



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

MEJORAMIENTO DE SUELO CON CaO DEL NAICM

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. MARCO EDUARDO LÓPEZ VALLADO

DIRECTOR DE TESINA: DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO

MÉXICO, D.F.

MAYO 2017

AGRADECIMIENTOS

“How many roads must a man walk down, before you call him a man...

the answer is blowin' in the wind”

Bob Dylan

Todo es más difícil sin apoyo. Los logros que he tenido en mi vida son con gran esfuerzo y dedicación pero se necesita un gran apoyo de las personas a tu alrededor.

Primero quiero agradecer de corazón a mis padres por todo el apoyo que me han dado en mi vida. A mi papá Nicolás López Jiménez por todo el amor que me ha dado y todo lo que me ha enseñado para ser una buena persona, eres un gran ejemplo a seguir. A mi madre María Dolores Vallado Delgado por su amor, comprensión, apoyo y a ayudarme a ser una gran persona, eres la persona más amorosa que conozco . Los amo demasiado y gracias por todo.

A mis hermanas Anabel y Katia por su apoyo y cariño. Las amo mucho y doy gracias por todo lo que hemos vivido juntos. Todos los momentos con ustedes son especiales.

A mi familia que me ha apoyado y ayudado solo les puedo decir gracias.

A mis amigos de la carrera, hicieron que cada día valiera más la pena, todo el apoyo y ánimo que me daban en esos días era muy especial. A mis amigos de la especialidad por su amistad, su apoyo y ayudarme a ser mejor cada día. A mis amigos de la vida por darme grandes momentos en los cuales estoy feliz de haberlos conocido. Y a todas las personas que he conocido y me han ayudado les doy las gracias.

Por último a la UNAM por ser parte de esta gran institución, es un orgullo ser parte de ella. En especial al Instituto de Ingeniería por la oportunidad que me dio para realizar este trabajo.

Parte 1 Introducción	3
1.1 Objetivos	3
1.2 Alcances	3
1.3 Mejoramiento de suelos	3
1.3.1 Mejoramiento por medios mecánicos	4
1.3.2 Mejoramiento por medios eléctricos (o estabilizantes físicos)	4
1.3.3 Mejoramiento por adición de agentes estabilizantes	4
1.3.3.1 Mezcla con Cemento	4
1.3.3.2 Mezcla con Asfalto	5
1.3.3.3 Mezcla con cal	6
1.3.3.3.1 Transformación de arcillas con cal	7
Parte 2	9
2.1 Antecedentes	9
2.2 CBR	10
2.2.1 Descripción de la prueba	11
2.3 Características del CBR	14
Parte 3 Procedimiento de las Pruebas	16
Parte 4 Resultados	18
4.1 Formulas utilizadas	18
4.2 Calculo de CBR	19
4.3 Formatos	21
4.3.1 Resultados Plataforma-1	22

4.3.2 Resultados Suelo-1-----	24
4.4 Tablas de Concentrado -----	27
4.5 Obtención del valor de CBR -----	28
Parte 5 Conclusiones-----	29
5.1 Recomendaciones -----	31
Bibliografía -----	32
Anexo A Labrado de muestras -----	33
Anexo B Pruebas de CBR -----	37

Parte 1 Introducción

En este trabajo se analizan los resultados de una estabilización de suelo del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) para su uso en caminos de acceso. Esta tesina pretende abordar la resistencia del suelo estabilizado y de acuerdo con las características de los resultados dar una conclusión sobre la viabilidad de usarse.

1.1 Objetivos

- Desarrollar una investigación de un suelo mejorado con CaO
- Comparar la resistencia de una mejoramiento de suelo en condiciones de campo y laboratorio.
- Observar el comportamiento de un suelo mejorado bajo condiciones críticas

1.2 Alcances

Con este trabajo se pretende dar una base para el uso de CaO como elemento químico para el mejoramiento de suelos y con base a los resultados hacer el uso de mejores herramientas para su uso en campo. En el NAICM se estudiaron dos casos para el mismo suelo. El primero es un tramo de prueba y el segundo son pruebas en laboratorio del mismo suelo aunque teniendo más control en el procedimiento de la estabilización.

1.3 Mejoramiento de suelos

El mejoramiento de suelo es un método para cambiar las propiedades de un suelo no competente para un proyecto. Dependiendo del proyecto se optará por un tipo de estabilización aunque no se modifiquen todas las propiedades se pueden lograr buenos resultados. El

mejoramiento de un suelo o estabilización se puede lograr de muchas formas como por medios mecánicos, medios eléctricos o adición de agentes estabilizantes.

Con un mejoramiento solo se pueden modificar ciertas propiedades como: Estabilidad Volumétrica, Resistencia, Permeabilidad, Compresibilidad y Durabilidad.

1.3.1 Mejoramiento por medios mecánicos

Al pensar en mejorar un suelo la primera opción siempre será por un medio mecánico, en lo particular la primera propuesta es mediante una compactación, después la vibroflotación y dependiendo del suelo, no competente para un uso ingenieril, se considerará una mezcla de suelos para generar un tercero que pueda proporcionar una mejoría en diferentes propiedades. En general, solo se busca una mejoría sin agregarle algún agente que cambie químicamente al suelo.

1.3.2 Mejoramiento por medios eléctricos (o estabilizantes físicos)

Existe una estabilización térmica que nos ayuda a cambiar las propiedades del suelo. Son dos tipos, por calentamiento y por enfriamiento. Dependiendo del tipo serán las propiedades que se mejorarán.

1.3.3 Mejoramiento por adición de agentes estabilizantes

1.3.3.1 Mezcla con Cemento

El cemento es uno de los principales materiales para una estabilización. Se ha usado principalmente en la ingeniería de caminos y aeropistas, es un método que logra mejorías en la durabilidad y resistencia que favorecen una mejoría en la economía del proyecto.

Las reacciones que tiene el cemento con el suelo son diferentes. Con los suelos granulares el cemento tiene una reacción con los componentes silicosos dando unos conglomerantes que facilitan la unión de partículas de grava y arenas. Sin embargo con los suelos arcillosos es un proceso que no se ha comprendido del todo pero al hacer la mezcla se producen dos etapas. Al final se obtiene una mayor resistencia y durabilidad del suelo por las reacciones que disminuyen la plasticidad.

Las montmorilonitas, ilitas y caolinitas son las más reactivas ante el cemento y la resistencia después de la mezcla puede tener diferentes resultados por la reactividad de cada una. Todos los tipos de cemento son útiles para una estabilización, se usan principalmente el tipo 1 “normal”, 2 “Resistencia moderada a los sulfatos” y 3 “Rápido endurecimiento”. Dependiendo del porcentaje de cemento agregado al suelo se aumentará la resistencia y siguiendo este patrón a mayor cemento más resistencia, aunque con porcentajes mayores de 5% se obtendrían grandes cambios en las propiedades.

1.3.3.2 Mezcla con Asfalto

La estabilización con asfaltos es una de las técnicas más usadas principalmente en carreteras, si el suelo contiene materiales como limos, arenas y gravas, será muy efectiva porque produce una cohesión entre los materiales. Por otro lado en las arcillas se utiliza como un medio para lograr impermeabilidad. También es una de las técnicas con más variedad por los productos usados y el tipo de suelo.

El asfalto que se utiliza en una estabilización son de tres tipos;

- Productos bituminosos.
- Productos asfálticos.

- Productos residuo de la destilación de materiales orgánicos.

A grandes rasgos los efectos de la estabilización de suelos con asfaltos se da de dos maneras, crea cohesión por su naturaleza en los suelos y protege del agua al suelo.

1.3.3.3 Mezcla con cal

El uso de la cal como medio estabilizador es muy antiguo. Se usó en los primeros caminos en el Imperio Romano y en la construcción de la muralla China. Los estudios del suelo estabilizado con cal son muy recientes comparándolo con su uso en la construcción. La mayor eficiencia que puede dar la cal es en suelos finos y en estos es más usado.

La arcilla es un suelo que frecuentemente se necesita estabilizar para un mejor uso y mejorar su trabajabilidad. El tratamiento de suelos arcillosos mediante la cal puede lograr alguno o varios de los efectos siguientes (Fernández, 1982):

- Se reduce el índice plástico en forma considerable.
- El agua y la cal colaboran para acelerar la disgregación de los grumos de arcilla durante la operación de pulverización.
- Se reducen los efectos aglomerantes.
- En áreas pantanosas o en donde los suelos tienen humedades superiores a la óptima, la aplicación de la cal facilita el disgregado del suelo, lo que a su vez propicia un secado más rápido.
- Las contracciones y expansiones debidas a cambios de humedad se reducen considerablemente.
- La resistencia del suelo a la compresión incrementa. Asimismo también el valor relativo de soporte

- La capa estabilizada proporciona una excelente plataforma de trabajo para la construcción de las capas superiores de la sección estructural de un camino.

