

**Implementación de la metodología de diseño para
materiales tratados con cal en la construcción y
evaluación del desempeño de tramos de prueba en un
proyecto en construcción**


Informe final

Preparado por

Unidad de Investigación (UI)

San José, Costa Rica

Noviembre 2010

<p>1. Informe</p> <p style="text-align: center;">UI- 02-10</p>		
<p>2. Título y subtítulo IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA MATERIALES TRATADOS CON CAL EN LA CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE TRAMOS DE PRUEBA EN UN PROYECTO EN CONSTRUCCIÓN</p>		<p>3. Fecha del Informe</p> <p style="text-align: right;">Noviembre, 2010</p>
<p>4. Preparado por Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, Investigador E-mail: gustavo.badilla@ucr.ac.cr</p>	<p>5. Firma</p>	<p>6. Fecha:</p>
<p>7. Preparado por Doris Molina Zamora, Asistente E-mail: doris.molina@ucr.ac.cr</p>	<p>8. Firma</p>	<p>9. Fecha:</p>
<p>10. Revisado por Ing. Fabián Elizondo Arrieta, Coordinador Unidad de Investigación E-mail: fabian.elizondo@ucr.ac.cr</p>	<p>11. Firma</p>	<p>12. Fecha:</p>
<p>13. Revisado por Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, MsC, candidato a PhD. Coordinador PITRA E-mail: luis.loriasalazar@ucr.ac.cr</p>	<p>14. Firma</p>	<p>15. Fecha:</p>
<p>16. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500</p>		
<p>17. Colaboradores Compañía Asesora de Construcción e Ingeniería S.A., CACISA</p>		
<p>18. Resumen <i>Con base en los resultados obtenidos por parte de la Compañía Asesora de Construcción e Ingeniería S.A. (CACISA) de los materiales de subrasante, que serán utilizados como cimiento para la estructura del pavimento, del proyecto en construcción de la Sección: Sifón - La Abundancia, los cuales presentan índices de plasticidad (IP) medios y altos. Se muestrearon y analizaron materiales de 3 puntos diferentes de este proyecto y con el uso del procedimiento de diseño de la "National Lime Association, NLA" se determinó el contenido de cal requerido para estabilizar estos materiales con cal, con la finalidad de mejorar la resistencia a largo plazo y durabilidad de los suelos. El presente informe muestra los resultados de laboratorio obtenidos de la resistencia a la compresión inconfiada, CBR y módulo resiliente obtenido para los materiales estudiados y evaluar así, la factibilidad de construir, con el apoyo de CACISA, tramos de prueba en el proyecto Sifón - La Abundancia.</i></p>		
<p>19. Palabras clave</p> <p style="text-align: center;">Módulo resiliente, Estabilización con cal, Compresión inconfiada</p>	<p>20. Núm. de páginas</p> <p style="text-align: center;">57</p>	

INDICE GENERAL

1. Introducción	6
1.1. Justificación e importancia	6
1.2. Objetivo General	7
1.3. Objetivos específicos	7
2. Conceptos generales	8
2.1. Factores que se deben considerar	8
2.2. Propiedades requeridas de un suelo para ser estabilizado con cal.....	8
3. Metodología de diseño de la "National Lime Association (NLA)"	11
4. Esquema experimental	15
5. Resultados obtenidos	17
5.1 Detalles generales del Proyecto en Construcción:	17
5.2. Caracterización del suelo	18
5.3. Caracterización de la cal	21
5.4. Estimación del contenido estimado inicial de cal mediante pH.....	22
5.5. Resultados obtenidos	25
5.5.1 Efecto del contenido de la cal en los Límites de Plasticidad	25
5.5.2 Efecto del contenido de la cal en los valores de humedad óptima y densidad seca en suelos estabilizados	27
5.5.3 Efecto del contenido de la cal en los valores del índice de soporte de California (CBR)	28
5.5.4 Efecto del contenido de la cal en los valores de resistencia a la compresión inconfineda.....	33
5.5.5 Valores de módulo resiliente obtenido para materiales estabilizados con cal.....	35
6. Análisis de resultados	41
6.1. Comentarios	41
6.2. Conclusiones.....	42
7. Referencias	43
8. Anexo 1: Procedimiento general de estabilización y modificación de suelo con cal.....	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Selección de los aditivos	9
Figura 2: Esquema experimental	16
Figura 3: Curvas granulométricas de suelos analizados	19
Figura 4: Selección de aditivos para los materiales estudiados.	21
Figura 5: Variación en el pH del suelo debido a variaciones en el contenido de la cal. Estación 10+020	23
Figura 6: Variación en el pH del suelo debido a variaciones en el contenido de la cal. Estación 15+390	23
Figura 7: Variación en el pH del suelo debido a variaciones en el contenido de la cal. Estación 26+650	24
Figura 8: Variación en los valores del contenido de humedad óptima y densidad seca máxima del suelo debido a variaciones en el contenido de la cal.	28
Figura 9: Variación en los valores del índice de soporte de California debido a variaciones en el contenido de la cal. Estacionamiento 10+020	31
Figura 10: Variación en los valores del índice de soporte de California debido a variaciones en el contenido de la cal. Estacionamiento 15+390	32
Figura 11: Variación en los valores del índice de soporte de California debido a variaciones en el contenido de la cal. Estacionamiento 26+650	32
Figura 12: Variación en los valores de la resistencia a la compresión inconfiada debido a variaciones en el contenido de la cal	34
Figura 13: Valores de módulo resiliente para diferentes condiciones de humedad y compactación. Estacionamiento 10+020	37
Figura 14: Valores de módulo resiliente para diferentes condiciones de humedad y compactación. Estacionamiento 15+390	37
Figura 15: Valores de módulo resiliente para diferentes condiciones de humedad y compactación. Estacionamiento 26+650	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz para la selección del aditivo estabilizador	10
Tabla 2: Recomendaciones para resistencias a compresión inconfiada.....	13
Tabla 3: Resumen de ensayos realizados	16
Tabla 4: Caracterización de suelos utilizado en el estudio	18
Tabla 5: Caracterización de suelos utilizado en el estudio	19
Tabla 6: Caracterización de la cal.....	22
Tabla 7: Cálculo del contenido estimado inicial de cal mediante pH.....	22
Tabla 8: Efecto del contenido de la cal en los Límites de Plasticidad.....	26
Tabla 9: Efecto del contenido de la cal en los valores de densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo	27
Tabla 10: Efecto del contenido de la cal en los valores del índice de soporte de California (CBR)	29
Tabla 11: Efecto del contenido de la cal y porcentaje de compactación en los valores del índice de soporte de California (CBR).....	31
Tabla 12: Efecto del contenido de la cal y porcentaje de compactación en los valores de resistencia a la compresión inconfiada.....	33
Tabla 13: Valores de módulo resiliente para diferentes condiciones de humedad y compactación	38

1. Introducción

1.1. Justificación e importancia

Por las características geológicas de Costa Rica, los suelos de subrasante presentes en gran parte de nuestro país, son suelos con altos índices de plasticidad. Estas subrasantes son utilizadas en pavimentos como cimientado para su estructura o en rutas no pavimentadas (tierra y lastre) como superficie que estarán en contacto directo con las cargas del tránsito ya sea su estado natural o mezcladas con materiales granulares en los casos de caminos de lastre.

Las características de alta plasticidad están relacionadas con baja capacidad mecánica, gran susceptibilidad a la humedad y el consecuente efecto en la consistencia o deformación plástica ante las cargas.

Como antecedente a este proyecto durante el año 2008 se presenta por parte de la Unidad de Investigación en Infraestructura Vial del LanammeUCR, un proyecto de investigación enfocado en recopilar información y experiencias en el tema de la estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas, teniendo como producto la "Guía para la estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas". Así mismo durante el año 2009 se desarrolló el proyecto denominado "Implementación de los ensayos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño de materiales estabilizados con cal".

Ambos proyectos de investigación plantean un importante marco de referencia para la puesta en campo de tramos experimentales de prueba, paso trascendental para la aplicación de las técnicas de estabilización en el país.

La estabilización de suelos con cal ha sido utilizada en otros países con gran éxito, logrando aumentar la vida útil de este tipo de rutas, disminuyendo la frecuencia en el mantenimiento que, al analizar a mediano y largo plazo resultan ser soluciones competitivas económicamente, ofreciendo mejores superficies de ruedo y que indiscutiblemente poseen un mejor desempeño ante condiciones de lluvia y humedad extrema como las presentes en CR, en donde la época lluviosa abarca más del 50% del año en muchas zonas.

Otra consideración importante es que este tipo de soluciones, no son exclusivas de carreteras de lastre, también son utilizadas en el mejoramiento de sub-rasantes dentro de una estructura de pavimento para volúmenes medios y altos de tránsito, mejorando por mucho la capacidad estructural de estos materiales, impermeabilizando el resto de capas de la estructura y evitando la migración de finos o contaminación del paquete estructural con la consecuente desmejora en su desempeño.

En relación con las zonas de conservación de rutas no pavimentadas que ha implementado el MOPT/CONAVI actualmente se evalúa la posibilidad de aplicar otras técnicas para su atención debido a que los costos asociados al acarreo de los materiales producto de la ubicación de las fuentes de extracción ha generado un gasto importante dentro del presupuesto asignado para estas labores.

Por lo anterior, existe un interés real del MOPT/CONAVI en evaluar los resultados de esta técnica y analizar la posibilidad de incorporar uno o varios tramos de prueba dentro de estas zonas de conservación, en donde de manera práctica podamos evaluar la aplicabilidad y puesta en obra de esta alternativa de la mano con el proyecto de investigación que aquí se presenta.

1.2. Objetivo General

Valorar el efecto de la cal, utilizada como aditivo estabilizador en las propiedades mecánicas y de durabilidad del material estabilizado en tramos de prueba de un proyecto en construcción con materiales finos que presentan índices de plasticidad (IP) medios y altos.

1.3. Objetivos específicos

- Verificar el cumplimiento de las propiedades del material de subrasante existente para la aplicación de técnicas y métodos de estabilización con cal.
- Evaluar las variaciones en laboratorio del comportamiento y propiedades físico-mecánicas de materiales estabilizados con cal.
- Evaluar el cumplimiento de especificaciones y desempeño para materiales estabilizados con cal en ensayos de laboratorio.
- Documentar, apoyar y evaluar la construcción, comportamiento y desempeño en campo de tramos de prueba con los mismos materiales estabilizados en laboratorio

2. Conceptos generales

2.1. Factores que se deben considerar

Los factores que deben de ser considerados en la selección de la cal como estabilizador adecuado para un suelo son; el tipo de suelo a estabilizar, el propósito para el cual la capa será utilizada, el tipo de mejora que se desea del suelo (objetivo de la estabilización), la resistencia requerida y durabilidad de la capa estabilizada, las condiciones ambientales y el costo.

Existen algunas consideraciones generales que permiten seleccionar a la cal como el estabilizador más apto para un suelo específico; estas son la granulometría y la plasticidad o textura del suelo. Como regla general la cal reaccionará con los suelos de mediana y alta plasticidad produciendo un decremento en el Índice de Plasticidad, aumento de trabajabilidad, disminución de expansión, y aumento de resistencia. La cal es utilizada para la estabilización de una gran variedad de materiales incluyendo suelos de muy baja resistencia, transformándolos en una "superficie de trabajo" o sub base; además con cantidades marginales de materiales granulares de base como las grava arcillas, gravas "sucias" pueden formar una base de alta resistencia y calidad. En la práctica es común la utilización de pequeñas cantidades de cemento Portland junto con la cal para aumentar resistencia.

2.2. Propiedades requeridas de un suelo para ser estabilizado con cal

Como procedimiento general se incluyen en este apartado una metodología para seleccionar aditivos aptos para estabilizar un suelo con propiedades específicas, incluyendo los suelos recomendados para ser estabilizados con cal. En la figura 1 se define un triángulo basado en las características granulométricas del suelo, específicamente en el tamaño de las partículas y porcentajes retenidos en ciertas mallas (Nº4 y Nº200). Este triángulo es dividido en varias áreas de suelos con tamaños de partículas similares y características de pulverización.

El proceso de selección continúa con la Tabla 1, en la cual se especifican para cada área de suelos mostrados en la figura 1, opciones de aditivos y restricciones basados en el tamaño de partícula o el índice de plasticidad (IP).

Además en la segunda columna de esta tabla se muestra una lista con los tipos de suelos (SUCS) que entrarían dentro de esta categoría, esta caracterización se utilizaría para comprobar que el área fue seleccionada correctamente.

Para iniciar con el proceso de selección de las opciones de aditivo se requiere de la información granulométrica y los límites de Atterberg del suelo. La información requerida para ingresar en la figura 1 es: el porcentaje de material pasando la malla N°200 y el porcentaje de material pasando la malla N°4 pero retenido en la malla N°200. Se ingresa a la figura 1 con estos dos valores y el área correspondiente (1A, 2A, 3, etc.) es ubicada mediante la intersección de estos dos valores.

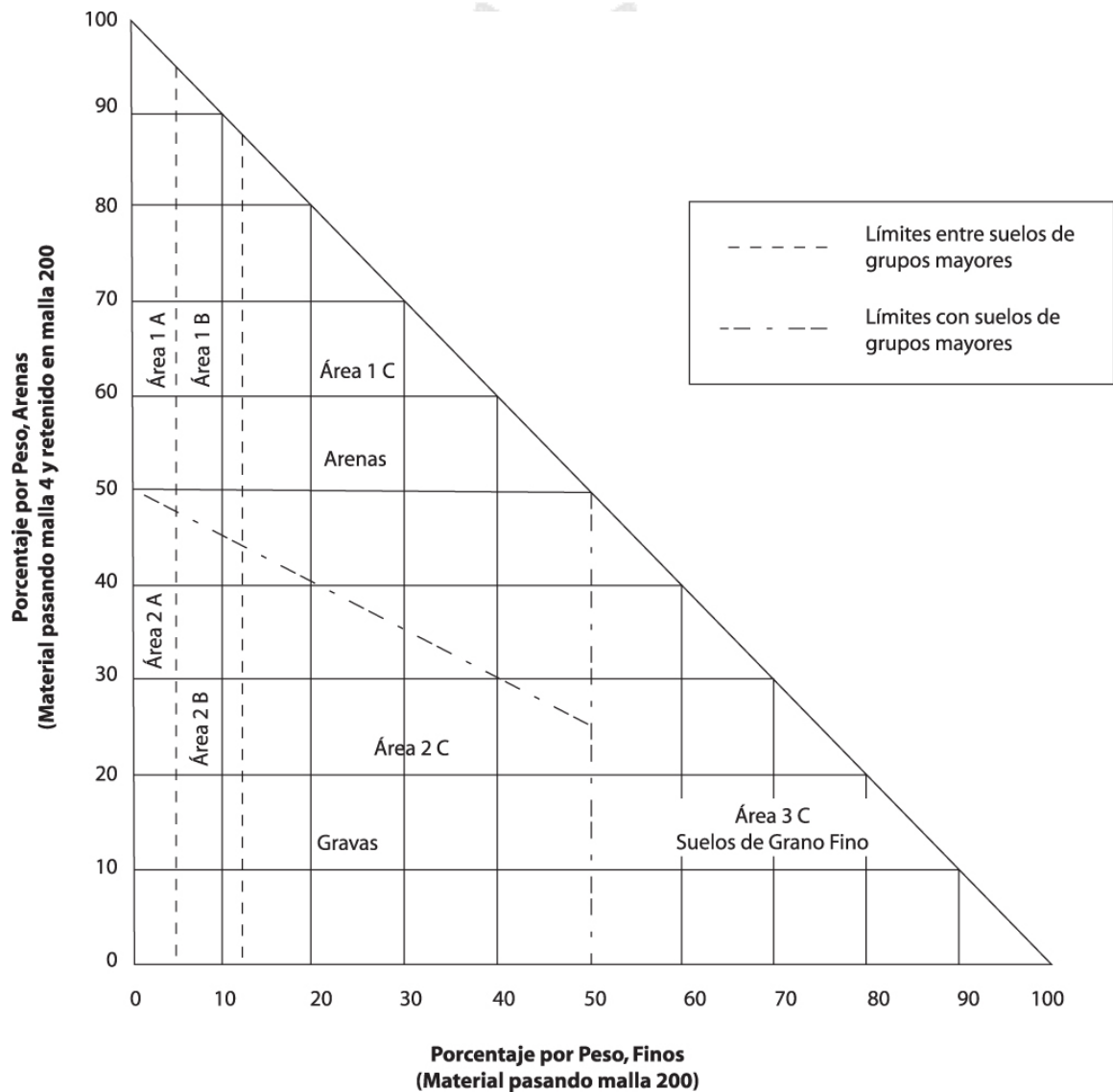


Figura 1: Selección de los aditivos

El área determinada mediante la **Figura 1** es ubicada en la primera columna de la **Tabla 1** y el tipo de suelo podrá ser chequeado en la segunda columna. Las opciones de aditivos para la

estabilización según el tipo de suelo son propuestos en la tercer columna y las restricciones para el uso de cada aditivo (incluyendo la cal) son presentadas en las columnas siguientes; restricciones establecidas para prevenir el uso de algunos aditivos estabilizadores bajo condiciones particulares del suelo, para las cuales no son aplicables.

