

Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio

Characterization of a clay soil treated with Calcium Hydroxide

Fecha de recepción: 14 de marzo de 2012
Fecha de aprobación: 17 de mayo de 2012

Carlos Hernando Higuera Sandoval*
Jenny Carolina Gómez Cristancho**
Óscar Eduardo Pardo Naranjo***

Resumen

Propone una metodología para el tratamiento de suelos susceptibles (arcillas) mediante la incorporación del hidróxido de calcio como estabilizante, en busca del mejoramiento de sus características físicas, mecánicas y químicas. La caracterización del suelo consistió en la elaboración de una serie de ensayos de laboratorio que determinaran sus características físico-mecánicas y químicas. Además de esto, se diseñaron mezclas de suelo-hidróxido de calcio en las que se varió el porcentaje de aditivo entre el 2% y el 12%, con el fin de observar las tendencias de sus características y poder así seleccionar el porcentaje óptimo de hidróxido de calcio, que proporcionará mejores condiciones de trabajabilidad.

Abstract

Here is proposed a methodology for the susceptible soils' (clay) treatment, by adding calcium hydroxide as a stabilizer, in search of improving their physical, mechanical and chemical characteristics.

The soil characterization consisted in developing a laboratory tests' series, to determine its physico-mechanical and chemical nature. Besides, there were some calcium hydroxide mixtures' designed, in which the additive percentage varied between 2% and 12%, in order to monitor the trends in its features, to enable us to select the calcium hydroxide's optimal percentage, to provide the studied soil's best workability.

* Ingeniero Transportes y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Especialista en Vías Terrestres, Universidad del Cauca. Magister en Ingeniería de Vías Terrestres, Universidad del Cauca. Profesor, Escuela de Ingeniería Transportes y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. Correo electrónico: carlos.higuera@uptc.edu.co

** Estudiante Ingeniería de Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Correo electrónico: carolgomez88@gmail.com

*** Estudiante Ingeniería de Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Correo electrónico: oepn26@hotmail.com

del suelo estudiado. Como resultado se obtuvo una mezcla que optimizó el comportamiento del suelo original en cuanto a sus propiedades de plasticidad, resistencia y estabilidad, transformando un suelo pobre en uno adecuado para estructuras de pavimentos.

Palabras clave: Suelos susceptibles, Hidróxido de calcio, Tratamiento de suelos susceptibles.

The result was a mixture which optimized the original soil behavior in plasticity's properties, strength and stability, by transforming a poor soil into a suitable one to be used in paved structures.

Key words: Susceptible Soil, Clay Soils, Calcium Hydroxide, Susceptible Soil's Treatment.

I. INTRODUCCIÓN

La utilización del hidróxido de calcio como método de estabilización es una gran opción para el mejoramiento de suelos susceptibles, como es el caso de las arcillas, cuya presencia en estructuras de pavimentos genera, como se sabe, grandes problemas, como deformaciones, agrietamientos, estabilidad volumétrica, pérdida de la banca y baja resistencia, entre otros. La estabilización con el hidróxido de calcio cambia considerablemente las características del suelo, ya que le aportan resistencia y estabilidad a largo plazo, permeabilidad, compresibilidad, trabajabilidad, reducción de la plasticidad y permanencia de las propiedades adquiridas.

Con el diseño y las técnicas de construcción apropiadas, el tratamiento con hidróxido de calcio transforma químicamente los suelos susceptibles en materiales utilizables; adicionalmente, el soporte estructural de los suelos estabilizados con este aditivo puede ser aprovechado en el diseño de pavimentos. Por esta razón, es necesario contar con un procedimiento para el diseño de tratamientos y estabilización del suelo (arcillas) con hidróxido de calcio, que describa en forma detallada la metodología apropiada, con el fin de poderlo implementar como capa mejorada en la estructura de un pavimento.

Con todo esto y siendo tan común encontrar suelos susceptibles como lo son los limos y las arcillas, en el suelo de soporte o subrasantes presentes en la gran mayoría de proyectos de construcción de estructuras de pavimentos, y que requieren ser intervenidos, es de gran importancia contar con un método que permita determinar una mezcla óptima, de acuerdo con las condiciones existentes para mejorar la composición del suelo o capas del pavimento.

El presente proyecto de investigación contó con el apoyo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC, se encuentra registrado en la división de investigaciones bajo el código SGI-974

y hace parte de los proyectos del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – Grinfavial– de la Escuela de Transporte y Vías.

La caracterización de los materiales se ejecutó en las instalaciones de la Uptc, en los laboratorios de Suelos y Pavimentos, Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Laboratorio de Física del grupo de investigación GSEC, durante el periodo comprendido entre los meses de septiembre y diciembre del año 2011.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Estabilización

Se entiende por estabilización de suelos una serie de procesos mecánicos, físicos, físico-químicos y químicos que transforman las propiedades de los suelos que interesan en las aplicaciones de la ingeniería, obteniendo un material apto para su utilización, que busca mejorar las propiedades tales como: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad y permanencia de las propiedades adquiridas [1]. Esto significa, entonces, no solo llegar a un estado del suelo con suficiente resistencia a la acción destructora y deformante de las cargas, sino también asegurar la permanencia de ese estado a través del tiempo [2].