La cal, al mezclarse con una arcilla provoca una reacción química que dependiendo del tipo de arcilla será su reacción y por lo tanto las propiedades que se puedan mejorar a corto y largo plazo. También existen diferentes resultados por el porcentaje de cal agregado hasta llegar al “Punto de Fijación”. El punto de fijación es el límite en el cual no hay mejoras en el material.

1.3.3.3.1 Transformación de arcillas con cal

Para hacer un mejoramiento con cal se debe de entender la fisico-química de las arcillas y la reacción que tiene ante esta. A partir de minerales, principalmente silicatos, presentes en las rocas ígneas y metamórficas que gracias a la descomposición química se producen las arcillas. Las arcillas están constituidas por silicatos de aluminio hidratados, también pueden presentar silicatos de magnesio, hierro u otros metales hidratados. Las partículas de arcilla tienen una gran actividad eléctrica y un tamaño del de 2 micras o menos. La intensidad de la carga eléctrica depende de la estructuración y composición de la arcilla. La superficie de cada partícula de suelo tiene carga eléctrica negativa por esta razón la partícula atrae a iones positivos como el de agua (H^+) y cationes de diferentes elementos químicos.

Al mezclar un suelo arcilloso con agentes estabilizantes cambian las propiedades mecánicas porque varían los cationes ligados en su complejo de adsorción. El intercambio catiónico es la razón por la cual se usan agentes estabilizantes. Los cationes tienen un efecto benéfico decreciente en la resistencia de mayor a menor, estos son: $(NH_4)^+$, H^+ , K^+ , Fe^{+++} , Al^{+++} , Mg^{++} , Ba^{++} , Ca^{++} , Na^+ y $\tilde{N}i^+$.

De los tipos de arcillas existentes se conoce que las montmorilonitas son altamente reactivas a la cal al sustituir un ion equivalente (Al^{+++}) por uno divalente. Las montmorilonitas sufren grandes modificaciones del intercambio catiónico y tiene una lenta reacción puzolánica. Le sigue la caolinita, su unión es del tipo hidrógeno (H^+) entre las laminas de arcilla. Al ser un ion de hidrógeno tiene atracción de los oxígenos y por lo tanto una unión mas fuerte. La ilita por el otro lado tiene una reacción con la cal muy lenta, es la arcilla que reacciona difícilmente con la cal.

Básicamente se dan dos etapas al estabilizarse un suelo arcilloso con cal. La primera es una reacción iónica, esta reacción ayuda al suelo aumentando o bajando el limite liquido que también aumenta el limite plástico. En la segunda etapa las arcillas reaccionan, dependiendo del mineral arcilloso, de gran manera con la cal. Al final genera una degradación acelerada del mineral arcilloso que aumenta la resistencia. A esto se le llama acción puzolánica.

Parte 2

2.1 Antecedentes

El nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México se construirá en la zona noreste del Valle de México y es uno de los proyectos más importantes a nivel nacional de infraestructura. El NAICM se desplantará sobre un terreno lacustre donde principalmente se encuentran arcillas de alta plasticidad, limos y arenas. El suelo tiene un alto contenido de agua, una alta plasticidad y muy poca resistencia. Para la construcción de este proyecto se necesitan crear caminos de acceso para la maquinaria que se utilizará, asimismo para la logística de movimiento de materiales y tierras. Éste es un problema que se enfrenta dentro del proyecto por lo que una solución es la estabilización del suelo para crear caminos más eficientes y reducir los costos de construcción.

El NAICM se encuentra en la zona del ex lago de Texcoco en el valle de México. El valle es una cuenca limitada por elevaciones volcánicas. Al interior del valle se formó una zona lacustre constituida por los lagos de Chalco, Xochimilco, Xaltocan, Zumpango y Texcoco. El suelo del valle en estas zonas es principalmente arcilloso. Las condiciones geotécnicas del valle se pueden generalizar en: Costra Superficial formada por arcillas de alta plasticidad del depósito lacustre que se ha endurecido por la fluctuación del NAF y un endurecimiento debido al secado; Formación Arcillosa Superior formada por un depósito de arcillas de alta plasticidad normalmente consolidado con lentes de arena; Capa Dura es un estrato de limo con consistencia muy dura, es muy resistente y tiene buena permeabilidad; Formación Arcillosa Inferior formada por arcilla de alta plasticidad con lentes de ceniza volcánica y presenta abatimiento piezométrico. El suelo a usarse para el mejoramiento y estudio será de la Costra Superficial.

La arcilla que se encuentra en el ex lago de Texcoco es de difícil trabajabilidad ante este problema se estudió la estabilización con CaO para mejorar sus propiedades y resistencia. Para medir la resistencia de la arcilla se usará la prueba de CBR que es muy útil en el diseño de pavimentos. Esta prueba ayudará a comprender el efecto del CaO con las arcillas y los beneficios geotécnicos para su uso.

Se estudiarán dos casos de esta estabilización. El primer caso es de una muestra de suelo a 0.5 metros de profundidad se harán pruebas de CBR bajo una normativa vigentes en un laboratorio de mecánica de suelos. El segundo caso es el estudio de las muestras cúbicas que se extrajeron en el lugar de la Plataforma 1. La Plataforma 1 es un tramo de prueba donde se hizo una mezcla del suelo con CaO y se compactó. La idea principal es comparar los resultados de un trabajo en campo y uno en laboratorio y así concluir el efecto del CaO en este tipo de suelos.

2.2 CBR

El CBR, que significa “California Baring Ratio”, es una prueba diseñada por el departamento de carreteras del Estado de California y ayuda en la mayoría de diseño de pavimentos. El valor de CBR se obtiene de una relación expresada en porcentaje de la presión necesaria para penetrar 0.1 pulg en comparación con la presión necesaria pero en un material ideal que se usa como patrón. La penetración se hace con un vástago de 3 pulg² de área y la velocidad de penetración es en relación de 0.05 pulg/min. Las cargas se miden cada 0.1 pulg para formar la gráfica de CBR.

2.2.1 Descripción de la prueba

Las muestras a ensayar se hacen con tres diferentes energías de compactación dinámica en un molde de 152,4 mm de diámetro interno y 177,8 mm de altura. El molde se usa con una extensión de 50,8 mm mínimos de altura como se muestra en la figura 1.

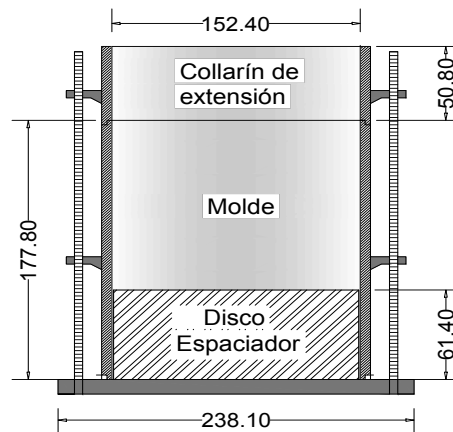
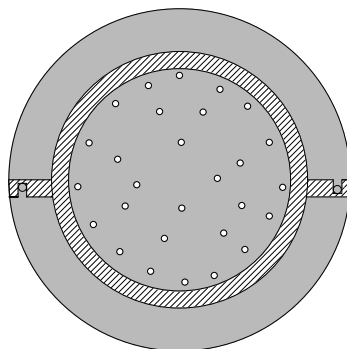


Figura 1

Se necesitan dos placas base, una con 28 orificios de 1,6 mm de diámetro distribuidos en el área de la placa como se muestra en la figura 2 y la otra sin orificios.



Placa base con perforaciones

Figura 2

Dentro del molde se colocará un disco espaciador con 150,8 mm de diámetro y 61,4 mm de altura como se muestra en la figura 3. También se le colocarán unas placas de carga de 149,23 a 150,81 mm de diámetro y un orificio central de 54,0 mm de diámetro con una masa de 4,54 kg. Por último, una o dos placas de 159,3 a 150.8 mm de diámetro con una masa de 2,27 kg las cuales tendrán una ranura de 54,0 mm de ancho como se muestra en la figura 3.