Tabla 1: Matriz para la selección del aditivo estabilizador

Área	Clase de Suelo	Tipo de estabilizador Aditivo recomendado	Restricción de LL E IP del suelo	Restricción en porcentaje pasando la malla No. 200	Comentarios
1A	SW ó SP	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 25		
1B	SW-SM ó SP-SM ó SW-SC ó SP-SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no exceda a 30 IP no exceda a 12 IP no exceda a 25		
1C	SM ó SC Ó SM-SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no menor de 12 IP no exceda a 25	No exceda 30% por peso	
2A	GW ó GP	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 25		Material bien graduado. Debe contener al menos 45% por peso del material pasando la malla No. 4
2B	GW-GM ó GP-GM ó GW-GC ó GP-GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no exceda a 30 IP no menor de 12 IP no exceda a 25		Material bien graduado. Debe contener al menos 45% por peso del material pasando la malla No. 4
2C	GM ó GC Ó GM-GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no menor de 12 IP no exceda a 25	No exceda 30% por peso	Material bien graduado solamente
3C	CH ó CL Ó MH ó ML ó OH ó OL ó ML-CL	(1) Cemento Portland (2) Cal	LL menor de 40 e IP menor de 10 IP no menor de 12		Materiales orgánicos y altamente ácidos que se encuentran dentro de esta área no son susceptibles a la estabilización por mecanismos ordinarios.

^a La clasificación del suelo corresponde a MIL-STD-619B. Restricción en el límite líquido y el índice de plasticidad (IP) está de acuerdo con el Método 103 en MIL-STD-621A.

^b $IP \leq 20 + 50 - \text{porcentaje pasando malla No. 200}$

3. Metodología de diseño de la “National Lime Association (NLA)”

El procedimiento descrito a continuación fue generado para la estabilización de suelos estabilizados con cal y no solamente para “mejorarlo” mediante la reducción de su plasticidad o humedad. Este procedimiento intenta asegurar la resistencia a largo plazo y durabilidad de un suelo estabilizado con cal. Otros ensayos de laboratorio como la medición del decremento en el contenido de humedad del suelo o la reducción del índice de plasticidad (IP), son más apropiados cuando lo que se busca es mejorar las propiedades de un suelo y no estabilizarlo.

La National Lime Association evaluó varios procedimientos para el diseño de mezclas estabilizadas con cal con el fin de generar uno definitivo que pudiera ser utilizado con confianza para diversos tipos de suelo y climas.

Paso 1: Evaluación inicial del suelo

Propósito: Evaluar propiedades claves del suelo como un paso inicial para determinar si el suelo es adecuado para a ser estabilizado con cal.

Procedimiento: Mediante ASTM C136 determine la cantidad de suelo pasando la malla de 75um (Nº200) y el ASTM D4318 (método húmedo para determinar el índice de plasticidad (IP)).

Criterio: Suelos con al menos 25% de material pasando la malla de 75um y que tenga un IP de 10 o mayor son candidatos a ser estabilizados con cal. Suelos con IP inferiores a 10 han sido estabilizados con éxito, garantizando que el pH y resistencia especificada más adelante pueden ser cumplidos.

Paso 2: Determinación de la demanda aproximada de cal

Propósito: Determinar la mínima cantidad de cal requerido para la estabilización.

Procedimiento: Utilice el procedimiento ASTM D6276, también conocido como el ensayo “Eades-Grim”.

Criterio: El porcentaje más bajo de cal en el suelo que alcanza un pH en laboratorio de 12,4 (Sección plana de un del gráfico pH vrs %cal) es el porcentaje mínimo de cal para estabilizar un suelo.

Paso 3: Determinación del contenido de humedad óptimo y la máxima densidad seca del suelo tratado con cal.

Propósito: Determinar el contenido de humedad óptimo y la densidad máxima del suelo luego de que la cal ha sido adicionada. Esta evaluación es requerida ya que estos parámetros varían con la cal.

Procedimiento: Prepare una mezcla de suelo, cal y agua, al porcentaje mínimo de cal determinado en el paso 2 y utilizando un contenido de agua igual al contenido de humedad óptima (COH) + 2-3%. Almacene la muestra en una bolsa sellada e impermeable por 1 – 24 horas. Determine el COH y la DMS de la mezcla utilizando el procedimiento ASTM D698 (Próctor estándar).

Criterio: Determinar el COH y la DMS para el paso 4.

Paso 4: Fabricación de los especímenes para compresión inconfiada (CI).

Propósito: Fabricar los especímenes para el ensayo de CI, paso 6

Procedimiento: Utilizando la ASTM D5102 procedimiento B, fabrique un mínimo de 2 especímenes de cal, suelo y agua utilizando una cantidad (porcentaje) de cal igual al determinado en el paso 2 al $COH_{paso3} (\pm 1\%)$. La muestra debe de ser almacenada en una bolsa sellada e impermeable por 1 – 24 horas antes de fabricar el espécimen de ensayo.

Consideraciones: Cuando se utiliza cal viva, la mezcla deberá ser almacenada por 20-24 horas para asegurar la hidratación. Se pueden fabricar especímenes adicionales si otros ensayos son requeridos. En algunos casos puede requerirse la fabricación de especímenes a contenidos de cal superiores a los obtenidos en el paso 2. Estos especímenes adicionales pueden utilizarse para determinar la CI de las mezclas suelo cemento a contenidos de cal superiores para asegurarse que el criterio de CI se logra (paso 6).

Paso 5: Curado y confinamiento de los especímenes de compresión inconfiada (CI).

Propósito: Aproximar de manera acelerada el curado en campo y humedad.

Procedimiento: Inmediatamente después de la fabricación de los especímenes, envuélvalos en plástico y selle en una bolsa impermeable. Cure los especímenes por 7 días a 40°C. Someta los especímenes por 24 horas a un remojo por capilaridad.

El remojo por capilaridad debe ser realizado removiendo el espécimen de la envoltura de plástico y de la bolsa impermeable, luego deben de cubrirse en una tela absorbente y deben de colocarse sobre una piedra porosa. El nivel del agua debe alcanzar la parte superior de la piedra y

estar en contacto con la tela para lograr la absorción por capilaridad, pero el espécimen de suelo no debe de estar en contacto directo con el agua.

Paso 6: Determinación de la Compresión Inconfinada CI de los especímenes curados y condicionados en humedad.

Propósito: Determinar la CI del suelo estabilizado para asegurar un desempeño adecuado en campo en ambientes de congelamiento descongelamiento y condiciones de humedad constantes.

Procedimiento: Utilice el procedimiento ASTM D5102 B para determinar la CI de los especímenes curados y condicionados en humedad. La CI es el promedio de al menos dos especímenes.

Criterio: La CI mínima depende del uso que se le vaya a dar al suelo, de la cantidad de material cubriendo el suelo estabilizado, la exposición a condiciones de saturación y del número esperado de ciclos de congelamiento descongelamiento durante el primer invierno de exposición. Valores sugeridos para CI se presentan en la **tabla 2**.

Tabla 2: Recomendaciones para resistencias a compresión inconfinada

Recomendaciones para resistencias a compresión inconfinada de mezclas de suelo-limoso.				
Uso previsto	Saturación por 8 días (KPa)	Ciclos congelación-descongelación ^a		
		3 ciclos (KPa)	7 ciclos (KPa)	10 ciclos (KPa)
SubBase				
Pavimento rígido /Losas	345	345	621	827
Pavimento flexible (>25 cm) ^b	414	414	689	896
Pavimento flexible (20 cm – 25 cm) ^b	483	483	689	965
Pavimento flexible (12.5 cm – 20 cm) ^b	621	621	896	1103
Base				
	896	896	1172	1379

Notas:

a – Número de ciclo congelación-descongelación esperados en la capa suelo-limosa durante el primer invierno.

b – Total de espesor del pavimento sobre la subbase.

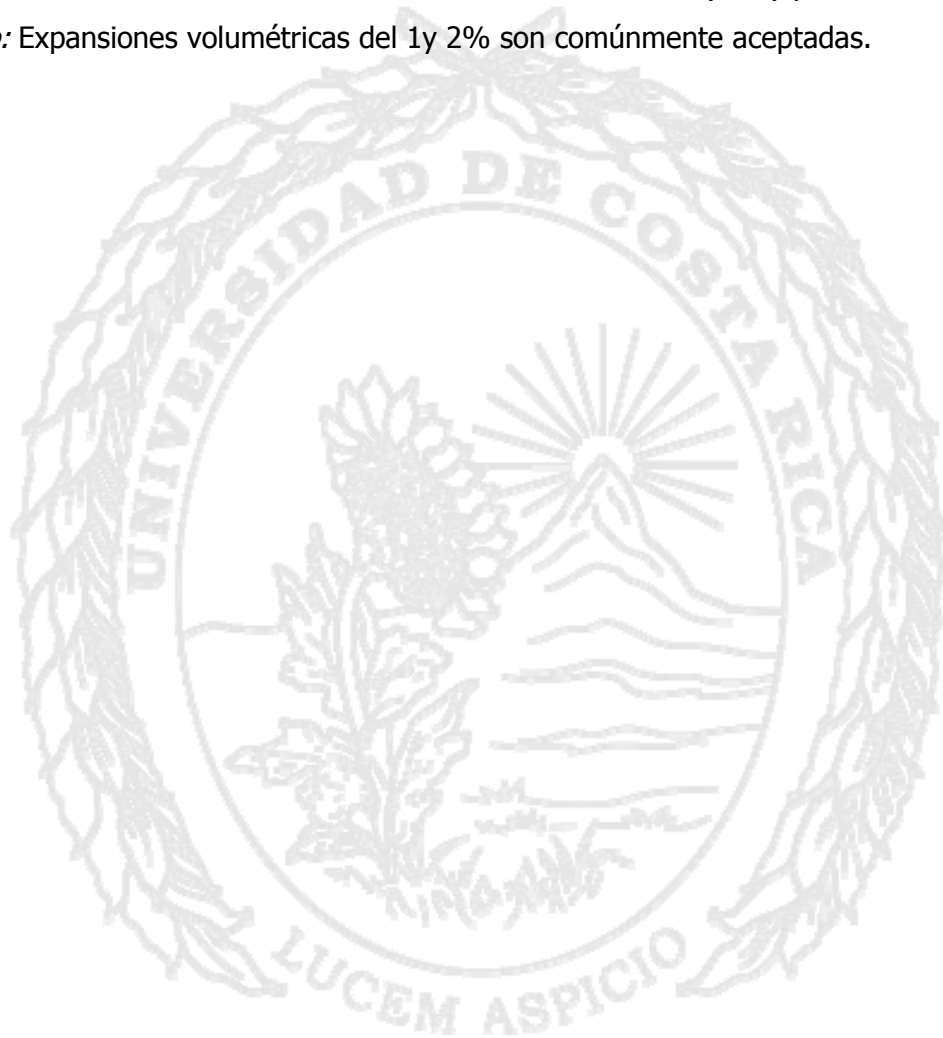
Fuente: Adaptado de National Lime Association, Technical Brief: Mixture and Testing Procedures for Lime Stabilized Soils, 2004.

Paso 7: Determinación del cambio características de expansión. (solo en suelos expansivos)

Propósito: Evaluar la capacidad del suelo estabilizado con cal para expandirse.

Procedimiento: Anote las dimensiones vertical y circunferencia de los especímenes fabricados en el paso 5, antes de realizar el humedecido por capilaridad. Luego del humedecido tome las nuevas dimensiones. Calcule el cambio de volumen entre la condición inicial (seca) y húmeda.

Criterio: Expansiones volumétricas del 1y 2% son comúnmente aceptadas.

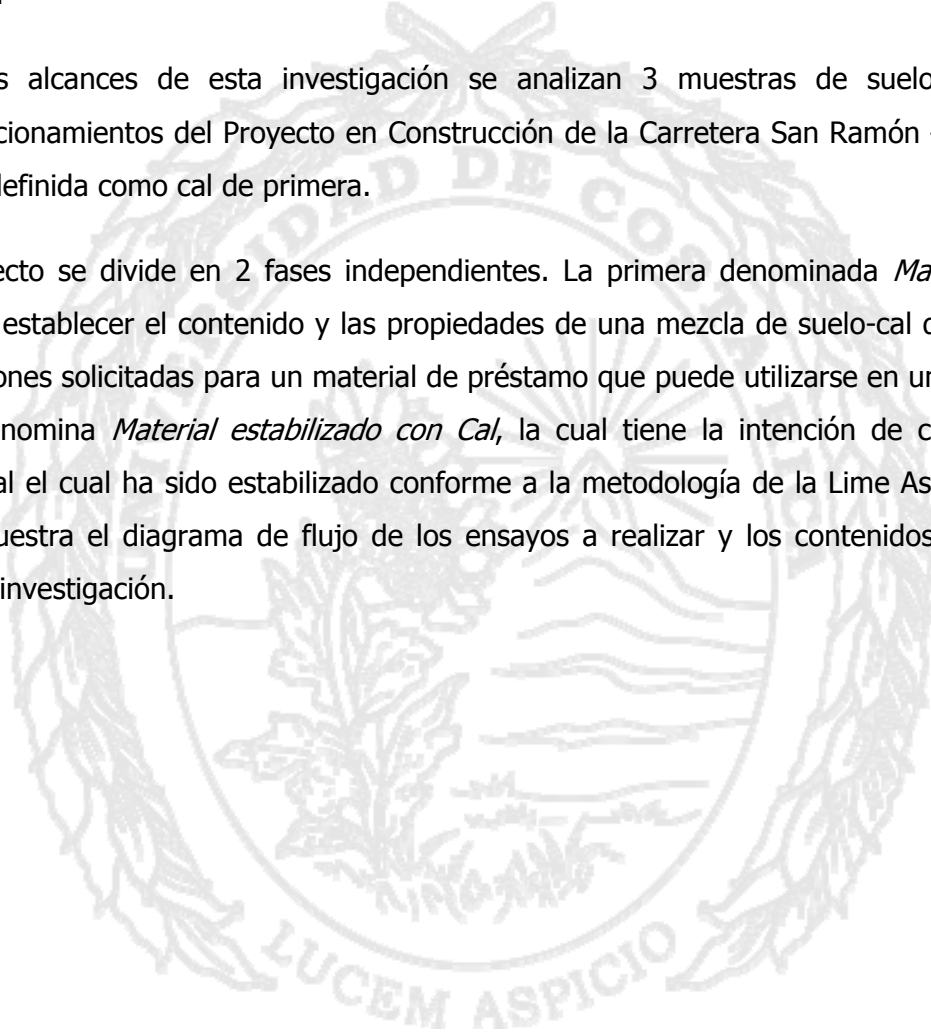


4. Esquema experimental

Esta investigación tiene como objetivo la implementación del procedimiento de diseño de suelos estabilizados con cal a los materiales de suelo de un proyecto que se encuentra en construcción y evaluar su desempeño en campo respecto al cumplimiento de las especificaciones internacionales.

