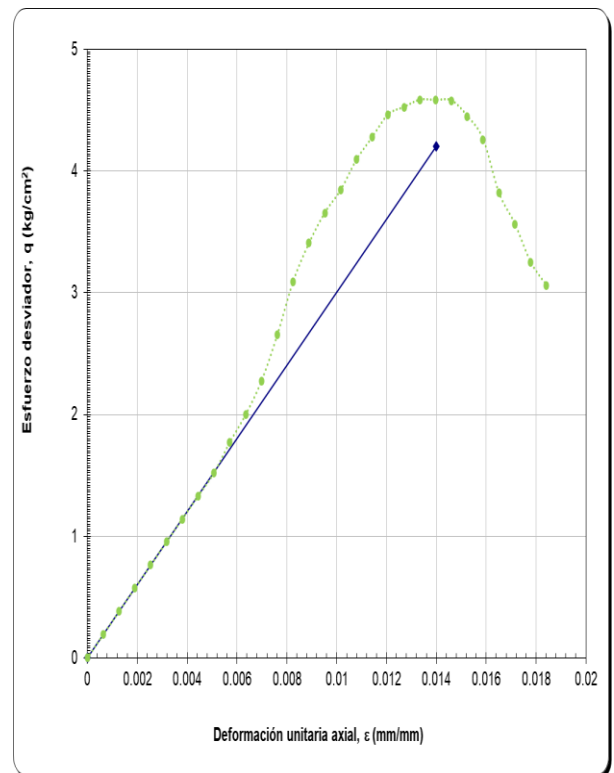
**E-1 MADURACIÓN 7 DÍAS**



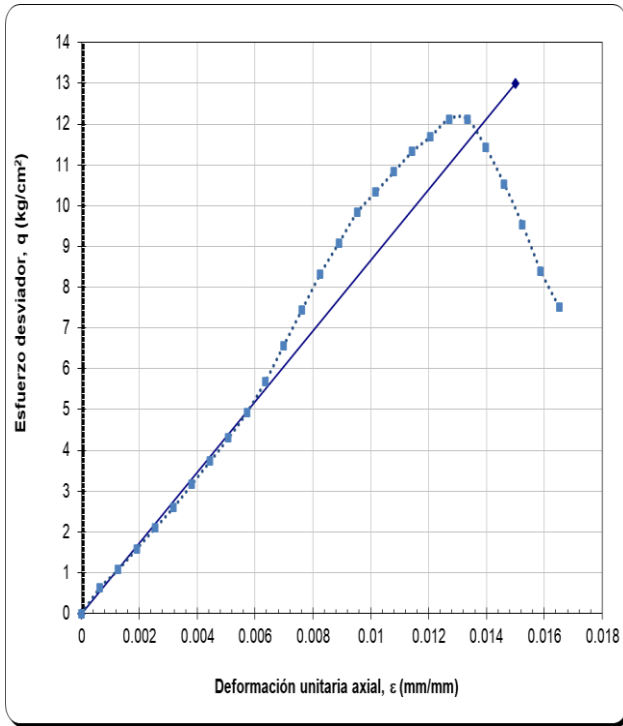
**E-2 MADURACIÓN 7 DÍAS**



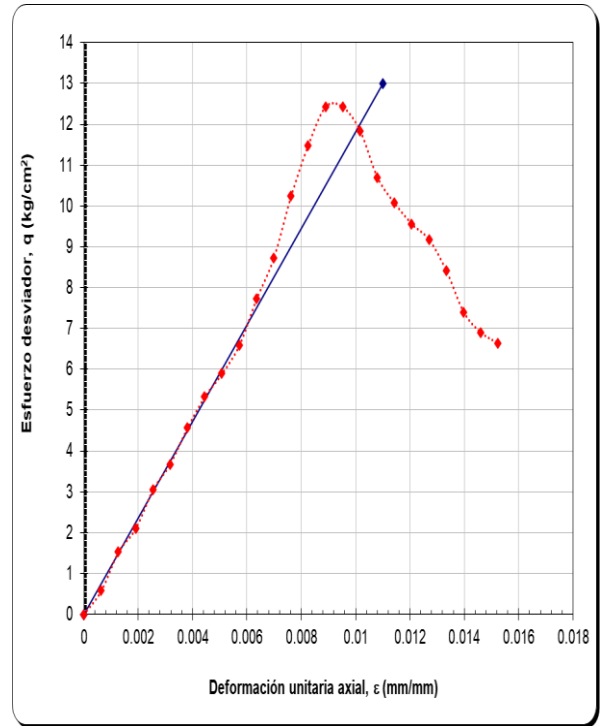
**E-3 MADURACIÓN 7 DÍAS**



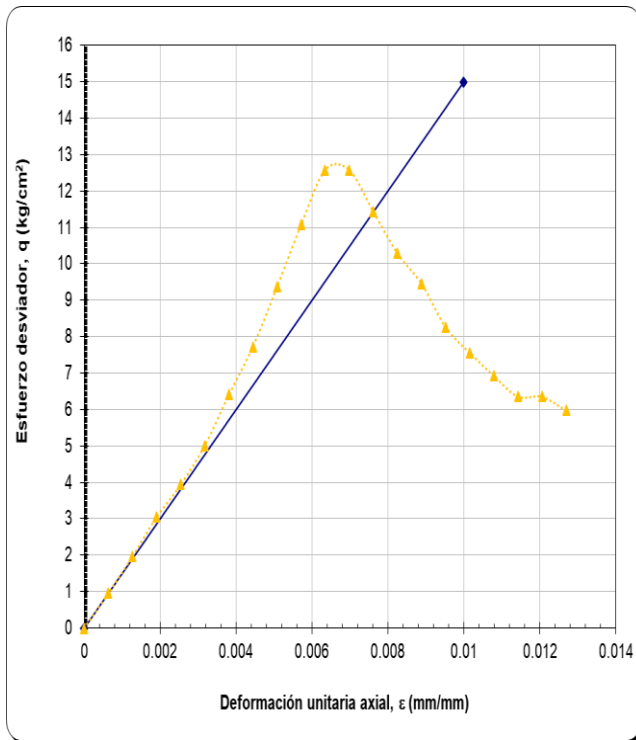