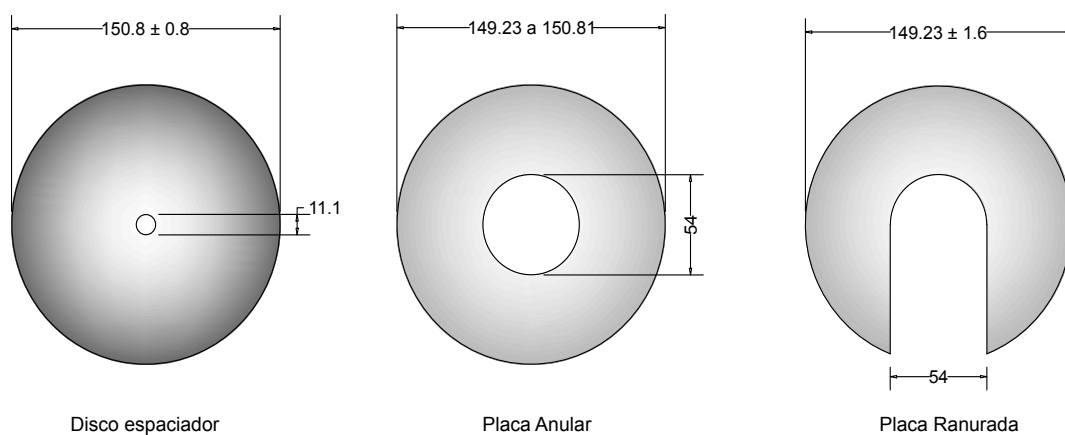


Figura 3

Las muestras serán compactadas de acuerdo con la relación de la tabla 1. Se prepararán tres muestras con tres diferentes energías de compactación. Los moldes con extensión se colocan sobre la placa base sin perforaciones y se lubrican con aceite. A cada molde se le coloca un disco espaciador con papel filtro. Se agrega el material y se compacta dinámicamente. Después de la tercera capa se extrae la extensión y se enrasa el material para tener una superficie plana así mismo del material excedente se determina su contenido de agua de compactación. Se desprende de la placa base el molde y se extrae el disco espaciador. Al final se toma el peso del molde más la muestra y se anota. Se repite para las tres muestras.

Material para	Espécimen N°	Energía específica de compactación kg·cm/cm ³	Número de golpes por capa Pisón de 2,05 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	--
	2	6,03	56
	3	2,69	25

Tabla 1 Energía de compactación para pruebas de CBR

Para medir la expansión se necesitan colocar las muestras ya compactadas en un tanque de saturación. Las muestras se colocan sobre la placa base perforada con papel filtro volteándolas de tal manera que la parte enrasada este en contacto con el papel filtro de la base perforada. Sobre la muestra se coloca el vástago de expansión con las placas de carga que sean necesarias para simular las capas que tendrá el material de uso dependiendo del proyecto. Si no se conocen las capas sobreyacentes la sobrecarga será de 4,54 kg pero nunca menor de esta masa. Dentro del tanque se debe asegurar de que tenga un buen flujo de agua para la saturación de las muestras. Se colocan en el vástago los trípodes del dispositivo para medir la expansión. Se toma la primera lectura y se dejan a saturar las muestras. Después de pasar 96 horas se toma la siguiente lectura. Las muestras se retiran del tanque cuidadosamente y se dejan drenar por 15 minutos. Se quitan las placas de carga, las perforadas y el papel filtro cuidadosamente para no dañar la superficie de la probeta y al final se toma lectura de su masa de la muestra. Se repite el mismo procedimiento para las otras muestras.

Se prepara inmediatamente después de tomar su masa de la muestra para su penetración. La muestra se ensambla en la placa base sin perforaciones en la misma posición que tenía durante la saturación. La muestra se coloca en la máquina que hará la penetración, dentro del molde se

coloca una placa de carga anular de 4,54 kg, donde se inserta el pistón de penetración y se aplica una carga de 4,38 kg, al final se le colocan las placas ranuradas necesarias para simular las capas que tendrá el material en uso, como en la etapa de saturación. Después se retira la carga y se ajusta el extensómetro para medir la penetración. Se aplica la carga a una velocidad de 1,27 mm/min. Se leen y registran las cargas como se muestra en la tabla 2. Al finalizar la prueba la muestra se saca del molde y se obtiene del centro material representativo para calcular el contenido de agua en estado saturado. Se repite el procedimiento para cada muestra.

Lecturas	Tiempo min:seg	Penetración mm
Primera	00:30	0,64
Segunda	01:00	1,27
Tercera	01:30	1,91
Cuarta	02:00	2,54
Quinta	03:00	3,81
Sexta	04:00	5,08
Séptima	06:00	7,62
Octava	08:00	10,16
Novena	10:00	12,70

Tabla 2 Relacion de tiempo y penetracion de prueba CBR

2.3 Características del CBR

El CBR se usa principalmente como indicador de la resistencia de un material. El comportamiento de la gráfica de CBR muestra una relación de carga contra penetración. Aunque es una prueba convencional y se usa cada vez menos nos brinda mucha información para el estudio del material y su uso en un pavimento. La prueba estudia el material en su condición más desfavorable y ayuda a dimensionar el comportamiento de la estabilización en esta condición.

En esta tesina se usará el manual de la SCT y no la norma del ASTM. Existen diferencias entre estas pruebas como el manejo del material a usarse en la compactación. También tiene

diferentes criterios para la obtención de CBR que difieren al del manual de la SCT. El procedimiento para medir la expansión es el mismo al igual que las horas de saturación de las muestras. Durante la penetración se usan los mismos criterios para las placas de carga que en la expansión. En la relación de tiempo-penetración es la misma en la norma y el manual aunque difieren en la adquisición de datos. La comparativa se observa en la tabla 3.

Lecturas	Tiempo min:seg	Penetración en mm	
		ASTM	SCT
Primera	00:30	0,64	0,64
Segunda	01:00	1,27	1,27
Tercera	01:30	1,91	1,91
Cuarta	02:00	2,54	2,54
Quinta	02:30	3,18	--
Sexta	03:00	3,81	3,81
Séptima	03:30	4,45	--
Octava	04:00	5,08	5,08
Novena	06:00	7,62	7,62
Décima	08:00	10,16	10,16
Onceava	10:00	12,70	12,70

-- Lecturas no registradas

Tabla 3 Diferencia de registro de las pruebas

Esta prueba se usará para medir la resistencia de la arcilla estabilizada con CaO por su método y también por el uso al que se le dará a la estabilización del suelo dentro del NAICM. Se usará el procedimiento de la SCT por el uso del material y porque está vigente. La prueba tendrá diferencias en el manejo del material de las muestras cúbicas y las muestras generadas en laboratorio en comparación al manual M-MMP-1-11/08 pero a partir de la compactación hasta la penetración se registrará bajo este.

Parte 3 Procedimiento de las Pruebas

Como se mencionó en el capítulo anterior se harán las pruebas a dos tipos de especímenes, unos labrados de una muestra cúbica obtenida en campo y los otros generados en un laboratorio. Para la extracción de los especímenes de campo se llegó al lugar del tramo de prueba denominado P-1, en el cual se hizo una plataforma de estabilización con CaO y se extrajeron 2 muestras a lo largo de la plataforma. Dentro del mismo perímetro de la plataforma P-1 se extrajo el suficiente material alterado a 0.50 metros de profundidad para la elaboración de los especímenes. En el anexo A se observa el labrado de muestras.

En la plataforma P-1 se extrajeron dos muestras cúbicas. De cada muestra se obtuvo un espécimen labrado con mucho cuidado en el laboratorio. Cada muestra labrada quedó adentro de un molde de CBR. Para las muestras que se obtuvieron en el lugar se siguió el procedimiento de la prueba de la SCT desde el inciso de expansión. Las muestras, que ya estaban en un molde, se les colocó la extensión, las placas de 4,54 kg y se insertaron dentro del taque de saturación. Se usaron placas de 4,54 kg por no tener antecedentes de capas sobreyacientes. Al final se les colocó el extensómetro en ceros. Se dejaron saturar por 96 horas. Después de las 96 horas se tomó lectura del extensómetros para el cálculo de la expansión. Después se dejó drenar por 15 min y se registró la masa de cada muestra.

