

**Implementación de los ensayos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño  
de materiales estabilizados con cal**

**ESTABILIZACIÓN DE MATERIALES FINOS CON CAL**

Informe final

Preparado por

**Unidad de Investigación (UI)**

**Ing. Fabián Elizondo Arrieta**

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) 2511-4382

E-mail: [felizondo@lanamme.ucr.ac.cr](mailto:felizondo@lanamme.ucr.ac.cr)

San José, Costa Rica

Julio 2009

# INDICE GENERAL

1. Introducción .....	4
1.1. Justificación e importancia.....	4
1.2. Objetivo General.....	6
1.3. Objetivos específicos.....	6
2. Conceptos generales .....	7
2.1. Factores que se deben considerar .....	7
2.2. Propiedades requeridas de un suelo para ser estabilizado con cal .....	7
3. Diseño y evaluación del desempeño de suelos estabilizados con cal .....	10
3.1. Metodología de diseño: Cuerpo de Ingenieros de la armada norteamericana .....	10
3.2. Metodología de diseño: National Lime Association.....	11
4. Esquema experimental .....	15
4.1 Diagrama de la investigación .....	15
4.1.1. Caracterización del suelo .....	15
4.1.2. Caracterización de la cal .....	15
4.1.3. Caracterización del suelo estabilizado con cal (Método de diseño CIA) .....	15
4.1.4. Caracterización del suelo estabilizado con cal (Lime Association) .....	15
5. Resultados obtenidos .....	17
5.1. Caracterización del suelo .....	17
5.2. Caracterización de la cal y Contenido estimado inicial.....	19
5.3. Resultados obtenidos .....	20
6. Análisis de resultados .....	22
6.1. Comentarios .....	22
6.2. Conclusiones .....	26
7. Referencias.....	27

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Selección de los aditivos.....	8
<b>Figura 2:</b> Esquema experimental .....	16
<b>Figura 3:</b> Ejemplo para selección de aditivo .....	18
<b>Figura 4:</b> Gráfico de la medición del pH contra el porcentaje de cal agregada. ....	19
<b>Figura 5:</b> %Óxidos de calcio y de magnesio.....	23
<b>Figura 6:</b> Compresión inconfínada (CI) .....	23
<b>Figura 7:</b> Compresión inconfínada (NLA).....	25

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Matriz para la selección del aditivo estabilizador .....	9
<b>Tabla 2:</b> Resistencia mínima a la compresión inconfínada para suelos estabilizados .....	11
<b>Tabla 3:</b> Requerimientos de durabilidad .....	11
<b>Tabla 4:</b> Recomendaciones para resistencias a compresión inconfínada .....	14
<b>Tabla 5:</b> Caracterización del suelo utilizado en el estudio .....	17
<b>Tabla 6:</b> Caracterización y variabilidad de la cal (Cal de primera).....	19
<b>Tabla 7:</b> Caracterización y variabilidad de la cal (Cal de segunda).....	19
<b>Tabla 8:</b> Cálculo del contenido estimado inicial de cal mediante pH. ....	20
<b>Tabla 9:</b> Resultados de ensayos de desempeño. Cal de primera. Método de diseño del cuerpo de Ingenieros de los EU.....	20
<b>Tabla 10:</b> Resultados de ensayos de desempeño. Cal de primera y segunda. Método de diseño del Lime Association.....	21

# 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 cimiento 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".

En esta guía se presenta el uso de la cal como un estabilizador ideal para materiales finos de media o alta plasticidad, el uso de la cal tiene como consecuencia una serie de mejoras tales como: el aumento de propiedades mecánicas de resistencia, reducción de la plasticidad y aumento de trabajabilidad, entre otros. Además este documento presenta un procedimiento para el diseño y evaluación del desempeño en laboratorio de materiales estabilizados con cal que requiere ser implementado y valorar su aplicabilidad en Costa Rica.

Por su parte, el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) y el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) han puesto en marcha un programa para la "Conservación de la Red Vial Nacional con superficie de lastre y tierra" como parte del Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010 referente a acciones estratégicas para contribuir con el país mediante la mejora de la red Vial Nacional, teniendo como una de sus metas la atención de 1500km/año de la red vial nacional en lastre.

En este sentido la Administración propone la conservación de redes viales distribuidas en las 6 regiones principales, que a su vez contemplan 38 zonas que incluyen un total de 2778km de la red

vial nacional en lastre y tierra, con una inversión proyectada para el 2009 de 25 000 000 colones (400 000 dólares).

Este nivel de inversión genera la necesidad de contar con un mayor número de técnicas y opciones para el mantenimiento de estas rutas que las utilizadas actualmente, las cuales se reducen básicamente a la nivelación y el relastrado de la superficie de ruedo, alternativas que aunque son comparativamente baratas requieren de un mantenimiento intensivo que se ve incrementado por el clima característico de nuestro 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 disponible en Costa Rica, utilizada como aditivo estabilizador de materiales finos que presenten índices de plasticidad (IP) medios y altos, y su efecto en las propiedades mecánicas y de durabilidad del material estabilizado.

## **1.3. Objetivos específicos**

- Implementar el procedimiento de diseño para la estabilización con cal, propuesto en la "Guía para la estabilización de rutas no pavimentadas" y valorar su aplicabilidad en Costa Rica.
- Evaluar el cumplimiento de una fuente de cal respecto a las especificaciones químicas y físicas solicitadas cuando será utilizada como aditivo estabilizador de materiales plásticos.
- Evaluar la variabilidad de una fuente de cal y el efecto de esta variabilidad en las propiedades mecánicas y de durabilidad del material estabilizado.