Para los alcances de esta investigación se analizan 3 muestras de suelo obtenidas de diferentes estacionamientos del Proyecto en Construcción de la Carretera San Ramón – San Carlos; y un tipo de cal definida como cal de primera.

El proyecto se divide en 2 fases independientes. La primera denominada *Material mejorado con Cal*, busca establecer el contenido y las propiedades de una mezcla de suelo-cal que cumpla con las especificaciones solicitadas para un material de préstamo que puede utilizarse en una carretera. La segunda se denomina *Material estabilizado con Cal*, la cual tiene la intención de caracterizar una mezcla suelo-cal el cual ha sido estabilizado conforme a la metodología de la Lime Association. En la figura 1, se muestra el diagrama de flujo de los ensayos a realizar y los contenidos de cal que se utilizarán en la investigación.



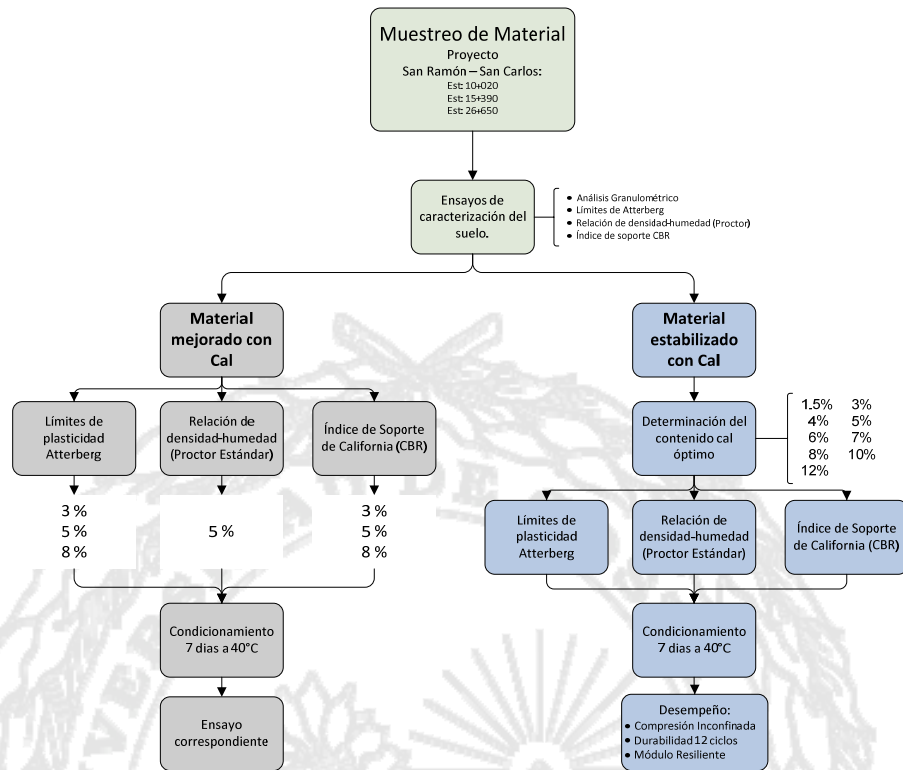


Figura 2: Esquema experimental

A continuación, en la tabla 3, se presenta el resumen de ensayos realizados:

Tabla 3: Resumen de ensayos realizados

Muestra	Material mejorado con Cal			Material estabilizado con Cal		
	Límites de plasticidad	Proctor Modificado	CBR	Contenido Inicial de Cal	CBR	Compresión Inconfinada
Suelo 1	3% cal 5% cal 8% cal	5% cal	3% cal 5% cal	1.5% 3% 4% 5% 6% 7% 8% 10% 12%	8% de cal	2 especímenes al 6 y 8% de cal
Suelo 2	3% cal 5% cal 8% cal	5% cal	3% cal 5% cal	1.5% 3% 4% 5% 6% 7% 8% 10% 12%	8% de cal	2 especímenes al 6 y 8% de cal
Suelo 3	3% cal 5% cal 8% cal	5% cal	3% cal 5% cal	1.5% 3% 4% 5% 6% 7% 8% 10% 12%	8% de cal	2 especímenes al 6 y 8% de cal

5. Resultados obtenidos

5.1 Detalles generales del Proyecto en Construcción:

Gracias a esta obra, se podrá acortar distancias entre la Región Norte de la Provincia de Alajuela y la Región Central del país, una vez se concrete la construcción de los tramos Interamericana-Sifón y La Abundancia-Ciudad Quesada, generando un gran impacto en el desarrollo de la región y zonas de influencia.

La Sección: Sifón - La Abundancia, como parte del Proyecto Naranjo- Florencia fue diseñado en su totalidad, excepto los puentes, por la empresa Moh and Associates, Inc., contratada por el Gobierno de Taiwán, tomando como referencia el corredor trazado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

El proyecto contempla la construcción de la vía en una longitud de 29.73 km con todas sus obras de drenaje, de canalización de aguas, protección de taludes y obras de arte además de la construcción de 9 puentes (Barranca de 314.4 mts; Río Espino de 234.4 mts; Quebrada Yeguas de 108.4 mts; Quebrada Laguna de 132.4 mts; Río Tapezco de 273.4 mts; Quebrada Arena de 113.4 mts; Río Seco de 148.4 mts; Río La Vieja de 138.4 mts; Río Ron Ron de 114.4 mts).

La obra fue diseñada a dos carriles con un ancho de 3.65 mts cada uno, con espaldones a ambos lados de 1.80 mts de ancho. En sectores montañosos con pendientes fuertes se diseñó un tercer carril para realizar el ascenso. La velocidad de diseño es de 55 kms/hora.

Respecto al diseño de la estructura del pavimento se espera que la misma contenga: Una capa de préstamo seleccionado para acabado de 25 cm. de espesor cuando el CBR de la subrasante sea menor que un 5,50 %. Una capa de subbase granular de 25 cm. de espesor. Una capa de base granular de 20 cm. de espesor. Una capa asfáltica de 17 cm. de espesor, la cual se colocará en dos etapas, a saber, 12,50 cm. de espesor en una primera etapa y luego el espesor restante que se colocará en el año que indique el estudio que se realizará a partir del año 7. Actualmente avanzan los trabajos a nivel de construcción y habilitación del corredor vial

5.2. Caracterización del suelo

Para la preparación de los especímenes de ensayo se utilizó material proveniente de la subrasantes Sifón – La Abundancia, la selección de los puntos de muestreo se realizó tomando en consideración los resultados previamente obtenidos de la caracterización del suelo en el proyecto, por parte de la Compañía Asesora de Construcción e Ingeniería S.A., CACISA. Quienes también permitieron muestrear materiales en 3 puntos del proyecto en construcción Sifón - La Abundancia, cuyas las propiedades se detallan en la tabla 4 y figura 3, con los cuales se verificó el cumplimiento de las condiciones para ser estabilizados con cal.

Tabla 4: Caracterización de suelos utilizado en el estudio

Parámetro	Estacionamiento			
	Est. 10+020	Est. 15+390	Est. 26+650	
Granulometría	% Pas N° 4	100.0	100.0	100.0
	% Pas N° 10	100.0	100.0	100.0
	% Pas N° 20	97.3	98.4	87.5
	% Pas N° 40	92.8	96.6	79.0
	% Pas N° 60	85.1	94.0	73.7
	% Pas N° 100	70.4	87.4	67.8
	% Pas N° 140	58.4	81.7	63.5
	% Pas N° 200	46.9	77.0	58.9
		28.7	32.7	41.0
		25.7	25.6	38.0
		20.7	19.7	30.9
		18.7	16.0	27.8
		15.9	11.5	24.9
		11.0	9.4	20.9
Límites de Atterberg	LL	64	66	78
	LP	42	43	58
	IP	22	23	20
Próctor Estándar y CBR	Wopt (%)	37.5	45.5	50
	γ_d max (kg/m ³)	1296	1148	1116
	CBR (90%)	12	2	8
	CBR (95%)	19	3	14
Clasificación	SUCS	MH	MH	MH
	AASHTO	A-7-5 (17)	A-7-5 (17)	A-7-5 (16)

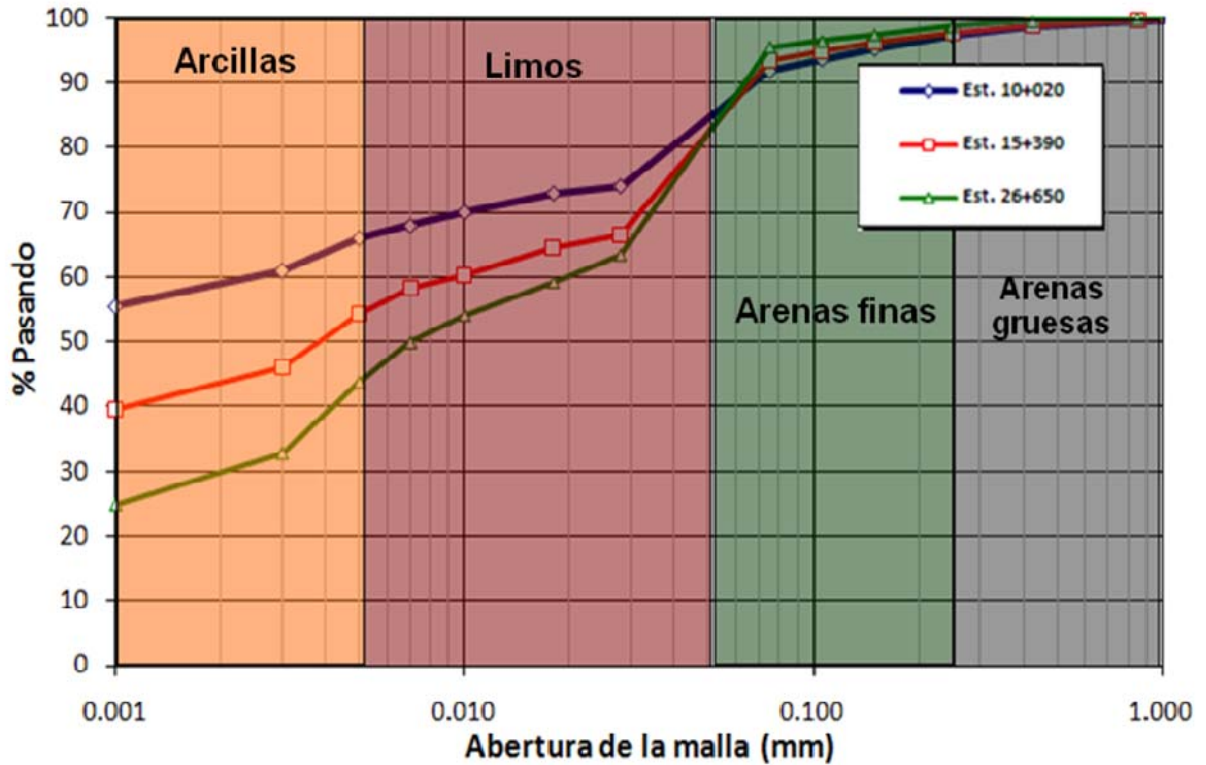


Figura 3: Curvas granulométricas de suelos analizados

Empleando los resultados obtenidos de las curvas granulométricas y la clasificación general de materiales de la ASTM, para cada una de las muestras estudiadas, se puede observar en la **tabla 5**, la cantidad de partículas presentes en cada uno de los intervalos; siendo de mayor interés las partículas que se encuentran dentro del intervalo de las arcillas (tamaño comprendido entre 0.001-0.005 mm), puesto que son las partículas que reaccionarán con la cal.

Tabla 5: Caracterización de suelos utilizado en el estudio

Clasificación de materiales ASTM				
		Est. 10+020	Est. 15+390	Est. 26+650
Arena Gruesa	0.25 -2.0 mm	2.9	2.3	1.3
Arena Fina	0.05 - 0.25 mm	5.4	4.4	3.2
Limo	0.005 - 0.05 mm	25.7	39.1	51.7
Arcilla	0.001 - 0.005 mm	10.5	14.6	18.9
Arcilla Coloidal	< 0.001	55.5	39.6	24.9

Según el sistema AASHTO de clasificación de suelos los suelos presentes se pueden clasificar como materiales limo-arcillosos del subgrupo A-7-5. Los materiales de este grupo tienen un índice de

plasticidad moderado en relación con el límite líquido, los cuales pueden ser muy elásticos y estar sujetos a grandes cambios de volumen.

Entre las propiedades físicas esperadas para este tipo de material se tiene las siguientes:

Es un terreno arcilloso sin material grueso, con poca arena fina. Presenta propiedades elásticas elevadas que pueden ser perjudiciales. Baja permeabilidad, con una capilaridad de regular a alta. En época lluviosa se pueden presentar cambios volumétricos que pueden ser perjudiciales. Si el material es utilizado naturalmente, su uso como capa superficial puede ir de malo a pésimo. En el caso de una base o subbase será regular a pésimo. En el caso de terraplenes su uso puede ir de malo a pésimo.

Para la compactación de este tipo de materiales se recomienda el uso de Rodillos de "Pata de Cabra"; aplanadoras de 3 rodillos; rodillos Tandem; y Compactadores de rodillos de llantas. El terreno después de compactado tendrá un comportamiento regular a bueno en tiempo seco, pero en tiempo lluvioso su comportamiento puede ser malo. Además, en época de lluvias se pone resbaladizo y los pavimentos fallan por falta de base firme. Cuando se humedece o se seca sufre hinchamientos y contracciones perjudiciales. Presenta, además, una elasticidad perjudicial que impide una buena compactación. Bajo estas condiciones, la bibliografía recomienda la adición de material granular y, además, un buen sistema de drenajes. Si el material tiene mucho contenido de humedad se pueden colocar capas aislantes de piedra caliza, piedra triturada, o grava, impermeabilizándolas con aceites asfálticos, a fin de evitar que la arcilla suba y se meta entre los intersticios.

Respecto al tipo de pavimento recomendado, se puede decir que, si el suelo ha sido mejorado y hay buenos drenajes, puede colocarse un pavimento bituminoso con buenas subbase y base. En caso contrario, es preferible emplear pavimentos de concreto sobre bases granulares, cuyo espesor debería ser no menor de 23 cm en los bordes y 18 cm en el centro.

Para la selección de un aditivo adecuado para mejorar las propiedades mecánicas del suelo, se utilizó la caracterización de los suelos presentada en la **figura 1** y la **tabla 1**, y con base en el contenido de arenas y el contenido de finos, fue posible determinar que los tres suelos analizados se encuentran en la zona 3C, correspondiente a suelos de grano de fino (ver figura 4). Además, de acuerdo a la

clasificación en el sistema SUCS, y los límites de Atterberg se puede observar que estos suelos son ideales para ser estabilizados con Cal.