Para la penetración se colocaron los discos de 4,54 kg al igual que en la saturación. Se hizo el procedimiento antes descrito por el manual de la SCT y se obtuvo el contenido de agua. Todo el procedimiento se hizo igual para las dos muestras de campo. Para cada valor de carga durante la penetración de acuerdo con la Tabla 2 se toma registro. Se hacen los cálculos para obtener el CBR y contenidos de agua. Se registran todos los datos y se grafican.

Como se mencionó anteriormente se obtuvo material para la elaboración de las muestras en el laboratorio. Este material se mezcló con 15% de CaO en relación con su peso. Este porcentaje esta basado en pruebas de compactación para determinar el contenido de CaO necesario para lograr una buena estabilización. Éstas pruebas se deberían de estudiar más a detalle en otra tesina. La muestra de suelo con CaO se mezcló en un aparato para que no quedaran partículas de suelo sin mezclar y lograr una mejor homogeneización del material. El material se disgregó y se dejó reposar por una hora para lograr la reacción del CaO con el suelo.

En la compactación se uso un compactador mecánico con un pisón de 2,45 kg como lo marca el manual. Se hicieron tres probetas con tres diferentes energías de compactación. Se les colocaron las extensiones a los moldes y todos los aditamentos para medir las expansiones. Como no se tiene antecedentes de las capas sobreyacentes se usaron placas de 4,54 kg y se dejaron en saturación por 96 horas. Se tomó registro al inicio y al final de la saturación para medir la expansión.

La prueba de penetración se realizó de acuerdo con la descripción del manual de la SCT antes descrito. Se colocaron los discos de 4,54 kg para simular la sobrecarga de las capas sobreyacentes y inicio la prueba de penetración registrándose las cargas. Se obtuvo material para determinar el contenido de agua. Todo el procedimiento se siguió para las tres probetas generadas en el laboratorio.

El procedimiento de las pruebas se observa en en anexo B.

Parte 4 Resultados

Los datos que se obtienen en los ensayos se utilizan para obtener los resultados del Peso Volumétrico Seco y Húmedo, el contenido de agua, la expansión y el valor de CBR. Los datos y resultados completos se reportan en los formatos de las pruebas.

4.1 Formulas utilizadas

Para el cálculo del contenido de agua se usa la siguiente fórmula:

$$W\% = \frac{(Wt + Wsh) - (Wt + Wss)}{Wss - Wt} \times 100$$

Donde

- W% : contenido de agua expresado en porcentaje
- Wsh: Masa de suelo húmedo en gramos
- Wss: Masa de suelo seco en gramos
- Wt: Masa de la tara en gramos
- Wm: Masa del molde en gramos

Para el peso volumétrico Seco se usa:

$$PVS = \frac{1000(W_{m+mh} - W_m)}{(A_m)(H_m) \left(1 + \frac{W\%_{sat}}{100}\right)}$$

Donde

- PVS: Peso volumétrico seco en kg/m³
- W_{m+mh} : Masa del molde más muestra húmeda

- W_m : Masa del molde
- A_m : Área del molde
- H_m : Altura de la muestra
- $W\%_{sat}$: Contenido de agua de la muestra saturada

Y para el cálculo de la expansión se utiliza la siguiente expresión:

$$EXP = \frac{100(L_f - L_i)}{(H_m)}$$

Donde

- EXP: expansión expresada en porcentaje.
- L_f : Lectura final del extensómetro después de 96 horas de saturación.
- L_i : Lectura inicial del extensómetro.
- H_m : Altura de la muestra

4.2 Calculo de CBR

Existe una consideración en los ensayos de CBR que es muy importante y es la forma de las curvas. Existen tres tipos de curvas que se pueden formar al graficar las cargas en el eje de las ordenadas y las penetraciones en el eje de las abscisas como se muestra en la figura 4. La gráfica del tipo A demuestra un buen ensaye realizado. Si la gráfica tiene una falla plástica como el tipo B se deberá de repetir la prueba, desde la compactación hasta la penetración, ya que es una prueba de penetración mal realizada. Si la gráfica es del tipo C que presente una concavidad hacia arriba se deberá de corregir el origen.

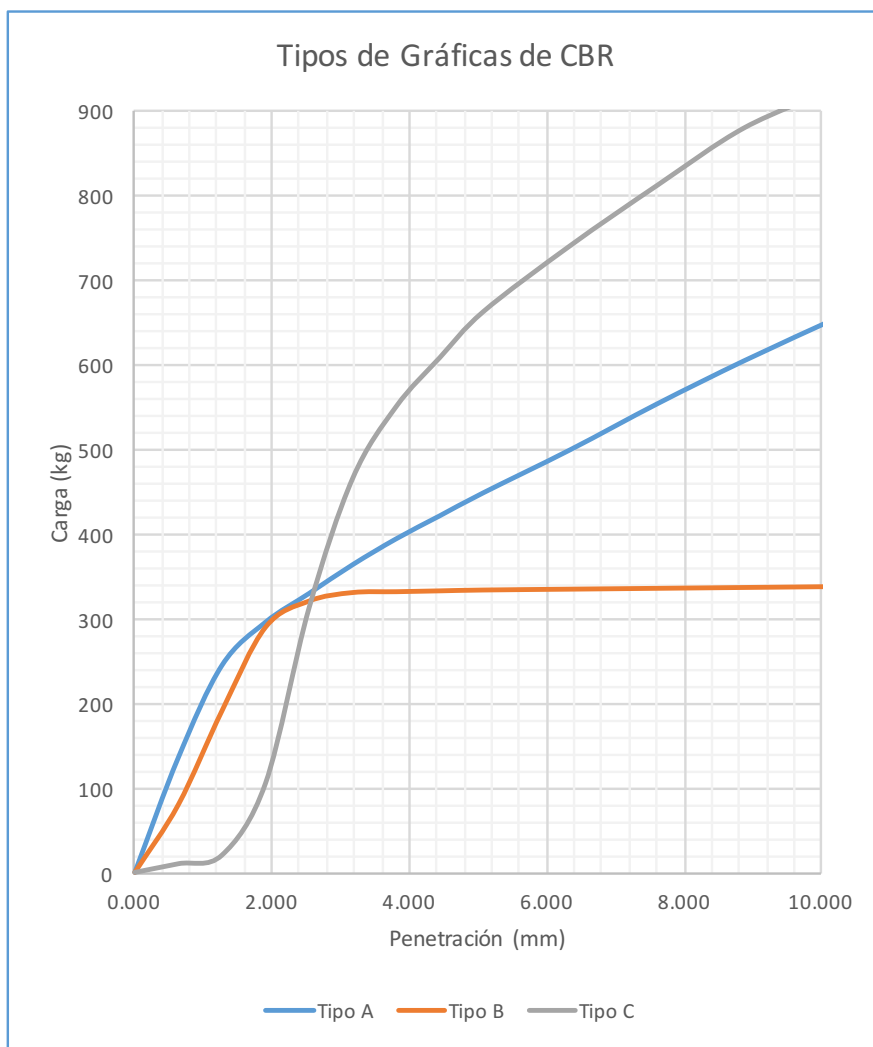


Figura 4 Tipos de CBR

Para hacer la corrección del origen de una gráfica se traza una tangente en el punto de inflexión y se prolonga hasta el eje de las abscisas, en esta intersección se denominará el nuevo origen y a partir de este punto se medirán la carga de la gráfica a 0.1” (2,54 mm). Esta será la nueva carga corregida con la cual se calculará el valor de CBR. El valor se obtiene con las siguientes fórmulas:

$$CBR = \frac{100C_{2,54}}{1360}$$

$$CBR = \frac{100C_{5,10}}{2040}$$

Donde :

- CBR: Valor Soporte de California expresado en porcentaje
- $C_{2,54}$: Carga aplicada o corregida para una penetración de 2,54 mm
- $C_{5,10}$: Carga aplicada o corregida para una penetración de 5,10 mm