## **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.





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.

<sup>a</sup> 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.

<sup>b</sup>  $IP \leq 20 + 50 - \text{porcentaje pasando malla No. 200}$

Fuente: Department of The Army, The Navy, and The Air Force. Soil Stabilization for Pavements. Washington DC. United States. Octubre, 1994.

### 3. Diseño y evaluación del desempeño de suelos estabilizados con cal

#### 3.1. Metodología de diseño: Cuerpo de Ingenieros de la armada norteamericana

El siguiente procedimiento es recomendado para determinar el contenido de cal de un suelo estabilizado con cal.

**Paso 1:** Se calcula un contenido estimado inicial de cal mediante un ensayo de pH. En este método varias muestras de suelo cal son preparadas a diferentes niveles o dosificaciones de cal como 2, 4, 6 y 8 por ciento y el pH de cada muestra es obtenido. El contenido de cal más bajo al cual se logra un pH de alrededor de 12,4 (pH correspondiente a la cal) será el contenido inicial de cal.

**Paso 2:** Utilizando el contenido inicial de cal, se deben llevar a cabo ensayos de humedad densidad para determinar la densidad máxima y el contenido de humedad óptima. Los especímenes de suelo cal se prepararán de acuerdo con la norma ASTM D 3551. El ensayo de densidad humedad deberá realizarse de acuerdo con la norma ASTM D 1557 (Próctor Modificado).

**Paso 3:** Preparar muestras por triplicado de la mezcla suelo cal, para los ensayos de compresión inconfiada y durabilidad. Los contenidos de cal a los cuales se deben de preparar las mezclas serán: el contenido de cal determinado en el paso 2 y al 2% y 4% de cal por encima de este contenido.

Los especímenes deben de prepararse de acuerdo con el ASTM D 3551, cuando el porcentaje retenido en la malla N°4 sea menor al 35%, los especímenes serán de 2 pulgadas de diámetro y 4 pulgadas de altura, en caso de que este porcentaje sea mayor al 35% los especímenes deberán tener un diámetro de 4 pulgadas y una altura de 8 pulgadas. Las muestras deberán ser preparadas a la densidad y contenido de humedad que se prevé estará presente en el campo.

Los especímenes preparados se deberán de curar en un contenedor sellado para evitar pérdidas de humedad y carbonatación de la cal, el curado se hará preferiblemente por un periodo de 28 días a 23°C. También se puede utilizar un curado acelerado por 48 horas a 49°C, este tipo de curado ha demostrado tener resultados satisfactorios, sin embargo se recomienda realizar ensayos de chequeo bajo las condiciones normales.

**Paso 4:** Tres especímenes se deberán de fallar a compresión inconfiada de acuerdo con el procedimiento ASTM D1633, y otros tres especímenes deberán ser sometidos al ensayo de durabilidad, este ensayo de durabilidad será mediante ciclos de humedecido y secado (ASTM D559).

**Paso 5:** Se deberán de comparar los resultados obtenidos con los requerimientos solicitados de acuerdo con las especificaciones contractuales, o con las especificaciones recomendadas en la Tabla 2 y en la

Tabla 3. El contenido de cal más bajo, el cual cumpla con los requerimientos para los resultados de compresión inconfiada y demuestre la durabilidad requerida será el contenido de cal de diseño.

**Tabla 2:** Resistencia mínima a la compresión inconfiada para suelos estabilizados

Capa de suelo estabilizada	Resistencia mínima a la compresión, psi	
	Pavimento Flexible	Pavimento Rígido
Base	750	500
Subbase, material selecto y subrasante	250	200

Resistencia mínima a la compresión determinada a los 28 días para la estabilización con cal.

**Tabla 3:** Requerimientos de durabilidad

Capa de suelo estabilizada	Pérdida máxima permitida luego de 12 ciclos de humedecido y secado o ciclos de congelamiento y descongelamiento, como el porcentaje de peso inicial del espécimen
Granular IP < 10	11
Granular IP > 10	8
Limos	8
Arcillas	6

En caso de que la mezcla cumpla con los requerimientos de durabilidad no así con los requerimientos de resistencia se dirá que el suelo está en una condición modificada o mejorada. En caso de no cumplir los requerimientos de resistencia y durabilidad, se deberá de seleccionar contenidos de cal mayores y repetir los pasos del 1 al 5.

### 3.2. Metodología de diseño: National Lime Association

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 – 24horas. 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 Inconfiada 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 4.

**Tabla 4:** Recomendaciones para resistencias a compresión inconfiada

<b>Recomendaciones para resistencias a compresión inconfiada de mezclas de suelo-limoso.</b>				
Uso previsto	Saturación por 8 días (psi)	Ciclos congelación-descongelación <sup>a</sup>		
		3 ciclos (psi)	7 ciclos (psi)	10 ciclos (psi)
<b>SubBase</b>				
Pavimento rígido /Losas	50	50	90	120
Pavimento flexible (>10in) <sup>b</sup>	60	60	100	130
Pavimento flexible (8in - 10in) <sup>b</sup>	70	70	100	140
Pavimento flexible (5in - 8in) <sup>b</sup>	90	90	130	160
<b>Base</b>				
	130	130	170	200

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.

***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 propuesto en la "Guía para la estabilización de rutas no pavimentadas", al mismo tiempo que se analiza el cumplimiento de la cal utilizada y variabilidad en el tiempo respecto a las especificaciones para su uso como estabilizador de suelos.

Para los alcances de esta investigación se analiza un solo tipo de suelo y dos tipos de cal de un mismo producto (definidas como cal de primera y de segunda), este último evaluado en distintas fechas de producción con el fin de recoger información respecto a la variabilidad del producto y el cumplimiento con especificaciones.