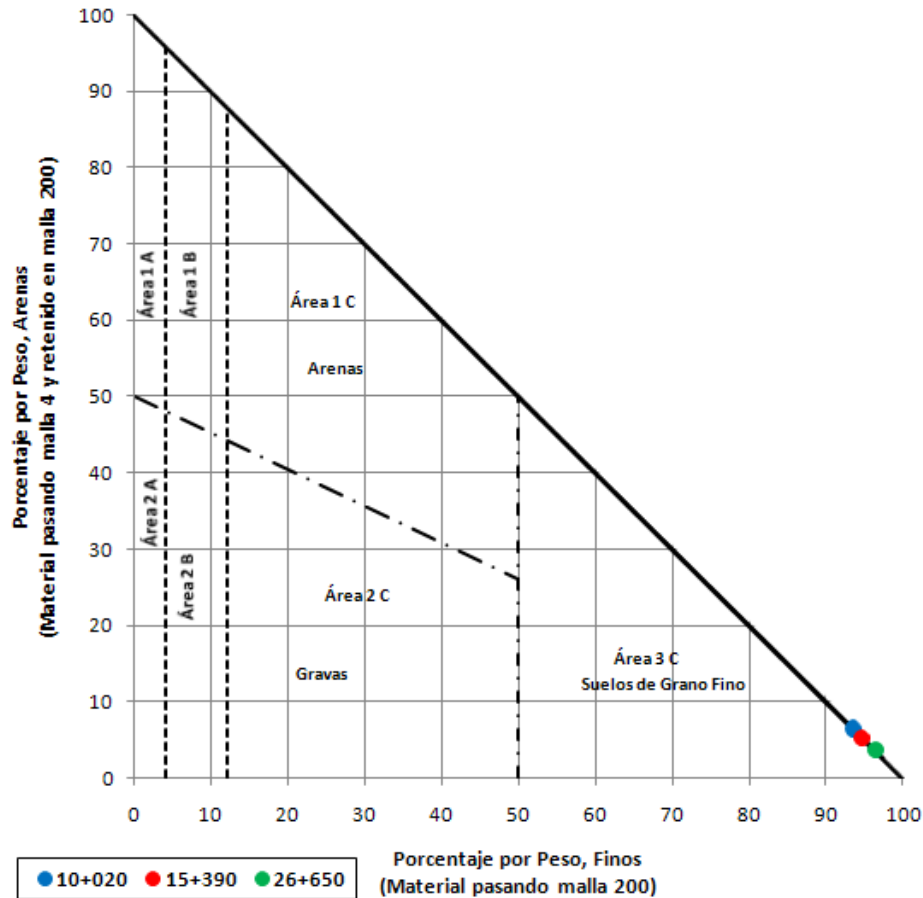


Figura 4: Selección de aditivos para los materiales estudiados.

5.3. Caracterización de la cal

En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos para los parámetros de óxido de calcio, óxido de magnesio, dióxido de carbono, porcentaje de humedad, nivel de acidez y aspectos de granulometría, de la cal empleada en la investigación.

Tabla 6: Caracterización de la cal

Parámetro	Muestra 1	Especificación
Óxido de Calcio (% m/m)	76 ± 1	90% mín
Óxido de Magnesio (% m/m)	0,83 ± 0,05	
Dióxido de carbono (% m/m)	0.8 ± 0,5	5% máx
Malla 30 (600µm)	0,35 ± 0,07	3% máx
Malla 200 (75µm)	12,1 ± 0,4	25% máx
Charola	87,8 ± 0,6	

5.4. Estimación del contenido estimado inicial de cal mediante pH

En la **tabla 7**, se presentan los resultados obtenidos con el ensayo "Eades-Grim" (ASTM D6276), para determinar el porcentaje mínimo de cal para estabilizar un suelo, el cual corresponde cuando mezcla de suelo y cal alcanza un pH en laboratorio de 12,4 (Sección plana de un del gráfico pH vrs %cal). En las **figuras 5, 6 y 7** muestran los porcentajes óptimos de cal para los suelos estudiados.

Tabla 7: Cálculo del contenido estimado inicial de cal mediante pH.

% Cal	Masa agua (gr)	Estacionamiento								
		10+020			15+390			26+650		
		Masa cal (gr)	pH	Temp (°C)	Masa cal (gr)	pH	Temp (°C)	Masa cal (gr)	pH	Temp (°C)
1.5	100	0.464	10.0	25.8	0.464	10.5	24.4	0.464	11.0	24.5
3	100	0.929	11.7	25.9	0.929	12.0	24.4	0.929	12.1	24.5
4	100	1.239	12.0	26.0	1.239	12.3	24.0	1.239	12.3	24.9
5	100	1.549	12.1	25.7	1.549	12.2	24.8	1.549	12.3	24.0
6	100	1.859	12.2	25.4	1.859	12.3	24.6	1.859	12.4	24.1
7	100	2.168	12.2	25.6	2.168	12.3	24.3	2.168	12.4	25.2
8	100	2.479	12.5	24.5	2.479	12.5	24.7	2.479	12.4	25.5
10	100	3.098	12.6	24.5	3.098	12.3	25.0	3.098	12.3	25.4
12	100	3.717	12.6	24.3	3.717	12.1	24.1	3.717	12.2	25.4

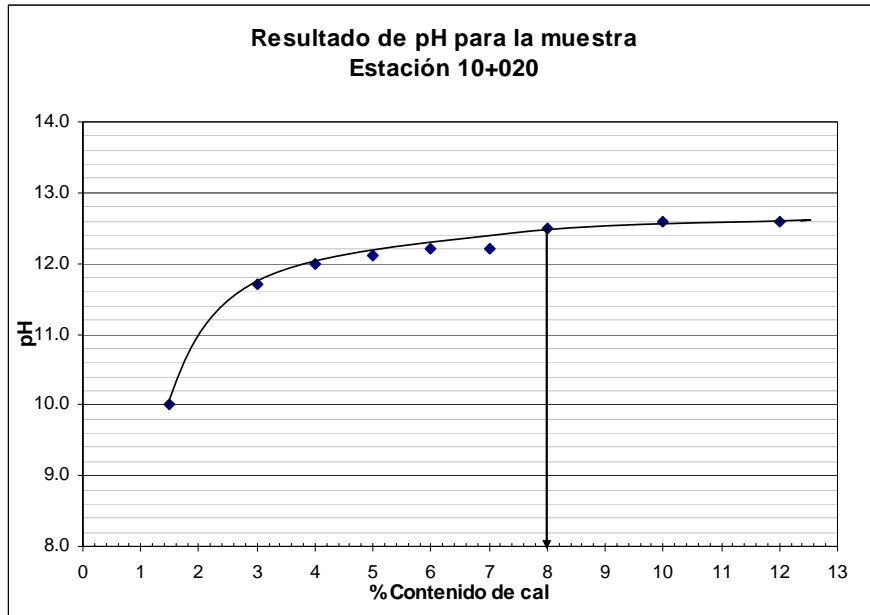


Figura 5: Variación en el pH del suelo debido a variaciones en el contenido de la cal. Estación 10+020

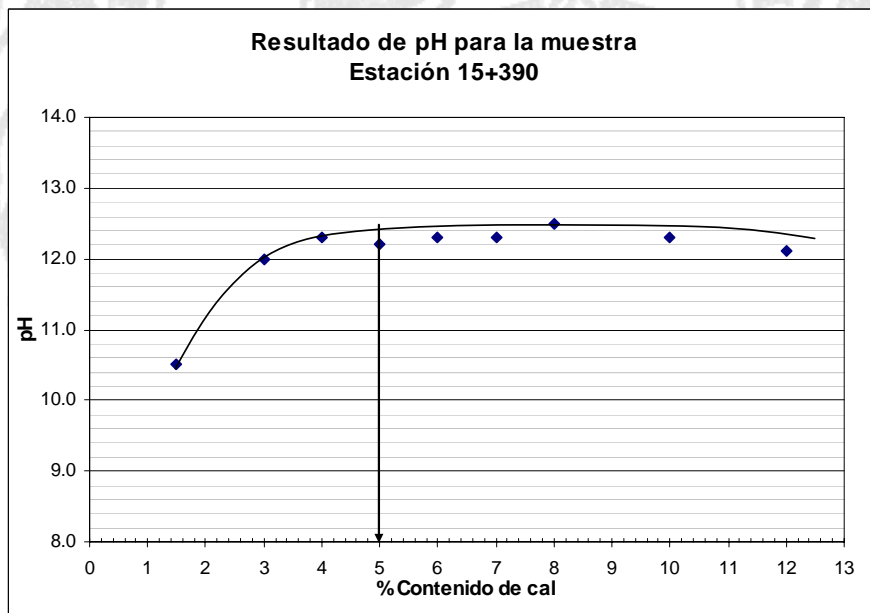


Figura 6: Variación en el pH del suelo debido a variaciones en el contenido de la cal. Estación 15+390

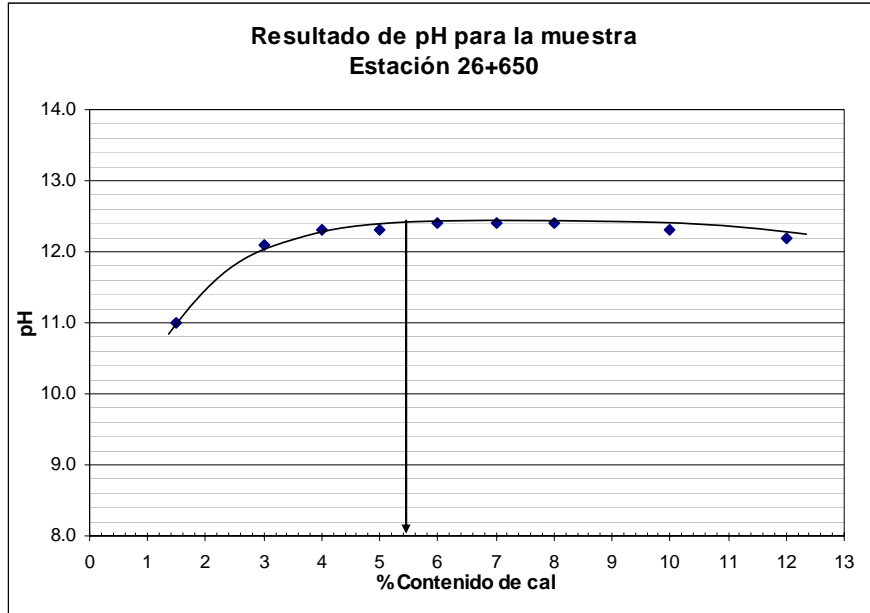
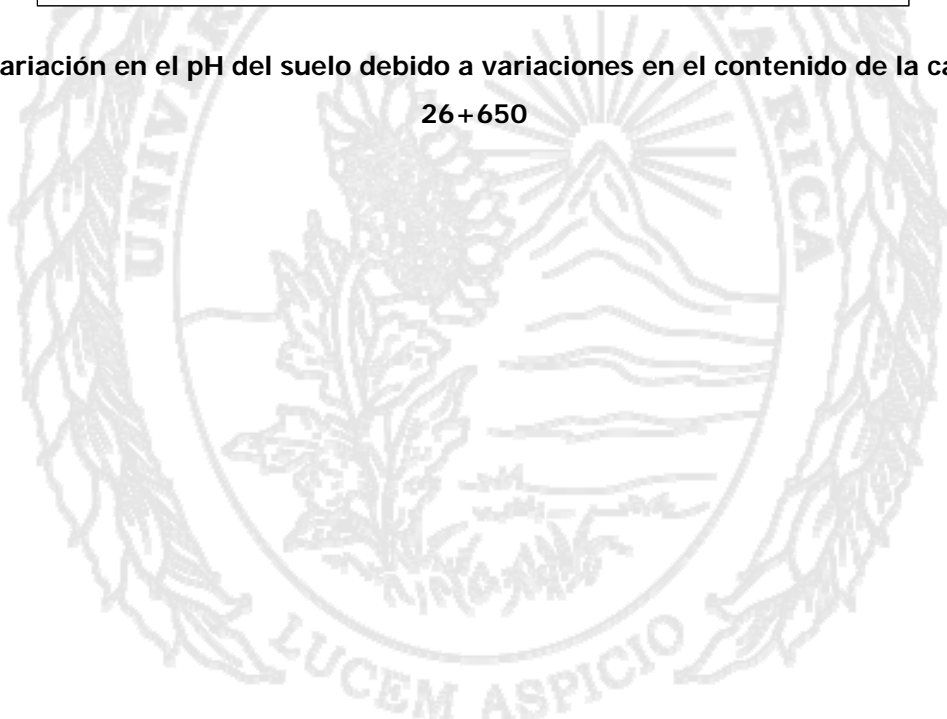


Figura 7: Variación en el pH del suelo debido a variaciones en el contenido de la cal. Estación 26+650



5.5. Resultados obtenidos

5.5.1 Efecto del contenido de la cal en los Límites de Plasticidad

Con la finalidad de evaluar el efecto que tiene la cal en los límites de plasticidad de los suelos estabilizados, se procedió a realizar el Procedimiento de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos, similar a lo propuesto por el procedimiento de ensayo ASTM D4318. Sin embargo, se realizaron pequeñas al procedimiento de ensayo con la finalidad de valorar los efectos producidos por la cal, tomando en cuenta los cuidados que se usan en la metodología de diseño de la NLA aplicadas al procedimiento ASTM D4318, estas variaciones se mencionan a continuación:

- Realizar la mezcla suelo cal con materiales completamente secos
- Agregar un contenido de agua conocido a la mezcla suelo cal e introducir la mezcla suelo-cal-agua en bolsas plásticas por un periodo no menor de 24 horas antes de realizar el ensayo de Límites de Plasticidad. Para efectos de este estudio se utilizó un contenido de humedad cercano al 35%, puesto que el ensayo de Proctor Estándar para los suelos naturales en todos los casos fue superior a este valor.
- Además, con la finalidad de evaluar los efectos que tiene el agua y la cal en tiempo en la mezcla suelo-cal, también se agregó un contenido de agua conocido (contenido de humedad al 35%, por la misma razón anterior) a la mezcla suelo cal y se introdujo bolsas plásticas por un periodo de 7 días a un temperatura de 40°C antes de realizar el ensayo de Límites de Plasticidad.

Los resultados obtenidos se muestran en la **tabla 8** que se presenta a continuación:

Tabla 8: Efecto del contenido de la cal en los Límites de Plasticidad

Estación	Contenido Cal	Condicionamiento	Límite Líquido (LL)	Límite Plástico (PL)	Índice de plasticidad (PI)
Est. 10+020	0 (natural)	-	64	42	22
	3%	24 hrs	64	40	24
		7 d	63	40	23
	5%	24 hrs	59	40	19
		7 d	54	40	14
	8%	24 hrs	54	43	11
7 d		53	45	8	
Est. 15+390	0 (natural)	-	66	43	23
	3%	24 hrs	61	45	16
		7 d	56	43	13
	5%	24 hrs	54	46	9
		7 d	53	45	8
	8%	24 hrs	55	47	9
7 d		53	46	7	
Est. 26+650	0 (natural)	-	78	58	19
	3%	24 hrs	61	49	12
		7 d	60	52	8
	5%	24 hrs	56	50	6
		7 d	57	51	6
	8%	24 hrs	61	51	9
7 d		58	52	6	

Como se puede notar en los resultados obtenidos la incorporación de la cal modificó los valores de los límites de plasticidad, siendo estas modificaciones más evidentes conforme se aumenta el contenido de cal adicionada. Por otro lado, se puede notar que las variaciones en los límites de plasticidad son mayores después de introducir las muestras de suelo-cal-agua en bolsas plásticas por un periodo de 7 días a una temperatura de 40°C antes de realizar el ensayo de Límites de Plasticidad; comportamiento que es congruente con el esperado para materiales mejorados con cal, ya que la cal es un aditivo que mejora sucesivamente las propiedades con el paso del tiempo. Así por ejemplo, si se toma la muestra del suelo del estacionamiento 15+390 se puede notar que el límite líquido para el suelo natural es 66, y con la incorporación de la cal este valor se reduce, mientras que el valor del límite plástico para el suelo natural es de 43 y con la incorporación de la cal este valor se incrementa ligeramente. La variación de ambos valores hace que el valor del índice de plasticidad se reduzca de manera considerable de forma tal que un suelo con un índice de plasticidad de 23 se reduzca a un valor de 7,

lo que puede ser asociado un mejor comportamiento en campo, puesto que ya no se esperarán cambios volumétricos importantes por efecto del contenido de humedad presente en la subrasante.