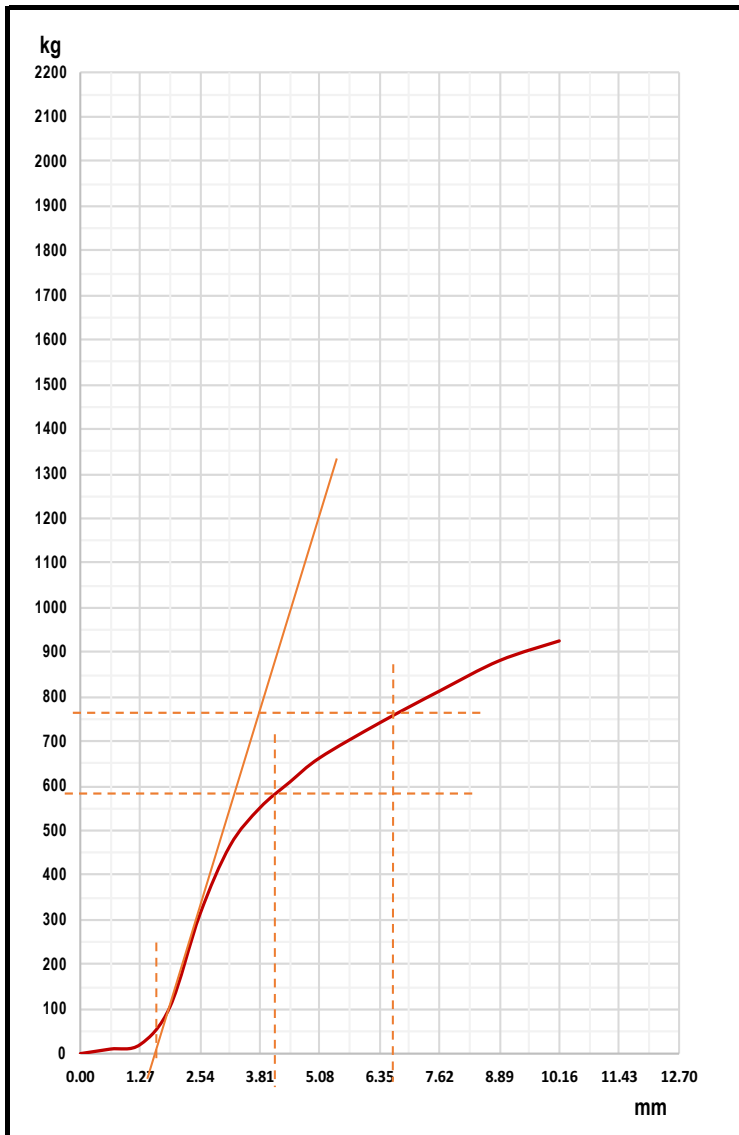
4.3 Formatos

Todos los datos y resultados se anotan en un formato para facilitar el análisis y manejo. En el manual de la SCT y norma de ASTM dan ejemplos sobre los formatos y con base en ellos se decidió usar el siguiente. En este formato se encuentran datos de proyecto, localización, pesos volumétricos, contenido de agua y el valor de CBR.

4.3.1 Resultados Plataforma-1

PRUEBA DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR)

Procedencia del material:	NAICM P - 1	Fecha de muestreo:	29 de junio de 2016
Tipo de material:	Estabilización con óxido de calcio y compactación en el lugar	Fecha de prueba:	29 de agosto de 2016
Tipo de muestra:	Labrada en el lugar para ensaye de CBR en el Laboratorio	Condición de prueba:	PV in situ y saturado 4 días en el laboratorio
Anillo: 11017	Constante del Anillo: 3.4019 kg, por cada 0.001"	Para usarse en:	Subrasante
		Operador:	JAB



Prueba Núm.	1
Molde:	3
Muestra:	M-1
P molde + Mat húmedo	8400.1
Peso del molde, g	5446.7
P material húmedo, g	2953.4
Altura del molde, cm	17.679
Altura fatante, cm	6.015
Altura del material, cm	11.664
Área del molde, cm ²	180.34
Vol. Espécimen, cc ³	2103.5
PVH, kg/m ³	1404.1
PVS, kg/m ³	829.9

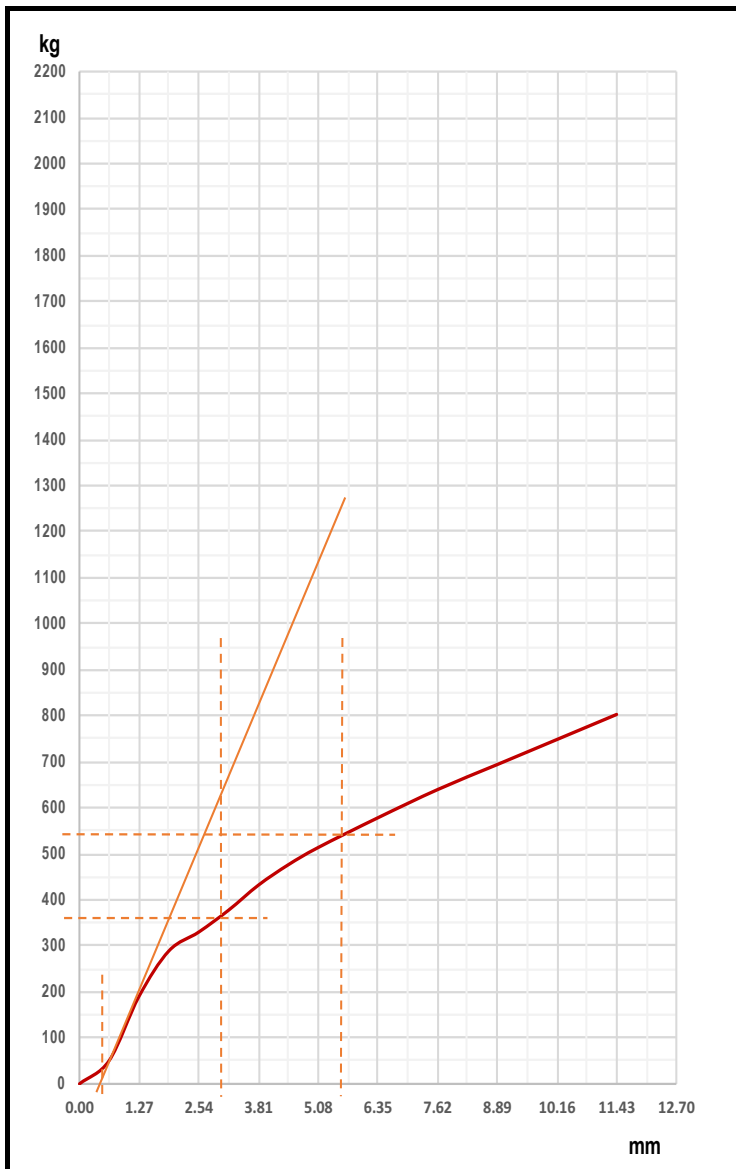
DEFORMACIÓN		CARGA	
mm	0.001"	Lec. Mic.	kg
0.000	0.000	0	0.0
0.635	0.025	3	10.2
1.270	0.050	6	20.4
1.905	0.075	31	105.5
2.540	0.100	92	313.0
3.810	0.150	162	551.1
5.080	0.200	195	663.4
7.620	0.300	239	813.1
10.160	0.400	272	925.3
12.700	0.500	Falta	
CBR 2.54			42.6
CBR 5.01			37.3

Cápsula Núm.	1
Tara + suelo húm, g	274.0
Tara + suelo Seco, g	188.5
Tara, g	64.9
Contenido de agua, g	85.5
Peso suelo seco, g	123.6
Contenido de agua, %	69.17

Lect. inicial del micrometro, cm	0.00
Lect final, 96 h de Saturación, cm	0.05
Expansión, en porcentaje	0.43

PRUEBA DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR)

Procedencia del material:	NAICM P - 1	Fecha de muestreo:	29 de junio de 2016
Tipo de material:	Estabilización con óxido de calcio y compactación en el lugar	Fecha de prueba:	29 de agosto de 2016
Tipo de muestra:	Labrada en el lugar para ensayo de CBR en el Laboratorio	Condición de prueba:	PV in situ y saturado 4 días en el laboratorio
Anillo: 11017	Constante del Anillo: 3.4019 kg, por cada 0.001"	Para usarse en:	Subrasante
		Operador:	JAB



Prueba Núm.	2
Molde:	4
Muestra:	M-2
P molde + Mat húmedo	8057.4
Peso del molde, g	5155.6
P material húmedo, g	2901.8
Altura del molde, cm	17.491
Altura faltante, cm	6.241
Altura del material, cm	11.250
Área del molde, cm ²	179.96
Vol. Espécimen, cc ³	2024.6
PVH, kg/m ³	1433.3
PVS, kg/m ³	846.3

DEFORMACIÓN		CARGA	
mm	0.001"	Lec. Mic.	kg
0.000	0.000	0	0.0
0.635	0.025	15	51.0
1.270	0.050	56	190.5
1.905	0.075	85	289.2
2.540	0.100	97	330.0
3.810	0.150	127	432.0
5.080	0.200	151	513.7
7.620	0.300	188	639.6
10.160	0.400	220	748.4
12.700	0.500	253	860.7
CBR 2.54		26.5	
CBR 5.01		26.7	