### 4.1 Diagrama de la investigación

#### 4.1.1. Caracterización del suelo

- Límites de Atterberg
- Granulometría
- Plasticidad
- Próctor estándar

#### 4.1.2. Caracterización de la cal

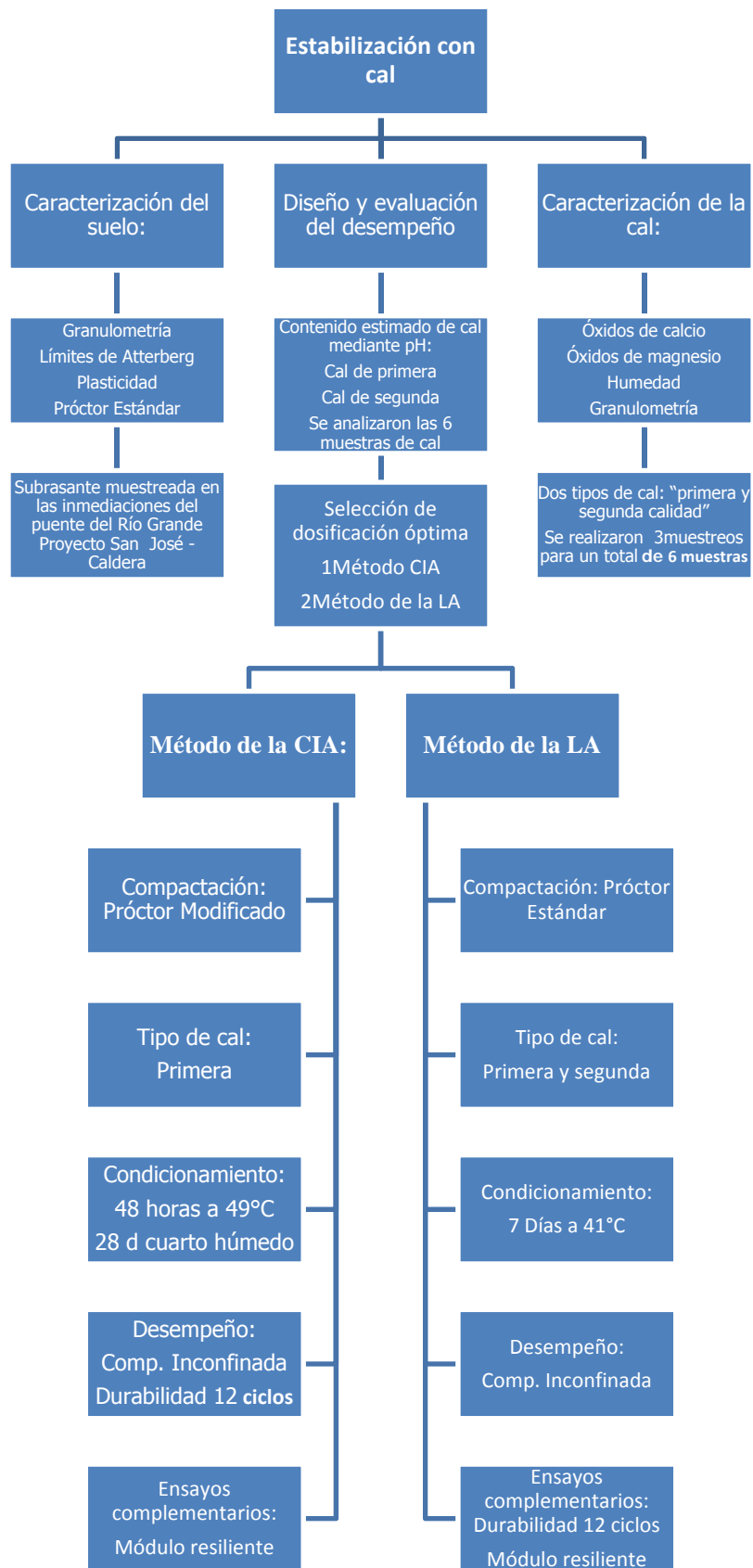
- Porcentaje de humedad
- Granulometría
- Porcentaje de óxido de calcio
- Porcentaje de óxido de magnesio

#### 4.1.3. Caracterización del suelo estabilizado con cal (Método de diseño CIA)

- Contenido estimado de cal (medición de pH): cal de primera y de segunda.
- Densidad máxima y humedad óptima mediante próctor modificado: cal de primera y segunda.
- Preparación de especímenes para evaluación del desempeño: compresión inconfiada, durabilidad ciclos de humedecido y secado, módulo resiliente. Un tipo de cal (primera) y tres dosificaciones de cal (estimado, +2%, +4%).
- Condicionamiento de especímenes: 28 días a 25°C y 2 días a 49°C.
- Evaluación del desempeño: Compresión inconfiada, durabilidad, módulo resiliente.

#### 4.1.4. Caracterización del suelo estabilizado con cal (Lime Association)

- Densidad máxima y humedad óptima mediante próctor estándar: cal de primera y segunda.
- Preparación de especímenes para evaluación del desempeño: compresión inconfiada, durabilidad ciclos de humedecido y secado, módulo resiliente. Dos tipos de cal (primera y segunda) y tres dosificaciones de cal (estimado, +2%, +4%).
- Condicionamiento de especímenes: 7 días a 41°C.
- Evaluación del desempeño: Compresión inconfiada, durabilidad, módulo resiliente.