**E-4 MADURACIÓN 7 DÍAS**



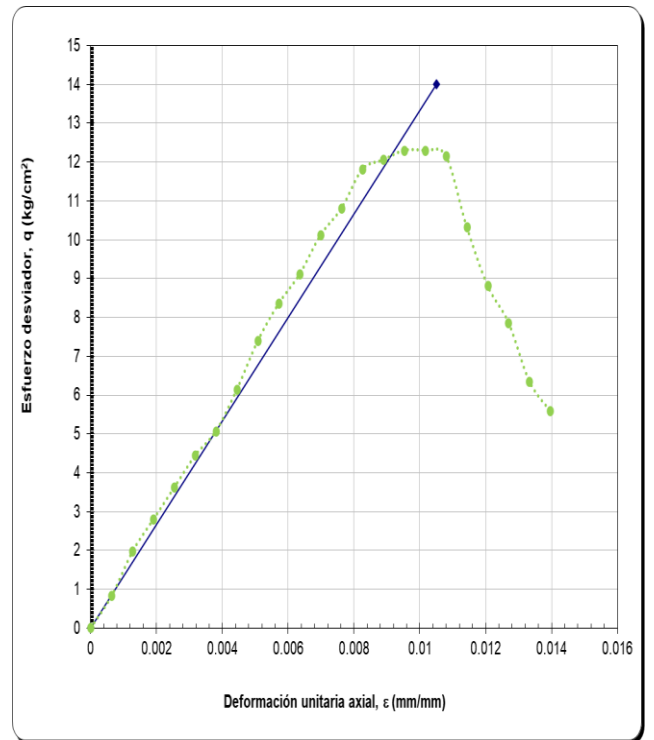
**E-6 MADURACIÓN 14 DÍAS**



**E-7 MADURACIÓN 14 DÍAS**



**E-8 MADURACIÓN 14 DÍAS**



**E-9 MADURACIÓN 14 DÍAS**