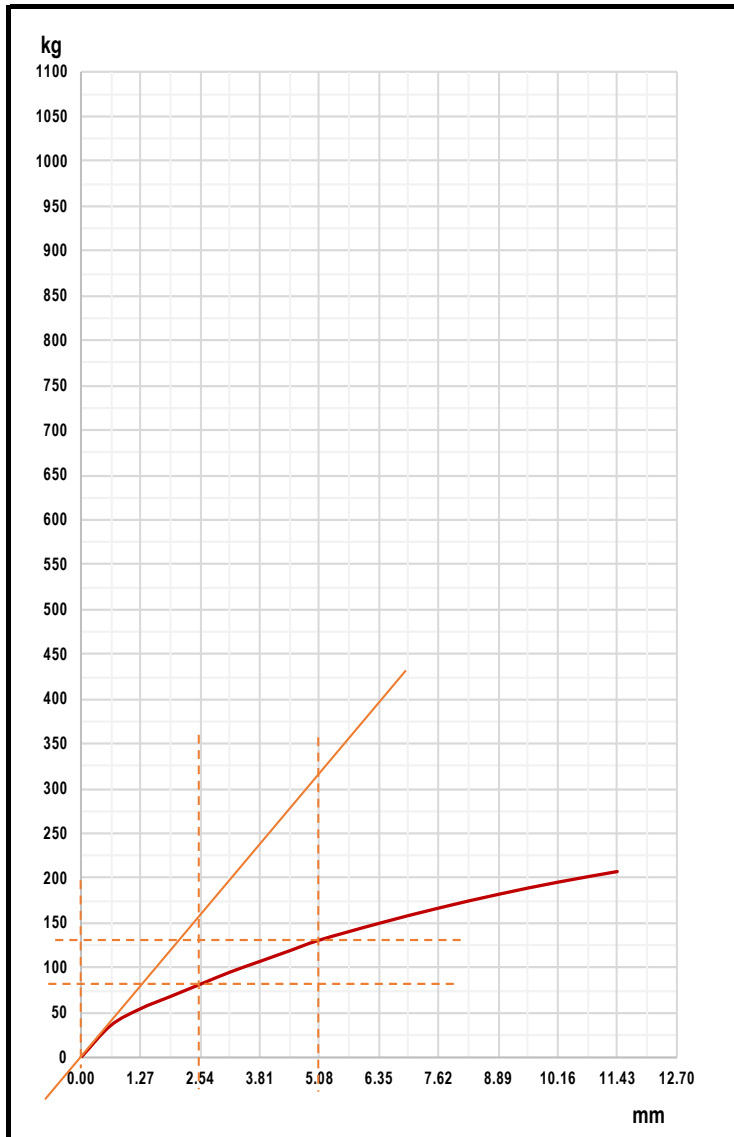
Cápsula Núm.	2
Tara + suelo húm, g	283.4
Tara + suelo Seco, g	194.4
Tara, g	66.1
Contenido de agua, g	89.0
Peso suelo seco, g	128.3
Contenido de agua, %	69.37

Lect. inicial del micrometro, cm	0.00
Lect final, 96 h de Saturación, cm	0.02
Expansión, en porcentaje	0.18

4.3.2 Resultados Suelo-1

PRUEBA DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR)

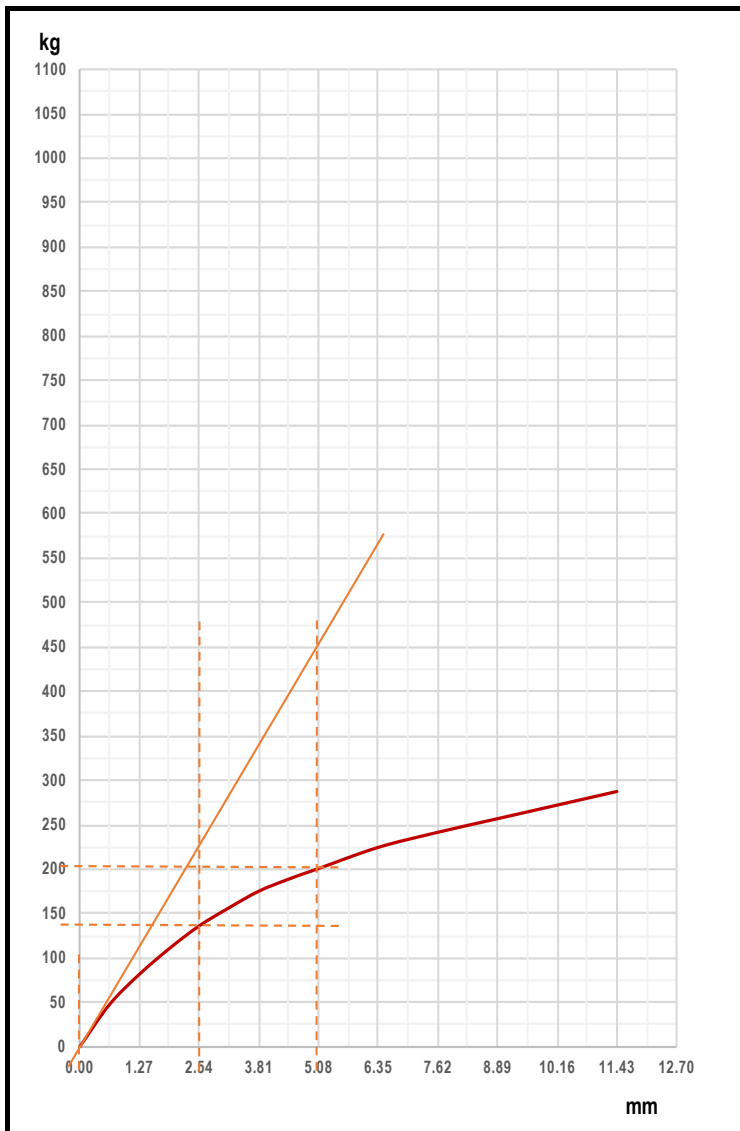
Procedencia del material:	NAICM P - 2	Fecha de muestreo:	
Tipo de material:	Suelo del NAICM, estabilización con óxido de calcio	Fecha de prueba:	12 de septiembre de 2016
Compactada en laboratorio:	3 capas, 10 golpes/capa y pisón de 2.5 kg	Condición de prueba:	Humedad inicial 170 %
Anillo:	11017	Constante del Anillo:	3.4019 kg, por cada 0.001"
		Para usarse en:	Terraplen
		Operador:	JAB



Prueba Núm.		1	
Molde:		7	
Muestra:		1	
P molde + Mat húmedo		7668.5	
Peso del molde, g		5424.4	
P material húmedo, g		2244.1	
Altura del molde, cm		17.786	
Altura faltante, cm		6.332	
Altura del material, cm		11.454	
Área del molde, cm ²		180.29	
Vol. Espécimen, cm ³		2065.0	
PVH, kg/m ³		1086.7	
PVS, kg/m ³		548.4	
DEFORMACIÓN			
mm	0.001"	CARGA	
		Lec. Mic.	kg
0.000	0.000	0	0.0
0.635	0.025	10.5	35.7
1.270	0.050	16.0	54.4
1.905	0.075	20.0	68.0
2.540	0.100	24.0	81.6
3.810	0.150	31.5	107.1
5.080	0.200	38.5	131.0
7.620	0.300	49.0	166.7
10.160	0.400	57.5	195.6
12.700	0.500	65.0	221.1
CBR 2.54			6.0
CBR 5.01			6.4
Humedad			
Cápsula Núm.		4	
Tara + suelo húm, g		374.7	
Tara + suelo Seco, g		221.3	
Tara, g		65	
Contenido de agua, g		153.4	
Peso suelo seco, g		156.3	
Contenido de agua, %		98.14	
Lect. inicial del micrometro, cm		0.00	
Lect a 24 h de saturación, cm			
Lect a 72 h de saturación, cm			
Lect final, 96 h de Saturación, cm		0.032	
Expansión, en porcentaje		0.28	

PRUEBA DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR)

Procedencia del material: NAICM P - 2	Fecha de muestreo:
Tipo de material: Suelo del NAICM, estabilización con óxido de calcio	Fecha de prueba: 12 de septiembre de 2016
Compactada en laboratorio, 3 capas, 25 golpes/capa y pisón de 2.5 kg	Condición de prueba: Humedad inicial 170 %
Anillo: 11017 Constante del Anillo: 3.4019 kg, por cada 0.001"	Para usarse en: Terraplen Operador: JAB