**Figura 2:** Esquema experimental



## 5. Resultados obtenidos

### 5.1. Caracterización del suelo

Para la preparación de los especímenes de ensayo se utilizó material proveniente de la subrasante de las inmediaciones del puente de Río Grande, del Proyecto San José - Caldera, las propiedades de este material se detallan en la tabla 5.

**Tabla 5:** Caracterización del suelo utilizado en el estudio

Granulometría	Porcentaje de finos	85%
	Porcentaje de gravas	1%
	Porcentaje de arenas	14%
	Porcentaje de arcillas	65%
Límites de Atterberg	LL	63
	LP	38
	IP	25
Próctor Estándar y CBR	Wopt (%)	32,98
	yd max (kg/m3)	1376,7
	CBR	6.6
Clasificación	SUCS	MH
	AASHTO	A-7-5

Ejemplo de uso del gráfico para la selección del tipo de suelo y el aditivo correspondiente.

1. Ingresar con el por peso de arenas, como lo es en este ejemplo 14%.
2. Ingresar con el porcentaje por peso de finos, como lo es en este ejemplo 85%.
3. Determinar la zona de intersección de las líneas definidas, como lo es para el ejemplo la zona 3C, suelos de grano fino.
4. En base a la tabla 1, seleccionar el aditivo estabilizador.

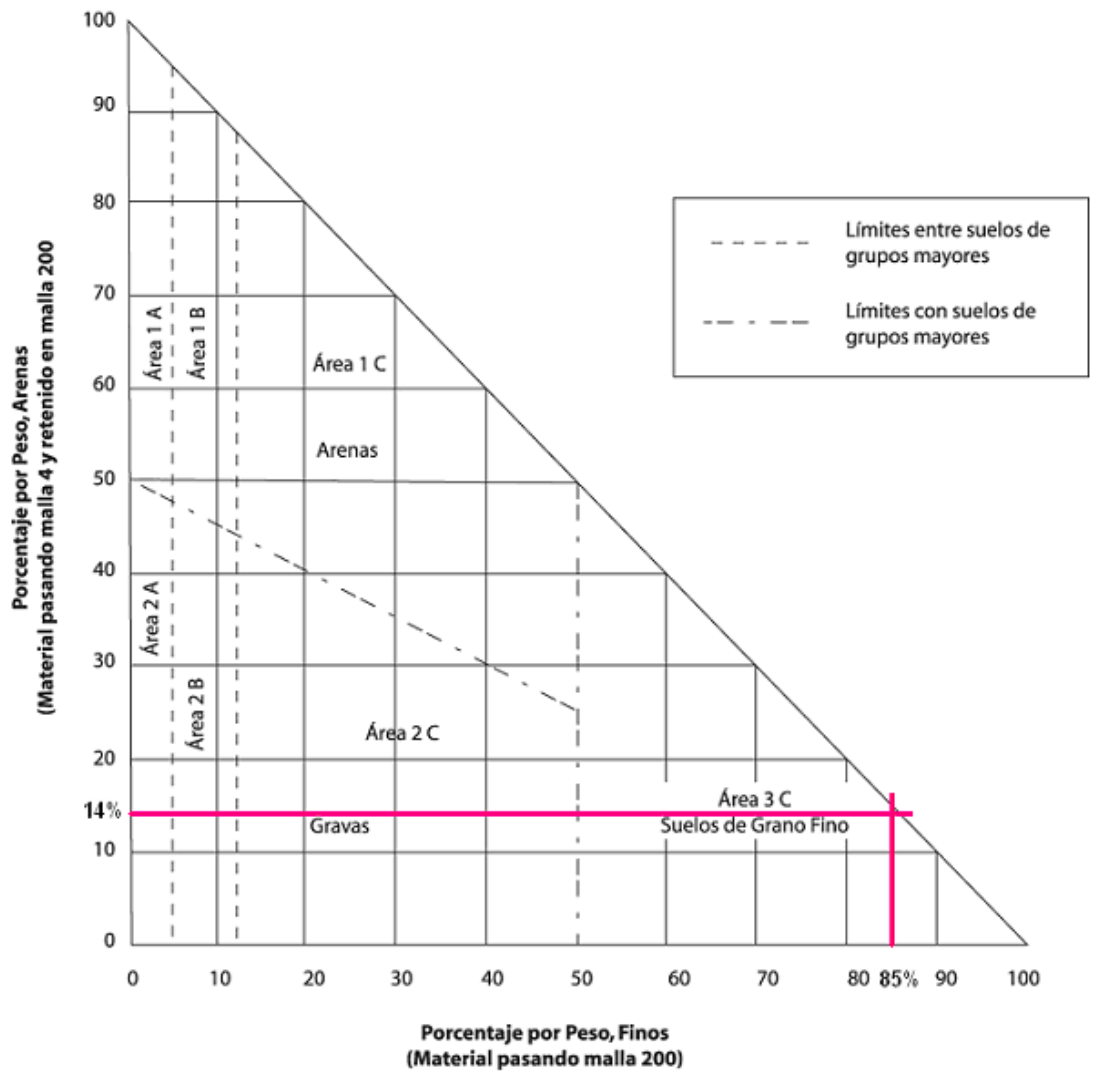
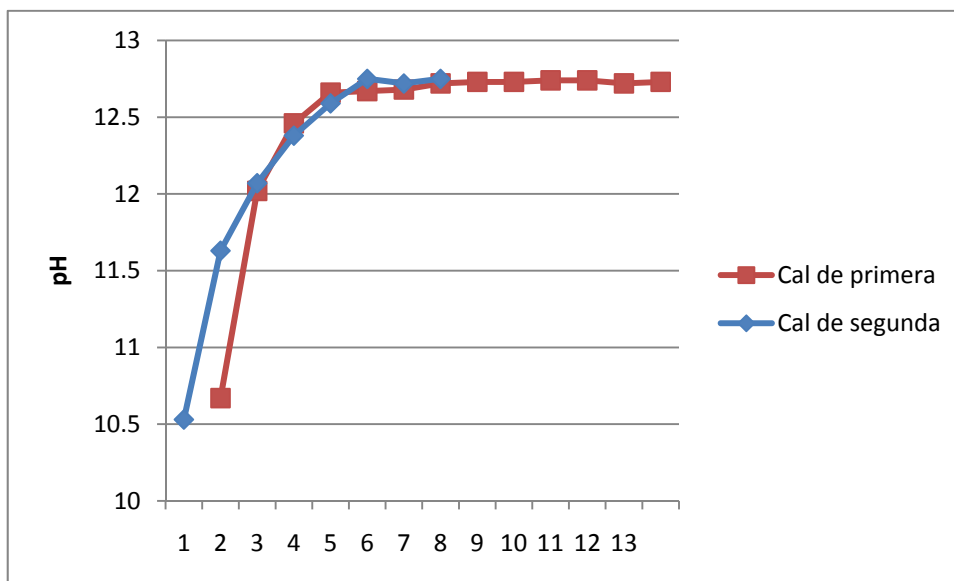