5.5.2 Efecto del contenido de la cal en los valores de humedad óptima y densidad seca en suelos estabilizados

Con la finalidad de evaluar el efecto que tiene la cal en los suelos estabilizados con cal se procedió a preparar una mezcla de suelo y un contenido de cal de 5%, la cual fue almacenada en una bolsa sellada e impermeable 24 horas antes de realizar la compactación del espécimen. En este caso, la mezcla suelo-cal fue guardada con un contenido de agua de 35%, el cual fue seleccionado con base en el contenido de humedad óptima de la muestra de suelo natural con el procedimiento de ensayo ASTM D698 (Próctor estándar), y nuevamente se volvió a realizar el ensayo ASTM D698 con una energía de compactación estándar. Los resultados obtenidos se presentan en la **tabla 9** y en el **figura 8**.

Tabla 9: Efecto del contenido de la cal en los valores de densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo

	Estacionamiento					
	10+020		15+390		26+650	
	Natural	5% Cal	Natural	5% Cal	Natural	5% Cal
Contenido de humedad óptimo (%)	37.5	38.0	45.5	44.0	50.0	53.5
Densidad seca máxima estándar (kg/m ³)	1296.0	1246.0	1148.0	1190.0	1116.0	1059.0

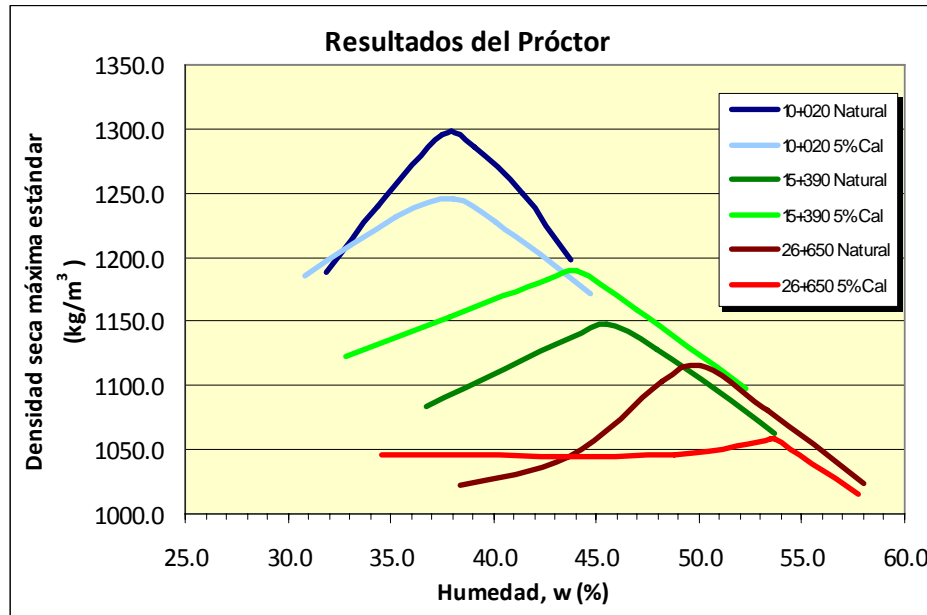


Figura 8: Variación en los valores del contenido de humedad óptima y densidad seca máxima del suelo debido a variaciones en el contenido de la cal.

Como se puede observar en la figura anterior, la incorporación de la cal influye en los valores del contenido de humedad óptima y densidad seca máxima del suelo, en términos generales se dice que la incorporación de la cal permite aumentar el contenido de humedad óptimo de compactación a la vez que se reduce la densidad máxima seca del suelo compactado, comportamiento acorde con el típico esperado para los materiales mejorados con cal.

5.5.3 Efecto del contenido de la cal en los valores del índice de soporte de California (CBR)

Con la finalidad de evaluar el efecto que tiene la cal en los suelos estabilizados con cal en los valores del índice de soporte de California se procedió a preparar una mezcla de suelo y diferentes contenidos de cal (3%, 5%, 8%), la cual fue almacenada en una bolsa sellada e impermeable 24 horas antes de realizar la compactación, con un contenido de agua de 35%, (el cual fue seleccionado con base en el contenido de humedad óptima de la muestra de suelo natural del procedimiento de ensayo ASTM D698). Posteriormente a la compactación cada uno de los especímenes se introdujo en bolsas plásticas por un periodo de 7 días a una temperatura de 40°C antes de colocar los moldes durante los 4 días de saturación total conforme al ensayo AASHTO T193 para la determinación del índice de

soporte de California (CBR). Los resultados obtenidos se presentan en las tabla 10 y 11; y en las figuras 9, 10 y 11:

Tabla 10: Efecto del contenido de la cal en los valores del índice de soporte de California (CBR)

Estación	Contenido de Cal	Parámetro	No de Golpes		
			56	25	10
10+020	Natural	Densidad (kg/m ³)	1225.6	1132.9	1021.4
		% Compactación	95	87.4	78.8
		CBR 0.1"	19	9	2.4
		CBR 0.2"	14	6.5	2
	3% Cal	Densidad (kg/m ³)	1115.3	1044.1	914.2
		% Compactación	92	85.1	76.2
		CBR 0.1"	5.9	3.7	1.4
		CBR 0.2"	6.4	3.3	1.3
	5 % Cal	Densidad (kg/m ³)	1203	1104	1021
		% Compactación	96.5	88.6	82
		CBR 0.1"	32.8	10.2	3.62
		CBR 0.2"	25.2	7.84	3.23
8% Cal	Densidad (kg/m ³)	1064	995	926	
	% Compactación	85.4	79.8	74.3	
	CBR 0.1"	16.2	7.27	5.11	
	CBR 0.2"	16.4	7.24	5.14	

Tabla 10 (cont.): Efecto del contenido de la cal en los valores del índice de soporte de California (CBR)

Estación	Contenido de Cal	Parámetro	No de Golpes			
			56	25	10	
15+390	Natural	Densidad (kg/m ³)	1164.9	1036.4	981.3	
		% Compactación	101	90.3	85.5	
		CBR 0.1"	4	2	1	
		CBR 0.2"	4	1.3	0.6	
	3% Cal	Densidad (kg/m ³)	1115.3	1044.1	914.2	
		% Compactación	94	87.7	76.8	
		CBR 0.1"	16.5	7.5	2.7	
		CBR 0.2"	13.6	6.6	2.6	
	5 % Cal	Densidad (kg/m ³)	1145	1040	925	
		% Compactación	96.2	87.4	77.7	
		CBR 0.1"	25.7	19.5	3.38	
		CBR 0.2"	24.6	15.67	2.47	
	8% Cal	Densidad (kg/m ³)	1029	907	884	
		% Compactación	86.4	76.2	74.3	
		CBR 0.1"	24	9.47	6.21	
		CBR 0.2"	26	9.91	8.73	
	26+650	Natural	Densidad (kg/m ³)	1073.6	1000.6	892
			% Compactación	96	89.7	79.9
CBR 0.1"			15	8	2.9	
CBR 0.2"			12	6.7	2	
3% Cal		Densidad (kg/m ³)	1061.3	1002.6	926.3	
		% Compactación	100	94.7	87.5	
		CBR 0.1"	17.8	13.6	5	
		CBR 0.2"	17.9	7.5	2.7	
5 % Cal		Densidad (kg/m ³)	977	905	803	
		% Compactación	92.3	85.5	75.8	
		CBR 0.1"	25.3	18	3.13	
		CBR 0.2"	23.2	14.17	2.53	
8% Cal		Densidad (kg/m ³)	985	915	846	
		% Compactación	93.1	86.4	79.9	
		CBR 0.1"	45	22.1	14.2	
		CBR 0.2"	46	23.8	13.2	

Tabla 11: Efecto del contenido de la cal y porcentaje de compactación en los valores del índice de soporte de California (CBR)

% Contenido de Cal	Estacionamiento								
	Est. 10+020			Est. 15+390			Est. 26+650		
	85% Comp.	90% Comp.	95% Comp.	85% Comp.	90% Comp.	95% Comp.	85% Comp.	90% Comp.	95% Comp.
0	7	12	19	1	2	3	6	8	14
3	4	6	8*	6	11	18*	2	4	8
5	6	14	28	15	21	25	18	23	28*
8	16	24*	32*	24	32*	39*	22	36*	50*

*Valores extrapolados de los resultados obtenidos del ensayo del índice de soporte de California

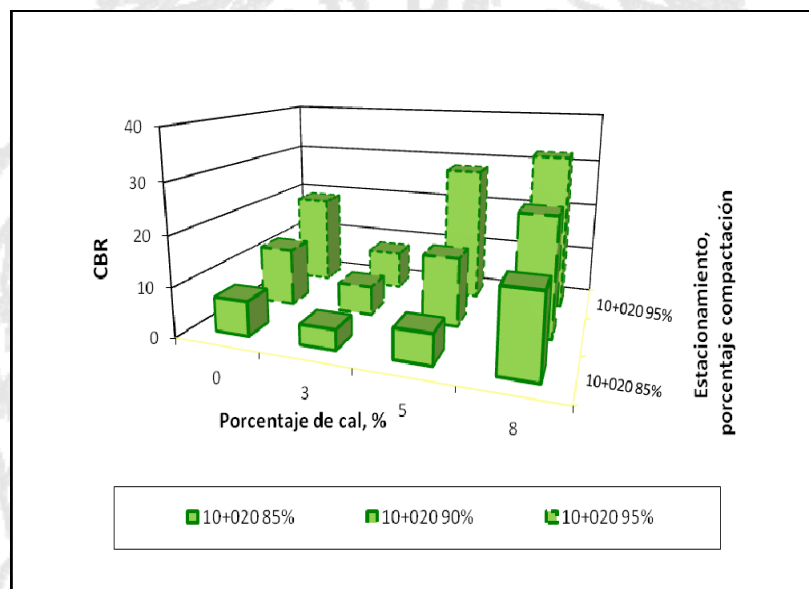


Figura 9: Variación en los valores del índice de soporte de California debido a variaciones en el contenido de la cal. Estacionamiento 10+020

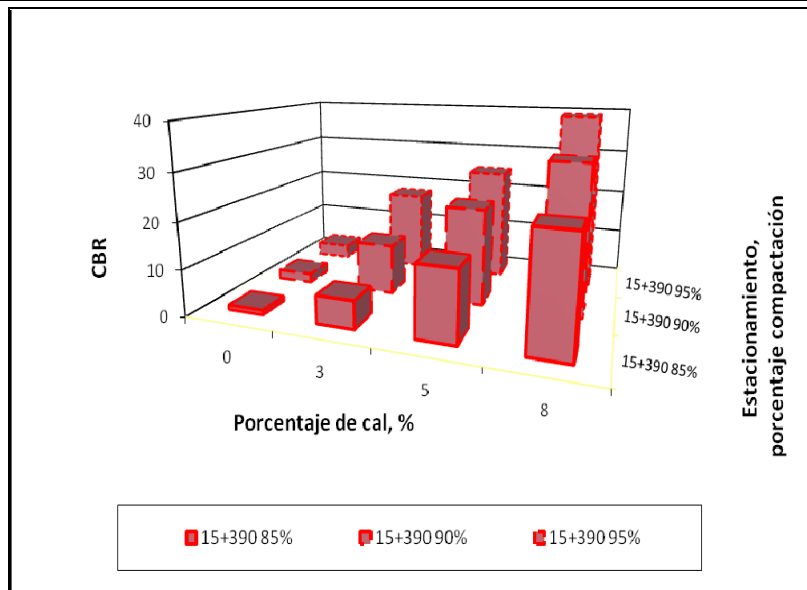


Figura 10: Variación en los valores del índice de soporte de California debido a variaciones en el contenido de la cal. Estacionamiento 15+390

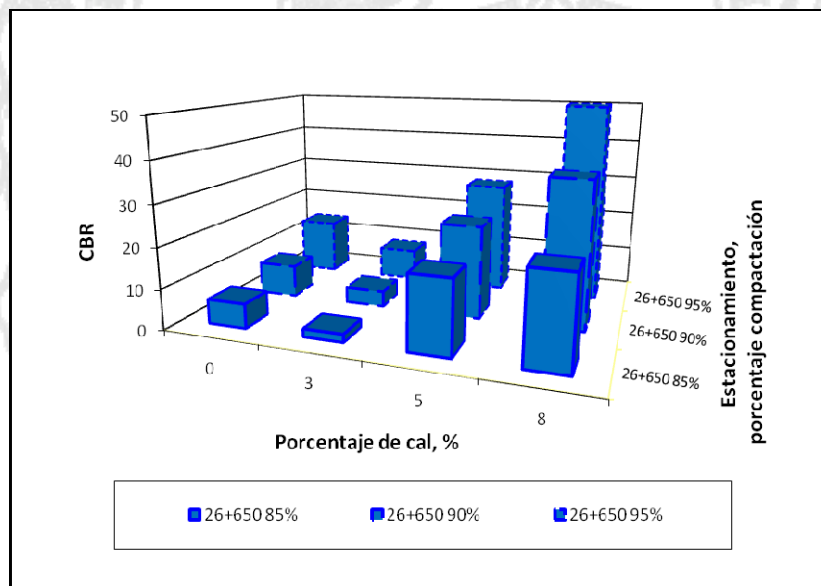


Figura 11: Variación en los valores del índice de soporte de California debido a variaciones en el contenido de la cal. Estacionamiento 26+650

Como se puede ver en las figuras anteriores, el incremento en el contenido de cal está asociado también con un incremento en el valor del índice de soporte de California (CBR). Además, este incremento se ve favorecido aún más cuando se incrementa el porcentaje de compactación, lo cual

está relacionado con un mejor proceso de densificación del material que favorece los efectos positivos de la adición de la cal.

5.5.4 Efecto del contenido de la cal en los valores de resistencia a la compresión inconfiada

Según el procedimiento de diseño de la "National Lime Association (NLA)", se procedió a preparar la mezcla de suelo-cal y se almacenó dentro de una bolsa sellada e impermeable por un periodo de 24 horas. Cumplido este periodo, se compactaron los especímenes utilizando la energía de compactación del martillo Próctor estándar. Inmediatamente después de la fabricación de los especímenes, estos fueron envueltos en bolsas plásticas y curados por 7 días a 40°C. Finalmente se utilizó el procedimiento ASTM D5102 B para determinar la resistencia a la compresión inconfiada de los especímenes curados y condicionados en humedad con remojo por capilaridad por 24 horas. Los resultados obtenidos se muestran en la **tabla 12**.