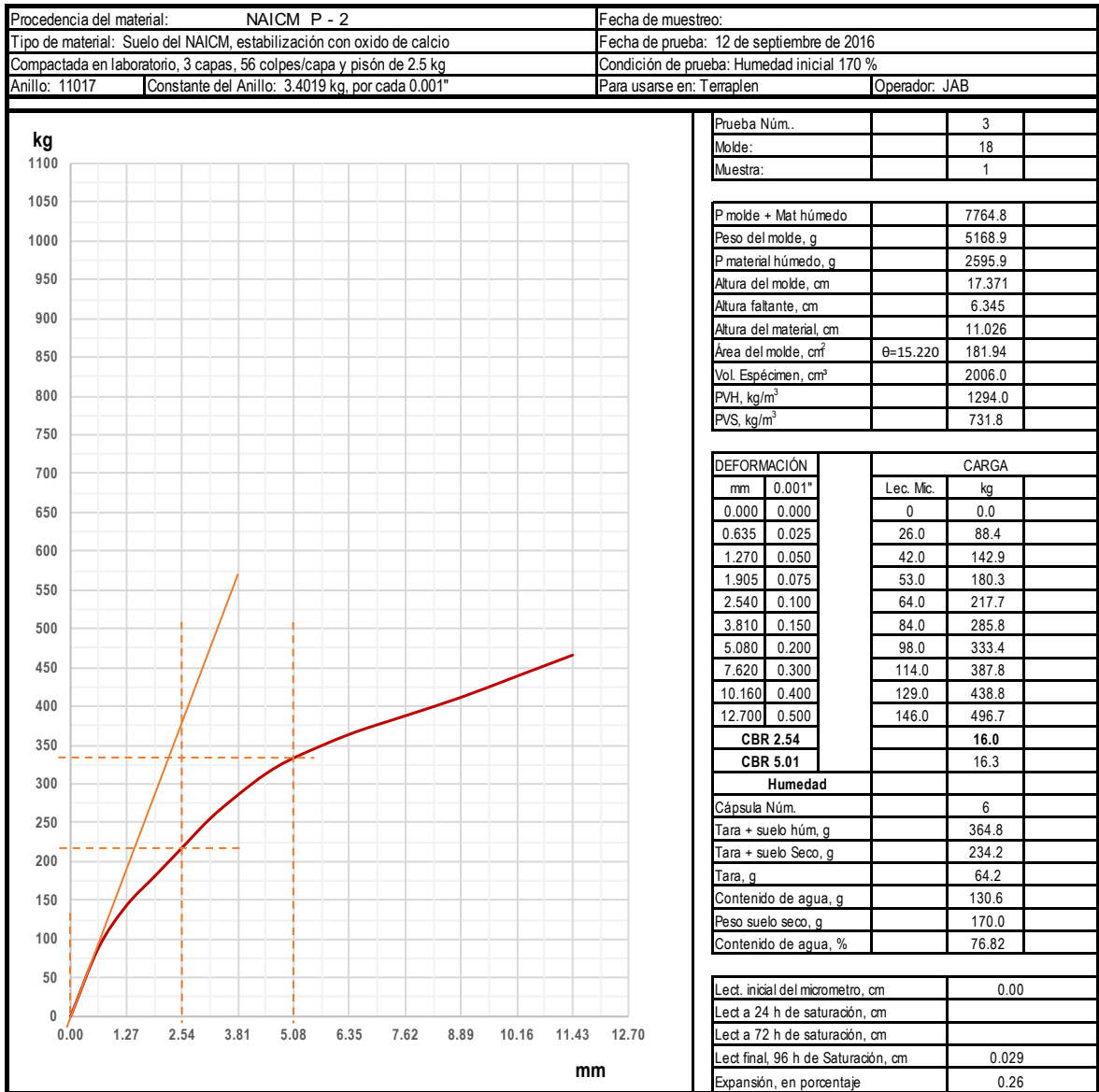
Prueba Núm.	2
Molde:	11
Muestra:	1
P molde + Mat húmedo	7809.1
Peso del molde, g	5390.3
P material húmedo, g	2418.8
Altura del molde, cm	17.771
Altura faltante, cm	6.362
Altura del material, cm	11.409
Área del molde, cm ²	$\theta=15.249$ 182.63
Vol. Espécimen, cm ³	2083.6
PVH, kg/m ³	1160.9
PVS, kg/m ³	572.7

DEFORMACIÓN		CARGA	
mm	0.001"	Lec. Mic.	kg
0.000	0.000	0.0	0.0
0.635	0.025	14.0	47.6
1.270	0.050	24.0	81.6
1.905	0.075	32.5	110.6
2.540	0.100	40.0	136.1
3.810	0.150	51.5	175.2
5.080	0.200	59.0	200.7
7.620	0.300	71.0	241.5
10.160	0.400	80.0	272.2
12.700	0.500	89.5	304.5
CBR 2.54		10.0	
CBR 5.01		10.1	

Humedad	
Cápsula Núm.	5
Tara + suelo húm, g	349.8
Tara + suelo Seco, g	206.1
Tara, g	66.2
Contenido de agua, g	143.7
Peso suelo seco, g	139.9
Contenido de agua, %	102.72

Lect. inicial del micrometro, cm	0.00
Lect a 24 h de saturación, cm	
Lect a 72 h de saturación, cm	
Lect final, 96 h de Saturación, cm	0.031
Expansión, en porcentaje	0.27

PRUEBA DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR)



4.4 Tablas de Concentrado

La tabla de concentrado es un resumen de los valores más importantes obtenidos después de las pruebas. El CBR que se utiliza es el menor entre los dos valores de CBR para cada prueba hecha.

Procedencia del material:	NAICM P - 1	Fecha de muestreo:	19 de Junio de 2016
Tipo de material:	Estabilización con óxido de calcio y compactación en el lugar	Fecha de prueba:	29 de Agosto de 2016
Tipo de muestra:	Labrada en el lugar para ensaye de CBR en el Laboratorio	Condiciones de prueba:	PV y Hum. in situ, y PV y Hum. saturada 4 días en el Lab.
Dereminación de CBR en muestras inalteradas en condiciones in situ y saturadas		Para usarse en:	Subrasante
		Operador:	JAB

NAICM P - 2	PVH kg/m ³	PVS kg/m ³	W _i in situ %	Expansión %	CBR _{saturado} %	W _i después de la saturación %
M-1	1404	880	59.6	0.43	37	69.2
M-2	1433	835	71.7	0.18	26	69.4

Tabla 4 Concentrado CBR de muestras cubicas.

Procedencia del material:	NAICM P - 2	Fecha de muestreo:	
Tipo de material:	Estabilización con óxido de calcio y compactado en el laboratorio	Fecha de prueba:	12 de septiembre de 2016
Compactado en 3 capas, pisón de 2.5 kg.		Condición de prueba:	Humedad inicial 170 %, con reposo de 24 horas
Dereminación de CBR en muestras compactadas en el laboratorio y saturadas 96 horas		Para usarse en:	Terraplen
		Operador:	JAB

NAICM P - 2	PVH kg/m ³	PVS kg/m ³	Expansión %	CBR _{saturado} %	W _i después de la saturación %
Prueba 1 10 golpes/c	1087	548	0.28	6.0	98.1
Prueba 1 25 golpes/c	1161	573	0.27	10.0	102.7
Prueba 1 56 golpes/c	1294	732	0.26	16.0	76.8

Tabla 5. Concentrado muestras de laboratorio.

También se hizo un concentrado de humedades del suelo, desde el inicio de las pruebas hasta la humedad de CBR. Esto se hace para observar el comportamiento del suelo con la estabilización del CaO. El concentrado se muestra en la tabla 6 .

	W antes de mezclar con cal	W al compactar	W, después de la saturación		
	%	%	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Cápsula Núm.	1	2	4	5	6
Tara + suelo húm. g	314.0	309.0	374.7	349.8	364.8
Tara + suelo Seco. g	172.8	202.1	221.3	206.1	234.2
Tara. g	65.6	72.8	65.0	66.2	64.2
Contenido de agua, g	141.2	106.9	153.4	143.7	130.6
Peso suelo seco, g	107.2	129.3	156.3	139.9	170.0
Contenido de agua, %	131.72	82.68	98.14	102.72	76.82

Tabla 6 Humedades del S-1 durante la prueba CBR

4.5 Obtención del valor de CBR

De la tabla de concentrado de las muestras labradas en laboratorio se observan 3 diferentes valores de CBR para una humedad constante. Para obtener el valor del CBR se toma el valor mínimo y se le suma el 20 percentil. Esto es que a la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo se le calcula el 20%. Al valor mínimo se le suma este porcentaje y este nuevo valor será el de CBR.