Figura 3: Ejemplo para selección de aditivo

## 5.2. Caracterización de la cal y Contenido estimado inicial

La caracterización de la cal se realizó mediante parámetros de: óxido de calcio, óxido de magnesio, dióxido de carbono, porcentaje de humedad, nivel de acidez y aspectos de granulometría.



**Figura 4:** Gráfico de la medición del pH contra el porcentaje de cal agregada.

**Tabla 6:** Caracterización y variabilidad de la cal (Cal de primera).

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra3	Especificación
Óxido de Calcio (% m/m)	70,8 ± 0,5	56,4 ± 0,5	87,1 ± 0,2	90% mín
Óxido de Magnesio (% m/m)	0,5 ± 0,1	1,36 ± 0,2	3,8 ± 0,1	
Dióxido de carbono (% m/m)	3,0 ± 0,3	4,0 ± 0,2	5,6 ± 0,1	5% máx
Porcentaje de humedad (%)	1,6 ± 0,1	0,79 ± 0,05	0,10 ± 0,08	2% máx
Malla 30 (600µm)	0,35 ± 0,07	0,15 ± 0,07	23,1 ± 0,4	3% máx
Malla 200 (75µm)	12,1 ± 0,4	8,2 ± 0,4	9,9 ± 0,5	25% máx
Charola	87,8 ± 0,6	91,9 ± 0,3	88,6 ± 0,1	

**Tabla 7:** Caracterización y variabilidad de la cal (Cal de segunda).

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra3	Especificación
Óxido de Calcio (% m/m)	43,0 ± 0,5	44,6 ± 0,5	68,2 ± 0,2	90% mín
Óxido de Magnesio (% m/m)	0,6 ± 0,1	1,37 ± 0,5	4,6 ± 0,1	
Dióxido de carbono (% m/m)	3,6 ± 0,3	3,7 ± 0,2	20,6 ± 0,1	5% máx
Porcentaje de humedad (%)	0,91 ± 0,05	0,77 ± 0,07	0,09 ± 0,05	2% máx
Malla 30 (600µm)	2,9 ± 2	23,1 ± 0,4	49,2 ± 0,6	3% máx
Malla 200 (75µm)	24,8 ± 0,2	11,0 ± 0,6	35,8 ± 0,5	25% máx
Charola	46 ± 1	66,1 ± 0,1	15,2 ± 0,1	

**Tabla 8:** Cálculo del contenido estimado inicial de cal mediante pH.

# Beaker	% cal	Cal de primera (Muestra1)				Cal de segunda (Muestra 2)			
		Masa agua (g)	Masa cal (g)	pH	Temp (°C)	Masa agua (g)	Masa cal (g)	pH	Temp (°C)
1	1	100	0,310	10,67	24,8	100	0,310	10,53	24,2
2	2	100	0,620	12,02	24,9	100	0,620	11,63	24,3
3	3	100	0,929	12,46	25,2	100	0,929	12,07	24,1
4	4	100	1,239	12,66	24,5	100	1,239	12,38	24,2
5	5	100	1,549	12,67	24,7	100	1,549	12,59	24,1
6	6	100	1,859	12,68	24,6	100	1,859	12,75	24,1
7	7	100	2,168	12,72	24,4	100	2,168	12,72	24,3
8	8	100	2,479	12,73	24,4	100	2,479	12,75	24,2
9	9	100	2,788	12,73	24,5				
10	10	100	3,098	12,74	24,0				
11	11	100	3,407	12,74	24,3				
12	12	100	3,717	12,72	24,1				
13	13	100	4,026	12,73	24,0				

### 5.3. Resultados obtenidos

**Tabla 9:** Resultados de ensayos de desempeño. Cal de primera. Método de diseño del cuerpo de Ingenieros de los EU.

Porcentaje de cal	Compresión inconfiada (psi)		% Perdidas Suelo-Cal	Modulo resiliente (MPa)	
	2días 49°C	28días 25°C		Máximo	Mínimo
11%	314,34	492,13	5,56	161,02	114,02
	285,89	432,39	4,30	181,60	128,78
	476,48	419,59	-	172,08	125,69
Promedio	358,90	448,03	4,93	171,56	122,83
13%	210,50	553,29	6,83	219,36	118,63
	140,81	332,83	8,03	136,25	65,39
	163,57	537,64	-	270,20	166,11
Promedio	171,62	474,58	7,43	208,60	116,71
15%	277,36	567,51	4,94	143,27	104,09
	293,00	523,42	6,70	198,34	93,58
	399,68	547,60	-	247,11	198,81
Promedio	323,34	546,17	5,82	196,24	132,24