Tabla 12: Efecto del contenido de la cal y porcentaje de compactación en los valores de resistencia a la compresión inconfiada

Estación	Contenido de Cal	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo máximo (KPa)	Densidad compac. (kg/m ³)	Porcentaje de compac. (%)	Humedad (%)
10+020	6%	231	2.84	278	1131.0	90.8	37.4
		154	1.89	186	1115.0	89.5	37.7
		193	2.37	232	1123.0	90.2	37.6
	8%	281	3.46	339	1092.0	87.7	37.3
		245	3.01	295	1092.0	87.7	38.0
		263	3.24	317	1092.0	87.7	37.7
15+390	6%	363	4.45	437	1063.0	89.3	43.8
		296	3.63	356	1067.0	89.7	43.7
		330	4.04	397	1065.0	89.5	43.8
	8%	345	4.24	415	1021.0	85.8	43.4
		522	6.40	628	1049.0	88.2	43.4
		434	5.32	522	1035.0	87.0	43.4
26+650	6%	308	3.78	371	1031.0	97.4	52.9
		-	-	-	1031.0	97.4	52.5
		308	3.78	371	1031.0	97.4	52.7
	8%	621	7.62	748	1034.0	97.7	52.2
		617	7.59	744	1023.0	96.6	52.3
		619	7.61	746	1028.5	97.2	52.3

Con respecto a los valores de esfuerzo máximo, o bien resistencia a la compresión confinada, estos valores deberán cumplir un valor mínimo, el cual depende del: uso que se le vaya a dar al suelo, de la cantidad de material cubriendo el suelo estabilizado, la exposición a condiciones de saturación y del número esperado de ciclos de congelamiento descongelamiento durante el primer invierno de exposición (cómo se mencionó anteriormente esta última condición no aplica para Costa Rica). Por ello la **tabla 2** presenta valores mínimos sugeridos para la resistencia a la compresión confinada. Dichos valores se pueden observar mejor en la **figura 12**, nótese

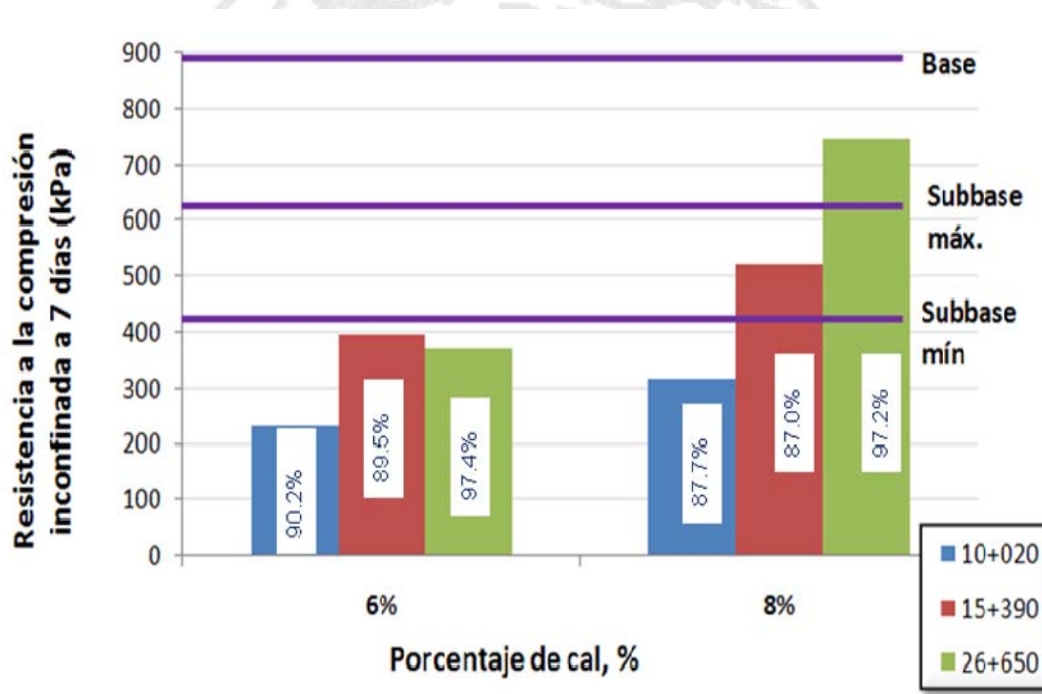


Figura 12: Variación en los valores de la resistencia a la compresión confinada debido a variaciones en el contenido de la cal

Nuevamente, como se puede ver en la figura anterior, el incremento en el contenido de cal está asociado también con un incremento en el valor de la resistencia a la compresión confinada. Además, se puede notar la importancia que tiene el porcentaje de compactación, puesto que incrementos de este valor aumentan considerablemente la resistencia a la compresión del material. Evidenciando nuevamente la importancia que tiene la compactación para obtener un incremento real en el proceso de mejoramiento y evidenciar aún más los efectos positivos de la adición de la cal. En este sentido, Thompson (1969) establece que existe una fuerte correlación entre el porcentaje de

compactación y el valor de la resistencia a la compresión inconfiada, e indica que un incremento en un 5% de compactación puede incrementar en más de un 60% la resistencia a la compresión inconfiada.

5.5.5 Valores de módulo resiliente obtenido para materiales estabilizados con cal

El principal parámetro mecánico considerado para el diseño estructural de pavimentos, con base en la metodología de la Guía de Diseño AASHTO 93, está relacionado con el módulo resiliente del material. Aunque, este valor no es considerado por el procedimiento de diseño de la "National Lime Association (NLA)", pero para efectos de la presente investigación se determinó el módulo resiliente para los materiales estudiados. En el presente, el único método de ensayo de laboratorio recomendado y disponible para determinar el módulo resiliente de materiales granulares es el método triaxial de carga repetida, el cual se encuentra normado por el procedimiento estándar AASHTO T 307 "Método de ensayo estándar para determinar el módulo resiliente de suelos y materiales granulares".

Las muestras pueden ser especímenes pueden tener la densidad natural (extraídos del sitio de compactación) o con la densidad obtenida en el laboratorio (recompactados). En este ensayo, una vez compactada la muestra se coloca en la cámara triaxial y el espécimen de material sin estabilizar se somete a una serie de cargas axiales por un periodo muy corto de tiempo y entre cargas se da un periodo de reposo, esto con el fin de simular el paso del tránsito por el pavimento. Al mismo tiempo se aplica una presión de confinamiento constante (en el laboratorio esta presión de confinamiento se simula a través de aire comprimido dentro de la cámara triaxial), que simula los esfuerzos laterales causados por el peso del material que está por encima más las cargas de tránsito. De esta manera se logra simular de una mejor manera las condiciones que se presentan dentro de la estructura del pavimento. El espécimen es sometido a 15 combinaciones distintas de esfuerzos desviadores y presiones de confinamiento, que dan como resultado 15 diferentes valores de módulo para cada muestra, ya que permite determinar la dependencia de la capacidad mecánica del material con el estado de esfuerzos. De tal forma que sea posible establecer valores típicos y correlaciones de módulo resiliente para condiciones de energía de compactación y las condiciones de humedad de los diferentes materiales de suelo.

En el caso específico de esta investigación se tomaron en consideración dos estados de humedad del suelo:

- *Condición seca:* en esta condición se procedió a preparar la mezcla de suelo-cal y se almacenó dentro de una bolsa sellada e impermeable por un periodo de 24 horas. Cumplido este tiempo

los especímenes fueron compactados con el martillo Próctor estándar, buscando un porcentaje de compactación cercano al 95%. Inmediatamente después de la fabricación de los especímenes, estos fueron envueltos en bolsas plásticas y curados por 7 días a 40°C. Finalmente, se utilizó el procedimiento estándar AASHTO T 307 para determinar el módulo resiliente de cada espécimen.

- Condición saturada: de igual manera que a la condición seca, se se procedió a preparar la mezcla de suelo-cal y se almacenó dentro de una bolsa sellada e impermeable por un periodo de 24 horas. Cumplido este tiempo los especímenes fueron compactados con el martillo Próctor estándar, buscando un porcentaje de compactación cercano al 95%. Inmediatamente después de la fabricación de los especímenes, estos fueron envueltos en bolsas plásticas y curados por 7 días a 40°C. Luego, cada espécimen fue sometido por 24 horas a un remojo por capilaridad. En el cual el espécimen es cubierto con un tela absorbente y colocado sobre una piedra porosa, donde el nivel del agua debe alcanzar la parte superior de la piedra y estar en contacto con la tela para lora la absorción por capilaridad, pero sin que el espécimen de suelo esté en contacto directo con el agua. Finalmente, se utilizó el procedimiento estándar AASHTO T 307 para determinar el módulo resiliente de cada espécimen.

Los resultados obtenidos para ambas condiciones se presentan en las figuras 13, 14, 15 y en la tabla 13.

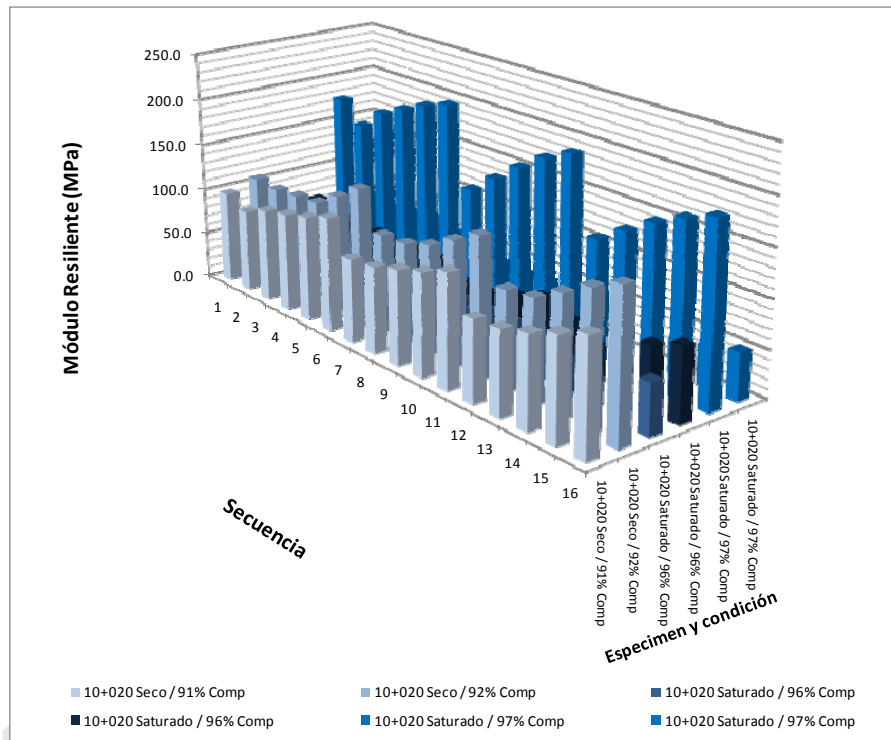


Figura 13: Valores de módulo resiliente para diferentes condiciones de humedad y compactación. Estacionamiento 10+020

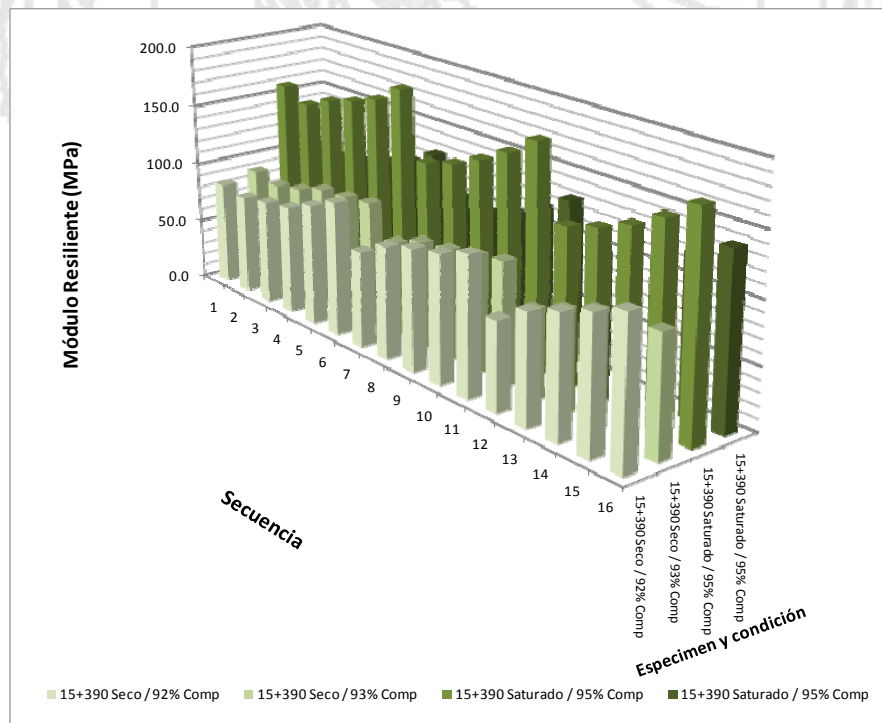


Figura 14: Valores de módulo resiliente para diferentes condiciones de humedad y compactación. Estacionamiento 15+390

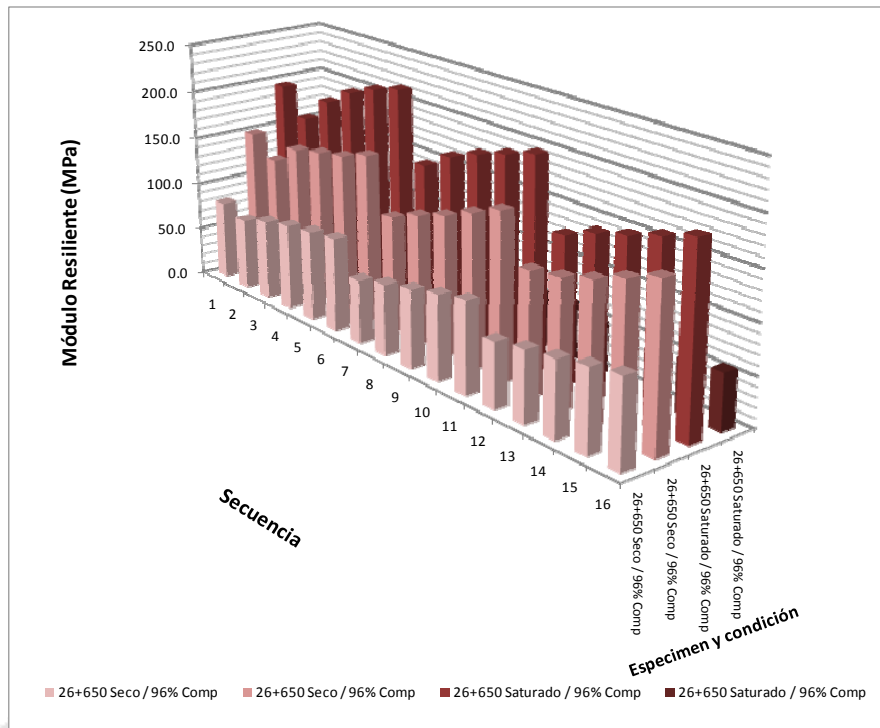


Figura 15: Valores de módulo resiliente para diferentes condiciones de humedad y compactación. Estacionamiento 26+650

Tabla 13: Valores de módulo resiliente para diferentes condiciones de humedad y compactación

				Estacionamiento													
Secuencia de Ensayo				10+020				15+390				26+650					
				Condición													
Sec.	Cant. de aplicaciones	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Seca		Saturada				Seca		Saturado		Seca		Saturado	
				% Compactación													
				91% Comp	92% Comp	96% Comp	96% Comp	97% Comp	97% Comp	92% Comp	93% Comp	95% Comp	95% Comp	96% Comp	96% Comp	96% Comp	96% Comp
0	500-1000	41.4	24.8	97.9	106.7	66.4	67.3	176.2	54.2	84.0	89.3	158.5	100.7	81.6	150.2	195.2	71.5
1	100	41.4	12.4	87.5	104.2	65.5	70.7	154.7	51.0	80.8	84.7	148.5	97.3	73.0	130.5	168.2	78.6
2	100	41.4	24.8	98.2	106.8	66.7	66.9	176.5	54.6	84.4	89.4	158.5	100.6	81.9	151.0	195.1	74.2
3	100	41.4	37.3	104.4	109.6	62.4	58.0	189.7	58.5	88.0	97.0	164.9	107.9	88.2	157.4	212.5	68.5
4	100	41.4	49.7	111.5	125.8	57.1	53.7	201.4	51.3	98.1	99.0	172.9	116.3	92.7	163.1	224.3	64.9
5	100	41.4	62.0	121.2	143.7	54.0	60.3	210.6	51.3	108.9	101.7	188.2	128.4	96.7	173.2	232.5	62.9
6	100	27.6	12.4	87.9	104.1	55.8	60.1	128.1	38.8	77.3	77.9	136.0	101.4	64.9	120.2	164.8	66.2
7	100	27.6	24.8	90.6	105.6	42.0	44.5	149.4	37.4	90.6	87.0	142.7	97.1	72.8	132.5	182.8	56.4
8	100	27.6	37.3	99.0	114.8	49.3	44.5	170.5	39.8	98.1	90.0	153.4	103.9	79.8	143.0	194.6	54.7
9	100	27.6	49.7	107.7	130.6	50.5	54.7	189.3	43.7	103.0	94.4	166.3	117.4	86.7	156.3	204.2	56.3
10	100	27.6	62.0	119.2	146.3	49.8	65.0	203.0	49.3	111.8	98.6	182.8	131.0	92.6	169.4	213.8	57.7
11	100	13.8	12.4	85.0	103.6	45.0	53.1	126.2	27.4	71.5	71.1	126.4	98.0	66.0	123.4	147.5	49.2
12	100	13.8	24.8	87.6	107.5	36.4	40.0	145.0	30.0	87.7	81.1	133.8	95.4	71.7	128.4	160.1	44.4
13	100	13.8	37.3	95.6	123.9	38.7	52.3	163.8	35.6	97.3	90.4	144.5	109.7	76.4	138.1	168.9	47.6
14	100	13.8	49.7	107.2	140.8	46.7	65.5	178.4	42.5	107.0	96.3	158.5	124.8	82.7	150.9	179.2	52.9
15	100	13.8	62.0	119.4	154.9	53.5	77.5	189.6	50.0	117.7	95.3	175.4	138.6	88.2	163.1	189.8	56.7

Como se puede observar, existen importantes variaciones en los valores del módulo resiliente, dependiendo de la condición de humedad y de compactación en la cual se encuentra preparado el espécimen. Razón por la cual es necesario considerarlas para determinar las condiciones más representativas del suelo estabilizado en el diseño estructural.