Calculando:

$$CBR_{m\acute{a}ximo} = 16 \%$$

$$CBR_{m\acute{i}nimo} = 6 \%$$

$$CBR_{m\acute{a}ximo} - CBR_{m\acute{i}nimo} = 10\%$$

$$20 \text{ percentil} = 10 \times 0.2 = 2$$

Por lo tanto calculado el CBR de dise\u00f1o:

$$CBR_{m\acute{i}nimo} + 20 \text{ percentil} = 6 + 2$$

$$CBR = 8\%$$

Parte 5 Conclusiones

La prueba CBR da información del suelo para su uso en terracerías y esta prueba combinada con una estabilización brindara más información sobre su comportamiento en un camino de rodamiento provisional. En las pruebas de CBR se observan dos procedimientos de muestreo diferentes pero el procedimiento de las pruebas es igual, al final se obtienen resultados de CBR que son comparables. Los resultados entre la muestra de campo y de las muestras hechas en laboratorio nos dice que el valor de CBR de la estabilización en campo es 30% mayor que la muestra en laboratorio.

En las muestras cúbicas se observa que el valor de contenido de agua in situ es diferente. La muestra M2 tiene 20% mas en comparación con la muestra M1 por las condiciones del campo. Después de la saturación de la prueba los contenidos de agua tenían una diferencia de 0.03%. Los valores de expansión de la muestra M1 es mayor que la muestra M2, el valor de CBR de la muestra M1 es 30% mayor a la muestra M2 así como su expansión. De estas muestras de campo, como ya se mencionó, se obtuvieron de dos diferentes punto de la Plataforma-1. Esto podrían dar indicios de ser las diferencias en los resultados obtenidos por el procedimiento constructivo y el control de la estabilización. En las muestras hechas en el laboratorio se observar que los resultados del valor de CBR son diferentes entre si por la compactación dinámica y la energía utilizada. Hay variaciones razonables para obtener el valor de CBR. También la acción del CaO con el suelo hizo disminuyera el contenido de agua durante su mezclado. La reacción del suelo con CaO hace que el agua forme parte del cementante como parte de la composición, la cal necesita el agua para la acción puzolánica. Durante la compactación el suelo tuvo un fácil manejo al ser más eficiente con CaO a diferencia del suelo no estabilizado.

Al comparar el CBR de las muestras de laboratorio con el CBR de las muestras cúbicas se debe tener en cuenta que el tramo de prueba tiene un mayor tiempo de vida en comparación con las muestras de laboratorio que tienen poco tiempo de reacción. El incremento del valor de CBR se debe a la acción de la puzolana del CaO. Esto significa que a mayor tiempo de reacción incrementa su resistencia. Comparando los valores de CBR la muestra M2 de campo es 300% mayor en comparación con el valor de CBR de laboratorio logrando beneficios a corto y largo plazo.

Con el valor de CBR a corto plazo y con base a los requisitos de calidad de materiales de la tabla 7 hecha de los manuales N-CMT-1-01 este suelo estabilizado se puede utilizar como material para terraplén. Y a largo plazo se podría utilizar como un material para sub-rasante.

Clasificación de materiales de acuerdo a su CBR en base a Manuales de la SCT	
Valor CBR mínimo	Clasificación
5	Material para terraplén
10	Material para subyacente
20	Material para sub-rasante
50	Material para sub-base
80	Material para base

Tabla 7 Clasificación de materiales

En general la estabilización con CaO reduce el contenido de agua y aumenta la resistencia del suelo. Al ser un producto de bajo costo es viable usarlo para su manejo aunque su transporte puede dificultarse en zonas de difícil acceso. Este tipo de estabilización también ayuda a evitar grandes movimientos de tierra y de materiales de un banco puesto que se está usando el material del lugar. No tiene muchas complicaciones al compactarse, genera un buen comportamiento y sobre todo evita una expansión alta en condiciones desfavorables.

Gracias a los valores obtenidos de CBR se puede considerar al CaO como una opción buena para su uso, por la obtención de buenos resultados y la disminución de costos por usar un material del mismo lugar y un producto relativamente barato. EL valor de CBR es un indicio del uso de CaO pero se debe de complementar con pruebas de durabilidad, triaxiales QU, y pruebas de rayos X .

5.1 Recomendaciones

Con los resultados de campo y laboratorio se dan estas recomendaciones para una buena estabilización y optimizar su uso como camino de acceso:

- Almacenar correctamente el CaO por su alta reactividad con el agua
- Hacer una buena mezcla del CaO con el suelo a estabilizar para lograr mejores efectos y así evitar que partículas del suelo se queden sin mezclar asegurando la homogeneidad del suelo.
- La compactación debe ser controlada para lograr mejores resultados
- Se puede utilizar maquinaria especial para la estabilización como Pulvimixer que escarifica el suelo y ayuda a un mejor mezclado.
- Se recomienda hacer pruebas de durabilidad y triaxiales QU para verificar resultados

Bibliografía

Fernández Loaiza, Carlos. (1982). Mejoramiento y estabilización de suelos. Distrito Federal, México: Editorial Limosa.

Rico y de Castillo. (1977). La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Vol. 2. Distrito Federal, México: Editorial Limosa.

Juarez Badillo, Eulalio. (1986). Mecánica de suelos. Tomo I Fundamentos de la mecánica de suelos. Distrito Federal, México: Editorial Limosa

M-MMP-1-11/08 Valor Soporte de California (CBR) y Expansión en Laboratorio, SCT, México, 16 de diciembre de 2008

D 1883-99, Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils, United States

N-CMT-1-03 Características de los Materiales, SCT, México, 11 de noviembre de 2002

Anexo A Labrado de muestras



Figura A. 1 Descubriendo muestra cubica



Figura A. 2 División de la muestra cubica



Figura A. 3 Se va cortando material con mucho cuidado



Figura A. 4 Con ayuda de un careador se va definiendo la forma de la muestra al tamaño del molde



Figura A. 5 Se recortan los bordes a manera que el molde pueda entrar



Figura A. 6 La muestra entra al molde poco a poco



Figura A. 7 Se enrasa la muestra



Figura A. 8 La muestra esta dentro del molde con placa

Anexo B Pruebas de CBR



Figura B 1 Mezcla de S-1 con 15% de CaO. Se muestra la diferencia del material mezclado y el material natural.



Figura B 2 Preparación del molde para medir expansión



Figura B 3 Inicio de la prueba de saturación para medir la expansión



Figura B 4 Preparación de la muestra para penetración.

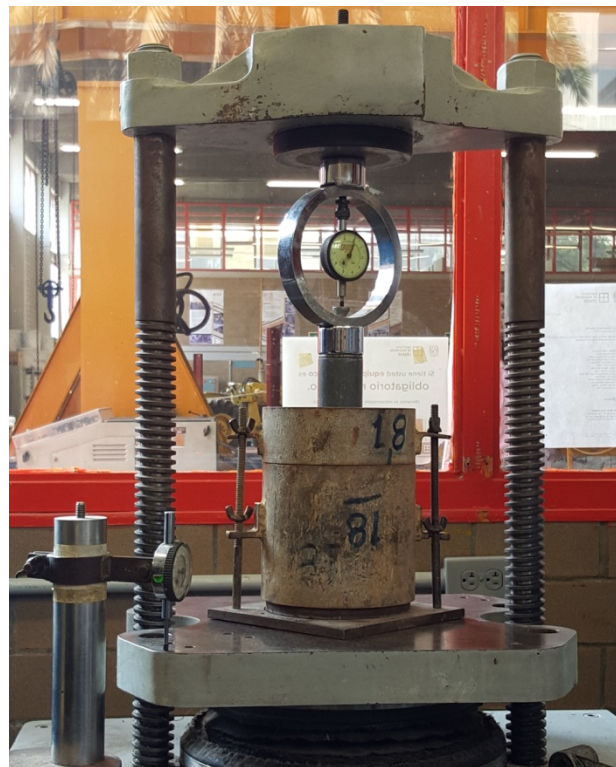


Figura B 5 Prueba de penetración