**Tabla 10:** Resultados de ensayos de desempeño. Cal de primera y segunda. Método de diseño del Lime Association.

Porcentaje de cal	Compresión inconfiada 7d 42°C(psi)		Módulo resiliente Cal de primera (MPa)		Módulo resiliente Cal de segunda (MPa)	
	Cal de primera	Cal de segunda	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
4%	29,87	-	75,71	36,34	-	-
	38,4	-	113,69	82,42	-	-
	39,83	-	72,47	39,20	-	-
Promedio	36,03	-	87,29	52,65	-	-
6%	68,27	64,0	139,50	64,78	131,6	88,40
	61,16	69,7	123,30	82,85	78,91	49,11
	68,27	52,6	72,64	46,44	-	-
Promedio	65,90	62,1	111,81	64,69	105,26	68,75
8%	109,52	113,8	80,98	47,50	111,32	74,10
	135,12	105,3	187,16	137,93	96,86	67,39
	143,66	98,1	82,28	55,05	-	-
Promedio	129,43	105,7	116,81	80,16	104,09	70,74
10%	-	142,2	-	-	113,93	69,63
	-	136,5	-	-	211,22	124,14
	-	157,9	-	-	-	-
Promedio		145,6	-	-	162,58	96,88

## 6. Análisis de resultados

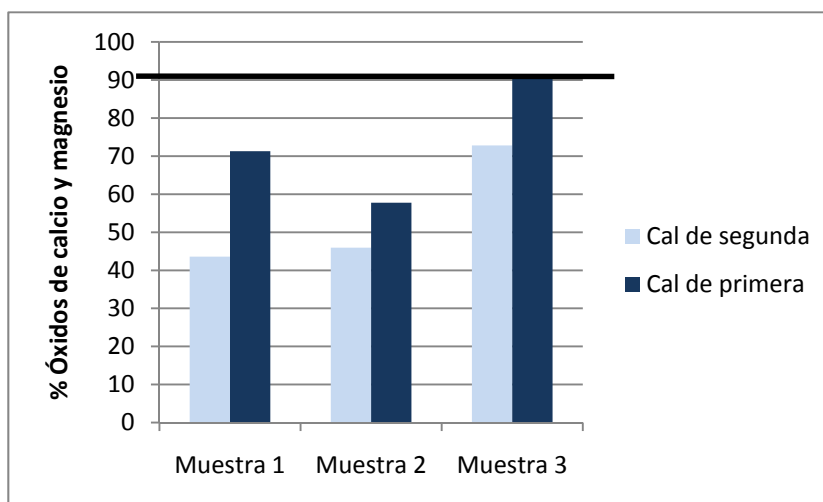
### 6.1. Comentarios

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 especificaciones las cuales garanticen el 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. Con base en lo anterior podemos indicar que existe un vínculo entre el método de diseño propuesto y las especificaciones asociadas, así como con los procesos constructivos implementados.

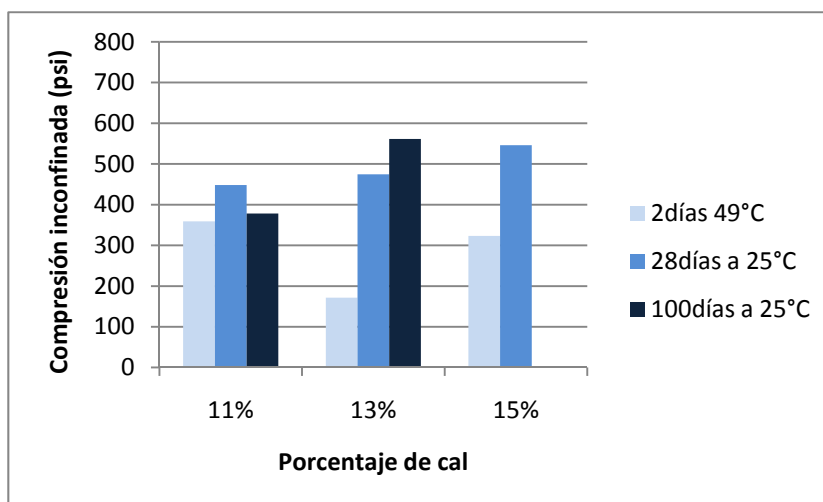
Dentro de los objetivos de este proyecto se plantea la valoración de dos métodos de diseño cada uno con especificaciones que responden a las condiciones que intentan representar y que fueron calibradas empíricamente. Otro objetivo consiste en valorar si la cal que se produce en Costa Rica produce una estabilización que logre cumplir con los requerimientos solicitados por cada método al mismo tiempo que se analiza la variabilidad en el tiempo de sus propiedades.

El suelo utilizado en este estudio se caracteriza como un limo de alta plasticidad ( $IP=25$ ) y con un CBR de 6,6 %, escogido por considerarse como un material crítico, de baja resistencia y alta susceptibilidad a la deformación.

En relación con la cal se analizaron dos tipos definidos como cal de primera y cal de segunda, las muestras utilizadas en este estudio son las muestras definidas como "*muestra 1*", como se puede ver en las tablas 6 y 7 existe un incumplimiento de sus propiedades respecto a las especificaciones requeridas para su uso en estabilización, en el parámetro correspondiente al contenido de óxido de calcio y óxido de magnesio, estos componentes son los encargados de reaccionar con los materiales plásticos del suelo para producir un efecto "cementante" por lo que entre menores sean sus proporciones se esperarían mayores contenidos de cal para lograr la estabilización. Otra característica de las muestras de cal analizadas es la alta variabilidad que inclusive provoca incumplimientos en otras propiedades, ambas situaciones se pueden observar en la figura 1.