1) Tipos de estabilización de suelos. El primer problema que se plantea el ingeniero diseñador de pavimentos, cuando no dispone de materiales granulares adecuados para la construcción de las capas del pavimento, es la decisión sobre el tipo de tratamiento de estabilización más adecuado para los suelos locales disponibles, con el fin de hacerlos aptos para la construcción de dichas capas [2]. Según el tipo de suelo por tratar, el diseñador debe determinar el tipo de estabilización más conveniente, dentro de los cuales encontramos:

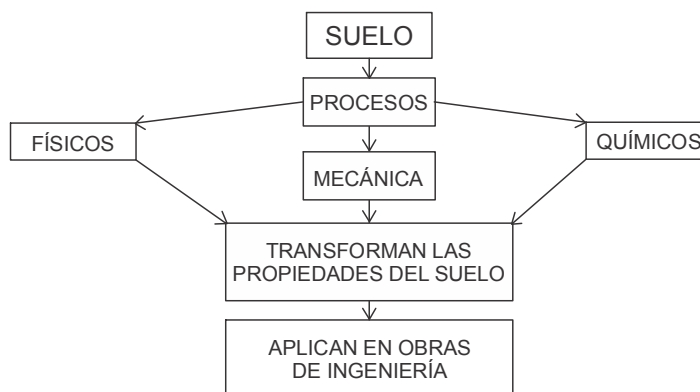


Figura 1. Diagrama de flujo de estabilización de suelos

Fuente: HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Estabilización de Suelos. Popayán. 2010

Tabla 1. Tipos de estabilización

TIPO	ESTABILIZACIÓN	PRODUCE
Mecánica	Proceso de compactación	Densificación
Física	Granulometría Suelo betún	Fricción y cohesión Cohesión e impermeabilización
Físico-química	Suelo-cal	Intercambio iónico y cementación
Química	Suelo-cemento	Intercambio iónico y cementación

Fuente: DORFMAN, Boris. Estabilización de suelos. Universidad del Cauca. Popayán. 1988

Estabilización mecánica. Se realiza por medio del proceso de compactación. La compactación mejora las propiedades del suelo y en particular la densificación del suelo, el aumento de resistencia y la capacidad de carga, así mismo ayuda a reducir su compresibilidad y aptitud para absorber agua [3].

Estabilización física. Busca aumentar la fricción, la cohesión y la impermeabilidad. Cuando un material se ajusta granulométricamente por medio de adición de material o ajustes a su banda granulométrica, genera en el material resultante mayor fricción entre las partículas y cohesión de la masa del suelo.

Estabilización físico-química. Se realiza en suelos con gran cantidad de finos plásticos, como limos y

arcillas especialmente. Si el suelo es tratado con hidróxido de calcio produce en la masa de suelo resultante un intercambio iónico y cementación. Generalmente, con este tipo de estabilización se busca reducir la plasticidad del suelo, aumentar su resistencia, trabajabilidad y estabilidad volumétrica.

Estabilización química. Se realiza en suelos finos tipo arenas, mediante la adición de un agente hidráulico, como es el caso del cemento Portland, que al mezclarse íntimamente con el suelo y al desarrollar su propiedad hidráulica, produce una reacción química, intercambio iónico y cementación. La resistencia del suelo y su estabilidad aumentan significativamente.

Tabla 2. Aplicabilidad de los métodos de estabilización

<i>Suelo</i>		<i>Arcillas finas</i>	<i>Arcillas gruesas</i>	<i>Limos finos</i>	<i>Limos gruesos</i>	<i>Arenas finas</i>	<i>Arenas gruesas</i>
Tamaño de las partículas (mm)		<0.0006	0.0006–0.002	0.002–0.01	0.01–0.06	0.06–0.4	0.4–2.0
Estabilidad volumétrica		Muy pobre	Regular	Regular	Buena	Muy Buena	Muy Buena
Tipo de Estabilización	Cal						
	Cemento						
	Asfalto						
	Mecánica						
Rango de máxima eficiencia							
Efectiva, pero el control de calidad puede ser difícil							

Fuente: IDU. Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos. Bogotá D.C., 2005. p.5.

B. Tipos de suelos

En los suelos cohesivos no existe un verdadero esqueleto granular, la fracción fina predomina y las partículas mayores, si existen, quedan dispersas en las finas. Por otra parte, la actividad de la fracción fina, es decir, su tendencia a rodear cada partícula de películas de agua «gruesas» que actúan como lubricante, destruye su capacidad para servir de medio ligante y determinar marcados cambios de volumen y pérdida de la resistencia del sistema suelo-agua, bajo cargas.