En el caso de la Guía de Diseño Mecánico-Empírica, el uso de materiales de subrasante estabilizadas puede ser incorporada como capa de subbase para pavimentos asfálticos convencionales. En este caso, se espera que los indicadores o deterioros que se puedan presentar en el pavimento (ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, agrietamiento térmico y regularidad) puedan ser minimizados en su desarrollo con la incorporación de la cal y por lo tanto ser considerado como una alternativa viable dentro de la Guía de Diseño Mecánico-Empírica.

Por otro lado, bajo circunstancias especiales, cómo es el caso de los caminos de bajo volumen, las capas de subrasante estabilizadas pueden cumplir la función de una capa rígida (por ejemplo, cuando se coloca una superficie de recubrimiento directamente sobre estas capas). En este caso, debe ponerse especial atención de que la capa de recubrimiento tenga un espesor suficiente que garantice aspectos de durabilidad. Por su parte, adicional a los criterios de desempeño solicitados por la Guía de Diseño Mecánico-Empírica, es necesario satisfacer los criterios de agrietamiento por fatiga para la capa estabilizada con cal.

Una de las principales ventajas que ofrece la Guía de Diseño Mecánico-Empírica para la selección de los datos de entrada a considerar en el diseño, es el sistema jerárquico o niveles. Esto se basa, en el nivel práctico más sencillo, en la filosofía del nivel de esfuerzo empleado por el ingeniero en el proceso de diseño dependiendo de la importancia relativa, tamaño y costo del proyecto.

En el Nivel 1, se tiene el proceso más detallado de diseño e involucra ensayos de laboratorio y campo para el diseño. En contraste, en el Nivel 3, el diseñador puede estimar las variables de entrada basado en la experiencia o registros históricos. En el Nivel 2 las variables de entrada representan una condición intermedia entre los ensayos y los requerimientos de evaluación en campo del Nivel 1 y la "mejor estimación" de valores del Nivel 3.

De esta manera, la estimación del Módulo Resiliente para el diseño se requiere que este sea medido en suelos estabilizados después de un periodo de cura de 28 días a una temperatura de 22.8°C (73°F). El estado de esfuerzos (esfuerzo desviador y presión de confinamiento) al cual se

obtiene el módulo resiliente de la subrasante deberá ser determinado a partir de un análisis estructural de un diseño o pavimento de prueba. Nótese que la configuración de la sección transversal del pavimento de prueba es producto de considerar el tráfico, subrasante y clima. Ante la incapacidad de desarrollar un análisis estructural para estimar el estado de esfuerzos dentro de una capa estabilizada con cal es posible emplear un esfuerzo desviador de 41.4 kPa (6 psi) para efectos de diseño.

Nivel 1. Para la determinación del módulo resiliente se recomienda utilizar el procedimiento de ensayo AASHTO T-307 o algún método equivalente. En este caso la mezcla de suelo cal es moldeada y acondicionada con la humedad óptima y la densidad máxima. La mezcla de suelo-cal puede ser curada por 7 días a 40°C en bolsas plásticas para acelerar el periodo de cura de los especímenes y que sea representativo de los 28 días.

Nivel 2. El módulo resiliente puede ser estimado a partir de los resultados de la resistencia a la compresión inconfiada de especímenes compactados y curados a los 28 días y de acuerdo al procedimiento de falla ASTM D 5102. En este caso, Thompson en 1966, estableció una correlación entre la resistencia a la compresión de especímenes compactados y saturados similar a lo establecido por la "National Lime Association (NLA)", con la única diferencia que esta correlación fue desarrollada para una compactación con el martillo Próctor Modificado en lugar del martillo Próctor estándar del método de la NLA:

$$M_r = 0.124(q_u) + 9.98$$

donde,

M_r = módulo resiliente, ksi.

q_u = Resistencia a la compresión inconfiada, psi.

Nivel 3. El módulo resiliente es estimado a partir de la experiencia o registros históricos. La literatura demuestra que un módulo resiliente de 200-400 MPa (30,000 a 60,000 psi) puede ser obtenido para suelos reactivos (con 25% pasando la malla No. 200 y un Índice de Plasticidad de al menos 10).

6. Análisis de resultados

6.1. Comentarios

Cuando se realizan ensayos para el diseño de dosificaciones de un material, en el laboratorio se intentan representar las condiciones presentes en el proyecto, los resultados obtenidos bajo estas condiciones deberán ser comparados con las especificaciones las cuales buscan garantizar un comportamiento adecuado de este material. En el caso de suelos estabilizados con cal la definición de especificaciones se realiza de manera empírica, es decir, mediante la comparación de resultados obtenidos en el laboratorio y el desempeño del material en campo. Así, la interpretación adecuada de las condiciones empleadas en el método de diseño y el cumplimiento de especificaciones, también debe ser asociado con los procesos constructivos implementados y las condiciones del sitio para establecer el desempeño esperado del pavimento.

Otra consideración importante que debe tenerse en cuenta es la selección de los datos y parámetros de entrada que deberán considerarse en el diseño, cuya definición depende de la importancia relativa, tamaño y costos del proyecto. En este punto es importante destacar, que aunque todos los materiales analizados en esta investigación corresponden a un mismo proyecto en construcción; y además, cuyas características físicas (granulometría, límites, clasificación AASHTO y SUCS) poseen valores muy similares entre sí, es evidente que el desempeño y las propiedades físico-mecánicas de los materiales una vez estabilizados con cal, presentan resultados muy distintos entre sí, producto de la características propias de los materiales, tales como mineralogía, humedad y compactación. De esta manera, se muestra la importancia que tiene el criterio del ingeniero para establecer las características y condiciones más representativas de los materiales, así como los ensayos de campo y laboratorio que sustenten de forma adecuada los valores definidos.

Finalmente, en estudios previos realizados en el LanammeUCR ha determinado que la cal producida en el país presenta una alta variabilidad en sus propiedades e incumplimientos respecto a los requisitos requeridos internacionalmente, lo cual debe ser considerado en las propiedades de los materiales estabilizados y cuantificar el efecto de esta variabilidad en las propiedades mecánicas del material estabilizado.

6.2. Conclusiones

Como resumen de esta investigación se rescatan las siguientes conclusiones:

- Se logró comprobar que las características y propiedades de los materiales analizados cumplen de manera satisfactoria con las condiciones necesarias para utilizar la cal como aditivo y mejorar sus propiedades
- El material de subrasante de cada uno de los puntos analizados presentaron una mejoría significativa en sus propiedades mecánicas al ser estabilizado con cal.
- El uso de sistemas de clasificación de suelos puede ser una herramienta práctica para definir propiedades esperadas de los materiales. Sin embargo, debe ponerse especial atención a que materiales que pueden ser clasificados de la misma manera pueden tener reacciones diferentes ante la estabilización con cal y por lo tanto es necesario llevar a cabo ensayos de laboratorio para determinar sus propiedades y considerarlas en el diseño.
- Debido a la reducción en el tiempo requerido para el diseño, se sugiere seguir utilizando el Método de Diseño de la "National Lime Association (NLA)" como método de diseño, teniendo siempre en consideración las condiciones empleadas según la metodología.
- De los resultados obtenidos se hace evidente que es necesario aplicar un adecuado proceso de compactación en campo y en laboratorio para evidenciar realmente los beneficios de la estabilización con cal.
- Con dosificaciones iguales o mayores al 8 % se pueden lograr materiales que de acuerdo con los procedimientos de diseño y especificación permiten transformar un material de alta plasticidad y muy susceptible a deformarse en un material con propiedades que permita ser utilizado como sub base, siempre y cuando se logre una adecuada compactación en campo.
- Es necesario la construcción de tramos de prueba que permitan valor en campo el desempeño real de material.

7. Referencias

- National Lime Association. "Manual de estabilización de suelo tratado con cal: Estabilización y modificación con cal". Boletín 326. Enero 2004.
- National Lime Association. "Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil". Technical Brief. Octubre 2006
- American Society for Testing and Materials. "ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D6276: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization."
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D698: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort"
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures"
- American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO T 307-99: Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials". Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. XXVII ed., AASHTO, EUA, 2007.
- Thompson, M. R. "Engineering Properties of Lime-Soil Mixtures". Journal of Materials – ASTM, Vol. 4. 1969

8. Anexo 1: Procedimiento general de estabilización y modificación de suelo con cal

Basado en: National Lime Association. "*Manual de estabilización de suelo tratado con cal: Estabilización y modificación con cal*". Boletín 326. Enero 2004.

Introducción

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos subyacentes. Los suelos inestables pueden crear problemas significativos en las estructuras y pavimentos. Con el diseño y técnicas de construcción apropiados, el tratamiento con cal transforma químicamente los suelos inestables en materiales utilizables. Adicionalmente, el soporte estructural de los suelos estabilizados con cal puede ser aprovechado en el diseño de pavimentos.

La cal se puede utilizar para el tratamiento de suelos, dependiendo de los objetivos que se deseen lograr se tiene que puede ser de tipo:

- Temporal: Mínima cantidad de cal para secar y modificar temporalmente los suelos. Tal tratamiento produce una plataforma de trabajo para la construcción de caminos temporales.
- Permanente: Mayor grado de tratamiento con respaldo de pruebas, diseño y técnicas apropiadas producen la estabilización estructural permanente del suelo

Para tratamiento de suelos se puede utilizar:

- **Cal Viva (óxido de calcio):** Transformación química de carbonato de calcio y óxido de calcio
- **Cal hidratada (hidróxido de calcio):** Reacción química de la cal viva con el agua. Esta reacciona con las partículas arcillosas, y las transforma permanentemente en una fuerte matriz cementante
- **Lechada de cal** (suspensión de cal hidratada o cal viva en agua)

Estabilización de suelos con cal

Entre las ventajas y beneficios que tienen los suelos estabilizados con cal se mencionan:

1. Produce resistencia y estabilidad a largo plazo, en forma permanente, por parte de la acción del agua
2. Se puede generar un tratamiento con cal sola o en combinación con otros materiales, las propiedades mineralógicas de los suelos indicarán su reactividad con la cal, y resistencia final

Estabilización en subrasantes o subbases:

- Puede ser permanente para suelo fino, creándose una capa con un valor significativo en el sistema del pavimento
- Se da para suelos que pueden ser del lugar o material de préstamo
- Se requiere una adición de 3% a 6% en peso del suelo seco (determinados por el ingeniero)

Estabilización de Bases:

- Se utiliza para aquellos materiales que no cumplan con las características mínimas
- Se realiza en la construcción de caminos nuevos y reconstrucción de deteriorados
- Se requiere de 2% a 4% de cal respecto al peso seco del suelo
- Se puede realizar en campo y en planta
- Se usa para mejorar las características de las mezclas de suelo y agregados como "reciclaje de espesor completo"

Modificación con cal y secado de suelos

Se tienen dos tipos de tratamientos importantes:

- Secar suelos mojados, permitiendo una compactación mucho más rápida que si se seca por la evaporación natural, además, la utilización de cal mejora la capacidad de soporte, y acondiciona el suelo para estabilizar posteriormente con cemento Portland o con asfalto. Se usa de 1 a 4% de cal para el secado

- Mejorar la trabajabilidad y resistencia a corto plazo del suelo, facilitando la ejecución de los proyectos. Se usa de 1 a 4% de cal en peso con respecto al suelo para modificación (menor a la utilizada para estabilización permanente), y los cambios pueden ser permanentes o no, y la modificación no tiene repercusión estructural a la capa que se modifique con cal en el diseño del pavimento

La química del tratamiento con cal

Cuando la cal y el agua se añaden a un suelo arcilloso, comienzan a ocurrir reacciones químicas casi inmediatamente, tales como:

- **Secado:** Los suelos se secan porque el agua presente en los mismos, hidrata la cal viva, se produce calor que evapora la humedad adicional, la cal hidratada formada, reacciona con las partículas de arcilla, se reduce la humedad adicional, y se mejora el soporte. Si se seca con cal hidratada o lechada de cal hidratada, el proceso de secado se da por cambios químicos del suelo, que reducen la capacidad de retener agua, y aumentan la estabilidad
- **Modificación:** Luego de la mezcla, los iones de calcio de la cal hidratada migran a la superficie de las partículas arcillosas y desplazan el agua y otros iones, haciendo el suelo fiable y granular siendo más fácil de trabajar y compactar; disminuye el índice de plasticidad, y su tendencia a hincharse y contraerse (floculación y aglomeración)
- **Estabilización:** Con cantidades adecuadas de cal y agua el pH del suelo aumenta, lo que rompe las partículas de arcilla, hay una liberación de sílice y alúmina, que reaccionan con el calcio de la cal para formar hidratos de calcio-silicatos e hidratos de calcio-aluminatos, que son productos cementantes similares a los formados en el cemento Portland, los que forman la matriz que contribuye a la resistencia de las capas de suelo estabilizadas con cal, el suelo se transforma de arenoso granular a una capa dura relativamente impermeable, con una capacidad de carga que es tan fuerte como flexible

Mezclas de Cal-Puzolanas para Suelos con cantidades bajas de arcilla

La cal reacciona por sí misma en suelos con poca arcilla (7%) e índice de plasticidad bajo (10). Si el suelo no es suficientemente reactivo, se puede mezclar con sílice y alúmina, que incluyen ceniza volante y escoria de alto horno, que reaccionan con la cal para formar una fuerte matriz cementante

DESCRIPCIÓN Y COMPARACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN

Visión general

Como la cal puede ser utilizada para tratar suelos de distintos tipos, el primer paso en la evaluación de las opciones de tratamiento del suelo es identificar claramente el objetivo. La estabilización requiere más cal, más tratamiento y mayor control que la modificación, pero los pasos para construcción básicos son.