**Figura 5:** %Óxidos de calcio y de magnesio.



**Figura 6:** Compresión inconfínada (CI)

Ambos métodos de diseño establecen un cálculo estimado inicial de cal mediante la medición del pH del suelo, los resultados obtenidos en el estudio definen un 4 % para la cal de primera y un 6 % para la cal de segunda aproximadamente (Tabla 8). No obstante para la valoración del Método de Diseño del CI, se analizó únicamente la cal de primera, contenidos de cal correspondientes a 11 %, 13 % y 15 %, y los dos condicionamientos propuestos por el método; 28 días a 25 °C y 48 horas a 49 °C.

El método del CI propone el cumplimiento de dos requerimientos para las subrasantes estabilizadas con cal (Tablas 2 y 3) las cuales corresponden a la compresión inconfínada y la durabilidad mediante ciclos de humedecido y secado.

De los resultados obtenidos (Tablas 9 y 10) podemos comentar lo siguiente; en cuanto al requisito de resistencia a la compresión inconfiada los especímenes curados por un periodo de 2 días a 49 °C presentan una alta variabilidad y no muestran una tendencia a aumentar su resistencia conforme se incrementa el contenido de cal (Figura 6). Los especímenes curados por un periodo de 28 días a 25 °C tienden a ser menos variables e incrementan su resistencia conforme aumenta los contenidos de cal.

Al comparar los resultados con las especificaciones propuestas en el método se puede identificar que los tres porcentajes utilizados se encuentran por encima de la resistencia a la compresión mínima (200 psi) solicitada para utilizar el material como sub base o material selecto en pavimentos flexibles, inclusive los resultados están muy por encima de este valor, con resistencias que van desde los 450 psi hasta los 550 psi aproximadamente lo que hace pensar que las dosificaciones pueden ser reducidas y aun así cumplirán con los requisitos de resistencia, sin embargo no llegan a ser suficiente para ser utilizada como una base. En cuanto al ensayo de durabilidad los resultados obtenidos para las tres dosificaciones se encuentran por debajo del máximo especificado para limos, correspondiente a 8 %. Los valores de Módulo resiliente o capacidad mecánica, pese a que no son requeridos por el método de diseño se presentan con el fin de evidenciar que se encuentran cercanos a los 200 MPa, los cuales corresponden a valores similares a los que se obtendría con una base granular.

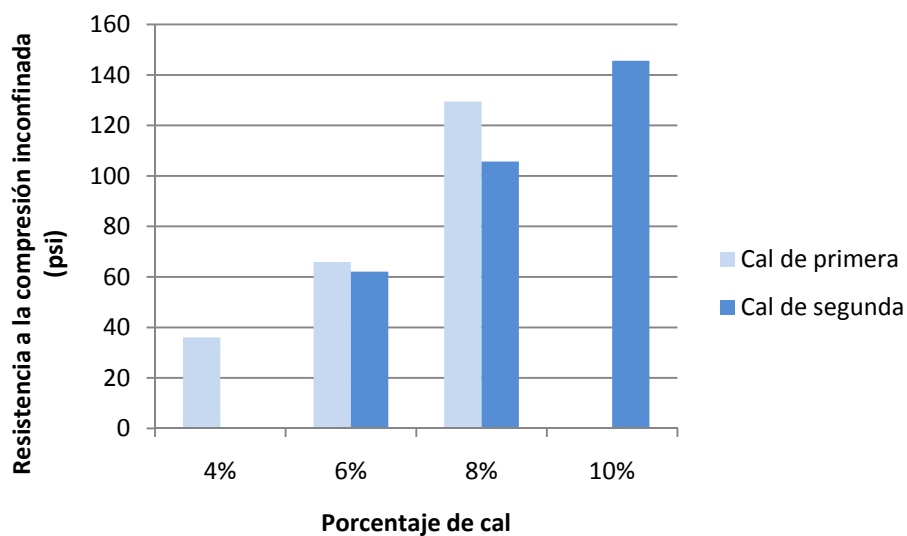
Una de las limitantes más importantes del método del CI es el tiempo que toma la realización del diseño, considerando que el condicionamiento acelerado de los especímenes (48 horas a 49 °C) no logró ser representativo del curado normal de la cal (28 días a 25 °C) el tiempo total que tarda la realización del diseño corresponde a un poco más de 2 meses, tomando en cuenta que la preparación de los especímenes tarda una semana, el condicionamiento 28 días, más el tiempo que se demora hacer los 12 ciclos del ensayo de durabilidad que corresponden a otros 28 días, hacen del método poco práctico para utilizarse en el campo. Es por esta situación que se planteó el diseño mediante el método de la NLA, este método tiene la ventaja que elimina el ensayo de durabilidad y lo sustituye por variaciones en las especificaciones de compresión inconfiada de acuerdo con las condiciones climáticas al que el suelo estabilizado estará sometido (Tabla 4), además modifica el proceso de condicionamiento (7 días a 42 °C) el cual requiere que los especímenes se introduzcan en bolsas selladas que permitan mantener la humedad dentro del especímenes, factor clave para lograr la optimización de la reacción con la cal. Una condición a tomar en cuenta es que los especímenes deben de ser compactados mediante próctor estándar y no modificado como se especifica en el método del CI.