1. Escarificar o pulverizar parcialmente el suelo (pulverizar para este caso)
2. Esparcir la cal
3. Adición de agua y mezcla
4. Compactar a la densidad máxima práctica
5. Curado antes de la colocación de la siguiente capa o capa de protección

Cuando la mezcla se realiza en planta, se aplican solo tres pasos de los pasos: esparcir la mezcla cal-agregado-agua, la compactación, y el curado

Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de aplicación de cal

La técnica debería estar basada en consideraciones como:

- La experiencia del contratista
- La disponibilidad de equipo
- La ubicación de de una fuente cercana y adecuada de agua

Algunas ventajas y desventajas de los métodos de aplicación de cal se presentan en la tabla A-1

Tabla A-1: Ventajas y desventajas de diferentes métodos de aplicación de la cal

Método de aplicación:	Ventajas	Desventajas
Cal hidratada en polvo	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede aplicar más rápidamente que la lechada - Se puede utilizar en el secado de arcillas, aunque no sea tan eficaz como la cal viva 	<ul style="list-style-type: none"> - Partículas finas, y el polvo puede ser un problema, haciéndolo inadecuado para áreas pobladas
Cal viva en seco	<ul style="list-style-type: none"> - Económica, al ser de gran concentración que la cal hidratada (20 a 24% más de óxido de calcio disponible) - Mayor densidad, por lo que requiere menos instalaciones de almacenaje - Tiempo de ejecución se puede ampliar por la reacción exotérmica que calienta el suelo causada por el agua y la cal viva - Excelente para secar suelos mojados - Tamaños de partícula grandes, reducen la generación de polvo 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere 32% de su peso en agua, para convertirse en cal hidratada, lo que puede generar pérdida adicional por evaporación significativa debido al calor de hidratación - Por los mayores requerimientos de agua, en áreas remotas, esto podría generar problemas de logística - Requiere más mezcla que la cal hidratada, puesto que primero debe reaccionar con el agua para formar cal hidratada, y luego se debe mezclar con el suelo
Lechada de cal	<ul style="list-style-type: none"> - No hay presencia de polvo en la aplicación - Más fácil su distribución - Se aprovecha su aplicación por rociado - Requiere menos agua para la mezcla final 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad lenta de aplicación - Costos altos por el quipo que se requiere extra - Puede no ser práctico en suelos muy mojados - No es práctico para secar

Descripción detallada de los pasos constructivos

1. Entrega

a. Cal viva o hidratada seca:

i. En bolsas de papel

b. Lechada de cal

i. Se puede producir en el lugar de trabajo

ii. Las instalaciones deben ser aprobadas por el ingeniero de proyecto

iii. Mezcla:

- Puede prepararse en un tanque de mezcla, con agitación para mezclar la cal y el agua con paletas deflectoras, aire comprimido, y/o bombas de recirculación

-
- Empleo de un mezclador compacto con motor, que trabaja a una proporción 65:35, y riega en el lugar la lechada por medio de bombeo
 - Se cargan las cantidades dosificadas de agua y cal por separado, y se mezcla con aire comprimido o con una bomba de recirculación que se monta en la parte trasera del camión
 - iv. Se verifica la cantidad de cal con la utilización de un dispositivo de gravedad específica (picnómetro)
2. Estabilización de la subrasante (o subbase)
- a. Pulverización de la cal: Se descarga en volcanes, sobre una superficie que sea lisa, para alcanzar una aplicación uniforme con la hoja de la motoniveladora (no hacer escarificación para este proceso)
 - b. Aplicación de la cal:
 - Cal viva:
 - a. Por gravedad, dejando caer la cal formando un camellón, se usa comúnmente camiones graneleros con sistemas de compuertas inferiores neumáticas, u ocasionalmente una motoniveladora para esparcir la cal viva, se puede usar cal hasta un tamaño de $\frac{3}{4}$ '.
 - b. Se requiere que el área esté nivelada y suficientemente seca, para que no haya ahuellamiento bajo las llantas del camión, evitando extensión uniforme, se debe marcar el área en la que se aplicará una cantidad conocida de cal, y observar la motoniveladora para asegurarse que se extiende uniformemente
 - Cal hidratada seca:
 - a. No se debe extender en condiciones de viento, en áreas pobladas, o en zonas adyacentes al tráfico de vehículos pesados, donde mejor se recomienda aplicación de lechada o una aplicación adecuada de cal viva, que puede reducir al mínimo los problemas relacionados con polvo.
 - b. Se puede utilizar transporte de palangana, que debe ser cubierto para prevenir el polvo durante el viaje, y durante la extensión de la cal, la cual, se debe de realizar ajustando un esparcidor

mecánico en la parte posterior; no se recomienda esparcir la cal en volcán para realizar expansión posterior con motoniveladora

➤ Lechada de cal:

- a. La proporción real que se utilice depende del porcentaje de cal especificada para el tipo de suelo y el porcentaje de sólidos de cal en la lechada, que pueden ser fácilmente medidos en los tanques de mezcla los camiones esparcidos, por medio de dispositivo de gravedad específica, y conociendo este valor, se extienden las cargas sobre las áreas de extensión conocida, para asegurar una aplicación correcta.
 - b. Se recomienda utilizar camiones distribuidores con recirculación, si las distancias son largas, sin ellas para distancias cortas, donde se puede mantener en suspensión la lechada; la extensión se puede hacer por gravedad, para suelos que generalmente son escarificados, y con doble aplicación de lechada, al ser esta menos concentrada que la cal seca
- c. Mezcla preliminar y aplicación de agua
- i. Se requiere una mezcla preliminar para la distribución de la cal dentro del suelo y la pulverización del mismo, para preparar la adición de agua que proporcione la reacción para la estabilización
 - ii. La mezcla se inicia con la escarificación, que se puede realizar aún sin mezcladoras modernas, durante el proceso o inmediatamente después el agua se puede agregar
 - iii. Hay que asegurar un contenido de humedad del suelo 3% arriba del óptimo, antes de compactar, la cal viva requiere agua adicional para ello, por lo que se debe de verificar utilizando una pala, para asegurar que no hay partes sin hidratar, de lo contrario, se deberá adicionar el agua necesaria para completar la hidratación.
 - iv. Asegurar también, que la sección que se estabiliza tiene la profundidad correcta, esto cavando pequeños agujeros al azar, y rociando el suelo con un indicador de pH, para verificar que la mezcla de suelo y cal es adecuada

-
- v. Para arcillas muy plásticas, mezclar una capa de arcilla y cal en dos capas, para un fraguada de 24 a 48 horas, la arcilla se hace friable, y la pulverización se logra en la mezcla final
 - vi. Después de la mezcla, se debe de afinar la capa tratada, y compactarla con un rodo patas de cabra o compactador neumático
- d. Período de fraguado
- i. El período está entre los 1 a 7 días según el criterio del ingeniero, luego deberá mezclarse antes de compactar, esto en suelos de IP bajo, o para secado o modificación, pero generalmente no se requiere
- e. Mezcla final y pulverización
- i. La mezcla y pulverización se hacen hasta que el 100% del material pase el tamiz de 1 pulgada, y un 60% pase el tamiz No. 4
 - ii. Para cal viva, todas las partículas deben de estar hidratadas, y haber sido mezcladas
 - iii. Para cal viva seca, después del mezclado final, y antes de la compactación, verificar que se ha alcanzado la mezcla, esto si se presentan manchas que al mezclarlas con agua se disuelven, por lo que se requiere una mezcla adicional, de lo contrario se ha logrado
 - iv. Puede ser requerida agua adicional en la mezcla final para alcanzar el 3% sobre la humedad óptima
 - v. Si los requerimientos de pulverización se pueden completar en la mezcla preliminar, el fraguado y mezcla final se pueden eliminar
- f. Compactación
- i. Deberá compactarse al 95% de de la densidad máxima obtenida en el ensayo AASHTO T99 (Próctor estándar)
 - ii. El valor de la densidad es el de la curva Próctor de una mezcla de suelo-cal
 - iii. La compactación es inmediato a la mezcla final, retrasos de hasta 4 días, no deberán ser problema si esto no es posible, mientras que se mantenga ligeramente compacta y húmeda al hacerse la compactación, más de 4 días requiere adicionar cal al suelo
 - iv. El equipo de compactación debe de adaptarse a la profundidad de la capa
-

-
- v. Se utilizará un compactador pesado de neumáticos o rodo vibratorio, o la combinación de pata de cabra y un compactador ligero de almohadilla
 - vi. Se completa la compactación con un rodo liso
 - g. Curado final
 - i. Antes de colocar la siguiente capa, se debe dejar endurecer la subrasante compacta hasta que los camiones pesados pasen sin ahuellarla
 - ii. Mientras tanto, se debe curar, que se puede hacer por medio de dos formas:
 - Curado húmedo: Mantenimiento de la superficie en condición húmeda por medio de un rociado leve y compactación cuando sea necesario
 - Curado con membrana: Sellado de la capa compactada con emulsión bituminosa, en una o varias aplicaciones (dosificación de 0.12 a 0.30 galones por metro cuadrado)
3. Estabilización de bases
- a. Recuperación de espesor completo:
 - i. Para caminos con inadecuado material de base que requieren reconstrucción
 - ii. Se pulveriza la capa superficial, se mezcla con la base y la subrasante se obtiene una base mejorada, para una nueva capa
 - iii. Al agregar un porcentaje de cal se mejora drásticamente las propiedades de la base
 - iv. La reacción puzolánica de los contaminantes arcillosos, cementa la matriz resultante
 - v. Procedimiento:
 - Escarificación y pulverización
 - a. Romper el pavimento existente con una recuperadora o recuperadora-estabilizadora, y mezclarlo con los materiales de base y subrasante hasta que se cumpla con el espesor completo de diseño, o escarificando con una motoniveladora, un tractor ripper o una compactadora patas de cabra
 - b. Dependiendo del espesor del pavimento se requiere de más de una pasada para alcanzar el tamaño adecuado de la muestra

-
- c. Por medio de una recuperadora se debe de hacer que se cumpla con las especificaciones de que el 100% del material pase el tamiz de 2 pulgadas
 - Extensión de la cal
 - a. Realizarlo considerando los aspectos señalados anteriormente para la estabilización de la subrasante
 - Mezcla y adición de agua
 - a. Se debe asegurar una mezcla completa de la cal en todas las partes de la nueva sección
 - b. Se deben conectar las mangueras de los tambores de los mezcladores rotatorios a los camiones de agua, para agregar agua a la mezcla, o la capa recuperada de la superficie mojada se mezcla nuevamente
 - c. El contenido de humedad debe estar por encima de del 2% del óptimo
 - Compactación
 - a. Realizarla tan pronto como sea posible después de la mezcla, usando un compactador de pata de cabra o un compactador vibratorio de almohadillas
 - b. Luego del afinado, usar un rodo liso
 - Curado
 - a. La superficie se debe de mantener húmeda hasta que se cubra con la capa de rodadura
 - b. Se puede curar con membrana o cura húmeda como se menciona anteriormente
 - c. Se debe curar hasta que el paso del equipo de construcción pase sin que se produzca ahuellamiento
 - b. Capa de base granular – Mezclado en planta
 - i. Ante exceso de finos se agregan pequeños porcentajes de cal, para contribuir con la resistencia estructural de la base
 - ii. Si el exceso es arcilla, esta reacciona puzolánicamente, y los transforma en aglomeraciones cementantes
-

-
- Mezcla
 - a. Se mide la cal en la faja transportadora del agregado de base
 - b. Se aplica agua en aspersion para hidratar la cal
 - c. Se transporta la mezcla hasta el mezclador, para asegurar la mezcla hasta que se almacene
 - Colocación del material
 - a. Se coloca la base, por métodos comunes, sobre la plataforma de terracería
 - Compactación y curado
 - a. Se realiza como en los casos anteriores
 - c. Cal para secado y modificación
 - i. Para tratamiento de bases, se realiza en planta
 - ii. Para el tratamiento de finos de la subrasante se realiza en el lugar
 - iii. Para la condición de un suelo de arcilla el procedimiento general para la estabilización con cemento o asfalto es
 - Mezclar la cal y el suelo
 - Sellar la capa
 - Curar por 24 a 48 horas
 - Remezclar
 - Aplicar el segundo aditivo
 - Remezclar
 - Compactar
 - Curar por 7 días
 - iv. Materiales de Base:
 - Para un mezclado en planta se hace igual que la mezcla en planta de una base granular, distribuyendo la mezcla cal-agregado con un esparcidor, compactar y curar; en el lugar, hace lo mismo que para la recuperación del espesor completo, detallado anteriormente
 - El período de curado se puede evitar
 - v. Materiales de Subrasante:
-

- Se realizan los mismos pasos que para la estabilización de la subrasante, solamente que el período de curado puede ser eliminado, entonces, la compactación es inmediata
- No se requiere un grado de pulverización fino, por lo que se pueden utilizar discos escarificadores para las condiciones sumamente húmedas
- Para condiciones pesadas, utilizar estabilizadoras de suelo
- La compactación se puede reducir bajo el 95% para mejorar las condiciones de trabajabilidad y resistencia
- En caso de que se requiera producir una plataforma de trabajo, la modificación se puede lograr solamente con el tránsito del equipo pesado de construcción

Consideraciones adicionales

1. Mantenimiento de tráfico
 - a. Desviar el tráfico del área de trabajo
 - b. Evitar en lo posible el tráfico de vehículos sobre la superficie tratada, ya que genera hundimientos (ahuellamientos)
2. Necesidad de la capa de rodadura
 - a. Se debe colocar una imprimación bituminosa, ya que su resistencia a la abrasión del tráfico es pobre
 - b. Caminos temporales puede ser una excepción
3. Limitaciones climáticas
 - a. Se requiere un tiempo y clima cálido para el endurecimiento adecuado
 - b. La regla general es que la temperatura del aire puede ser mayor o igual a 60°C a la sombra y más, para la estabilización con cal.
 - c. Si el uso solamente es para secar los suelos, se puede hacer en climas más fríos
4. Flexibilidad de construcción
 - a. Las mezclas de suelo-cal, pueden ser re trabajadas ante retrasos, mientras la estabilización está en progreso
 - b. Se puede hacer aunque la acción cementante haya iniciado
5. La lluvia no es perjudicial

-
- a. En lloviznas, la extensión de la cal, la mezcla y la compactación, se pueden seguir
 - b. Si hay lluvia, la extensión de la cal seca con motoniveladora debe de hacerse rápidamente, porque la cal se humedece
 - c. Puede generarse pérdida de alcalinidad, si la cal no está contenida en el suelo escarificado y rápidamente incorporada en el mismo
 - d. Cuando la cal se ha mezclado con el suelo, se reduce la cantidad de agua requerida para la compactación
 - e. Después de la compactación la capa tratada es impermeable, esto que el agua de lluvia escurre en forma similar a un camino pavimentado, por lo que aún con lluvias fuertes, por lo general sólo se dan retrasos mínimos antes de la colocación de la siguiente capa.
6. Precauciones de seguridad al usar la cal
- Se encuentran en la hoja de seguridad que el productor o proveedor debe de poseer
- i. Seguridad del trabajador
 1. Por su reacción en presencia de humedad, se debe entrenar a los trabajadores y proveerles equipo adecuado
 - ii. Riesgos para los ojos
 1. Puede generar:
 - a. Irritación
 - b. Quemadura
 - c. Daño permanente
 2. Utilizar lentes protectores, no usar lentes de contacto
 - iii. Riesgos para la piel
 1. Causa quemaduras e irritación
 2. Usar guantes protectores, y ropa que cubra totalmente brazos y piernas
 3. Se debe tener cuidado especial con la cal viva, ya que genera suficiente calor para generar quemaduras
 - iv. Riesgos de inhalación
 1. El polvo de cal es irritante
 2. Usar mascarillas antipolvo
 3. Ante mayor exposición, contar con equipo apropiado
 - v. Seguridad del producto
-

1. Evitar mezclas accidentales de cal viva con agua, para evitar calor excesivo, ya que se pueden encender materiales combustibles, causar daño térmico a propiedades o personas
2. Se puede remover de los vehículos con un trapo humedecido con vinagre diluido, y lavarse con agua

vi. Primeros auxilios

1. El producto deberá tener una hoja de seguridad a la cual acudir, que entre otras indicaciones dirá:
 - a. Contacto con la piel: limpiar la cal, hasta que la elimine, y lave la piel con grandes cantidades de agua, si hay quemaduras administre primeros auxilios y busque asistencia médica
 - b. Contacto con los ojos: lavar con grandes cantidades de agua, buscar atención médica de inmediato a los primeros auxilios
 - c. Inhalación: Exponer a la persona al aire fresco, buscar atención médica de inmediato a los primeros auxilios
2. Cal seca en bolsas:
 - a. Las bolsas deben de entregarse en camiones de plataforma, espaciadas adecuadamente
 - b. Se cortan con un cuchillo o pala, la cal se vierte en montones o camellones transversales a la calzada
 - c. Se nivela con motoniveladora (en proyectos pequeños se puede usar equipos halados por un tractor o camión)
 - d. Se rocía agua