Bajo el esquema anterior se realizaron los ensayos para los dos tipos de cal, las dosificaciones utilizadas fueron las estimadas mediante el método del pH más 2 y más 4 % en cada caso, además como parte del estudio de investigación se evaluó el ensayo de durabilidad y módulo resiliente sin embargo para el primero los especímenes no resistieron los ciclos de humedecido y secado, no obstante se debe recordar que este ensayo no forma parte de este procedimiento de diseño y no debería relacionarse con un posible mal desempeño del material ya que como se mencionó anteriormente existe una correlación entre los métodos de diseño y calibraciones que se han hecho con desempeños en campo, por lo que al existir diferencias en el método de compactación en laboratorio no podría especificarse un requisito para estas condiciones a menos que exista una validación.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9 y en la figura 4 se sintetizan las tendencias. Podemos indicar que existe un mayor efecto o mejoría en resistencias alcanzadas con la cal de primera respecto a la cal de segunda, además de acuerdo con los resultados

obtenidos y siendo la resistencia inconfiada el único parámetro especificado para valorar el cumplimiento o no de una subrasante estabilizada por este método (Tabla 4), podemos indicar que ante las condiciones presentes en Costa Rica en donde no existirían ciclos de congelamiento y descongelamiento de esta capa, se requerirían dosificaciones de 6 % para estabilizar un material que vaya a ser utilizado como sub base, en pavimentos con estructuras robustas de más de 25 cm sobre la capa estabilizada, y en caso de estructuras con espesores a los 12 centímetros requeriríamos dosificaciones cercanas al 8 %. Por último si el material estabilizado fuera a utilizarse como una base la dosificación que se debe de emplear deberá ser cercana al 10%.



**Figura 7:** Compresión inconfiada (NLA)

## 6.2. Conclusiones

Como resumen de esta investigación se rescatan las siguientes conclusiones:

- El material de subrasante presentó una mejoría significativa en sus propiedades mecánicas y de durabilidad al ser estabilizado con cal.
- La cal evaluada en el estudio presenta una alta variabilidad en sus propiedades e incumplimientos respecto a los requisitos requeridos internacionalmente, se propone un estudio que busque cuantificar el efecto de esta variabilidad en las propiedades mecánicas del material estabilizado así como analizar otras fuentes de cal para valorar si se repite esta condición.
- El método de la NLA se propone como un método más factible para ser propuesto como método de diseño debido a la reducción en el tiempo requerido para el diseño y su correspondencia con los resultados del método del CI.
- De los resultados obtenidos para ambos métodos de compactación (próctor estándar y modificado) se hace evidente un adecuado proceso de compactación en campo que optimice los beneficios de la estabilización con cal.
- Con dosificaciones iguales o mayores al 6 % 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 e inclusive como base.
- Se recomienda ampliar esta investigación a otros tipos de materiales que presenten condiciones aptas para ser estabilizado con cal, además se hace necesario la construcción de tramos de prueba que permitan valor en campo el desempeño real de material.

## 7. Referencias

- Zaghoul S. (1996). Benefits of Constructing Smoother Pavements. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 65, pp747-770
- Budras, J. (Agosto 2001). A Synopsis on the Current Equipment Used for Measuring Pavement Smoothness. Recuperado el 11 de diciembre 2007 de:  
<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/smoothness/rough.cfm>
- Ventura, J. Alvarenga E. (Mayo 2005). Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano. República de El Salvador
- Crespo del Río, R (Setiembre 2003). Variación del IRI según la longitud de evaluación. Área de Gestión de Infraestructura. AEPO Ingenieros Consultores. Madrid, España.
- Ningyuan, L. Marciello, F. Kazmicrowski, T. Quality Assurance Applied in Measuring Pavement Roughness of Ontario Provincial Roads. Ontario, Canadá. Recuperado el 18 de diciembre 2007 de: <http://pms.nevadadot.com/2002presentations/47.pdf>
- Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP) (Julio 1999). Summary of Pavement Smoothness Specifications in Canada and Around the World. Technical Brief #16. Canada. Recuperado 18 de diciembre 2007 de: <http://www.cshrp.org/products/br-6-e.pdf>
- Townsend, E. Veliz, C. Determinación de umbrales de rugosidad (IRI) obtenido de base de datos de caminos con controles receptivos. Chile. Recuperado el 19 de diciembre 2007 de: [http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos\\_pdf/43EdgardoTownsendUmbralesrugosidad.pdf](http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/43EdgardoTownsendUmbralesrugosidad.pdf)
- Sayer, M. (1995). On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile. Transportation Research Record, Transportation Research Board (TRB), Washington, DC. No. 1501, pp 1-12.

- Sayers, M. Karamihas, S. (Setiembre 1998). The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. University of Michigan, USA. Recuperado el 19 de diciembre 2007 de: <http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness>
- Awasthi, G. Singh, T. (Mayo 2003). On Pavement Roughness Indices. IE (I) Journal-CV. Recuperado el 19 de diciembre 2007 de:  
<http://www.ieindia.org/publish/cv/0503/may03cv6.pdf>
- Montes, R. Determinación de la Rugosidad de los Pavimentos mediante Perfilometría Longitudinal. Sub-Unidad de Normalización, Laboratorio Nacional de Vialidad. Chile
- UMTRI Research Review (Enero-Marzo 2002). The Shape of Roads to Come: Measuring and Interpreting Road Roughness Profiles. Volumen 33. Número 1.
- De Solminihaç, H., Cabrera, C. Bengoa, E. Evaluación de la Capacidad Estructural y Funcional del Pavimento durante el Proceso de Construcción. Chile.