En los suelos cohesivos la estabilización tiende a reducir los cambios de volumen y la caída de su resistencia bajo cargas por incremento de la humedad, permitiendo que suelos inaptos para subrasantes puedan ser usados como tales, o bien, que mejores suelos puedan ser utilizados como sub-bases y, excepcionalmente, como bases. La diferenciación de la estabilización de ambos tipos de suelos es absolutamente necesaria, y una de

las generaliza-ciones más peligrosas es no indicar expresamente, al referirse a resultados prácticos o de ensayos de laboratorio, cuál es el tipo de suelo usado en cada caso particular [4].

El comportamiento de un suelo con finos y agregados es el siguiente:

- No existe un verdadero esqueleto
- La fracción fina predomina
- Disminuye su peso volumétrico
- Baja permeabilidad
- Baja estabilidad
- Afectado por condiciones hidráulicas
- No se dificulta su compactación

Tabla3. Comparación de técnicas de estabilización

<i>Material</i>	<i>Estabilización</i>			
	<i>Mecánica</i>	<i>Cemento</i>	<i>Cal</i>	<i>Emulsión</i>
<i>Grava natural</i>	Puede ser necesaria la adición de finos para prevenir desprendimientos	Probablemente este no es necesario, salvo si hay finos plásticos. Cantidad de 2% - 4%	No es necesaria salvo que los finos sean plásticos. Cantidad de 2% - 4%.	Apropiada si hay deficiencias de finos, aproximadamente el 3% de asfalto residual
<i>Arena limpia</i>	Adición de gruesos para dar estabilidad y de finos para prevenir desprendimientos	Inadecuada: produce material quebradizo	Inadecuada: No hay reacción	Muy adecuada. De 3% a 5% de asfalto residual
<i>Arena arcillosa</i>	Adición de gruesos para mejorar resistencia	4% - 8%	Es factible dependiendo del contenido de arcilla	Se puede emplear. De 3% a 4% de asfalto residual
<i>Arcilla arenosa</i>	Usualmente no es aconsejable	4% - 12%	4% a 8% dependiendo del contenido de arcilla	Se puede emplear pero no es muy aconsejable
<i>Arcilla pesada</i>	Inadecuada	No es muy aconsejable. La mezcla puede favorecer con un pretratamiento con 2% de cal y luego entre el 8% y 15% de cemento	Muy adecuada, entre el 4% y 8% dependiendo del contenido de arcilla	Inadecuada

Fuente: IDU. Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos. Bogotá D.C., 2005.

1) Suelos expansivos. Las propiedades químicas y físicas de los suelos están controladas, en gran parte por la arcilla y el humus, que actúan como centros de actividad a cuyo alrededor ocurren reacciones químicas y cambios en los nutrientes. La mayoría de los minerales de la arcilla posee estructuras químicas con forma laminar. La combinación de estas láminas da lugar a diferentes minerales arcillosos, tales como caolinita, montmorillonita, illita, etc. Estas estructuras tienen la capacidad de retener agua, que queda absorbida mediante enlaces electrostáticos. Pero, cuando las moléculas de agua se alejan de las partículas de arcilla, pierden el estado de atracción y se convierten en agua suelta [5].

Los suelos expansivos son aquellos que muestran un cambio volumétrico significativo bajo la presencia de agua. Así, ciertas arcillas, en cuya composición

entra a formar parte el mineral montmorillonita, tienen espacios entre las láminas que pueden absorber agua provocando su expansión. Estos materiales se conocen como arcillas expansivas o suelos expansivos, y son la causa de la mayoría de los problemas derivados de la construcción de carreteras o edificios en suelos que tengan esta capacidad.

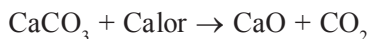
2) Arcilla. La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años. Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie

lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0.002 milímetros.

Las arcillas se pueden clasificar en primarias y secundarias, según como se encuentran en la naturaleza. Las arcillas primarias son las que se encuentran en el mismo lugar en donde se formaron, es decir, no han sido transportadas por el agua o el viento. La única arcilla primaria conocida es el caolín, que tiene un grano más grueso y es menos plástico, y en estado puro es casi blanco. Las arcillas secundarias son las que han sido transportadas del lugar en que se originaron; el agua es el elemento más común que las transporta, también el viento y los glaciares lo hacen; estos tipos de arcillas son mucho más comunes y se componen de más elementos como mica, hierro, cuarzo y otros minerales procedentes de diferentes fuentes.

3) La cal. La cal es producto de la calcinación de la piedra caliza, y sus propiedades varían de acuerdo con el contenido de arcilla y la temperatura de calcinación. La explicación más sencilla del procedimiento químico de la producción de la cal es la siguiente.

Cal viva. El carbonato de calcio se descompone en óxido de calcio y anhídrido carbónico que se elimina con los productos gaseosos de la combustión. El óxido de calcio, llamado cal viva, es un producto sólido, de color blanco, amorfo aparentemente, con un peso específico entre 3.18 y 3.40. Es inestable, por tener gran avidez de agua.



Carbonato de Calcio + Calor → Óxido de calcio + Anhídrido Carbónico

Cal apagada. El hidróxido de calcio, también conocido como cal muerta o cal apagada, es un hidróxido cáustico con la fórmula Ca(OH)_2 . Es un cristal incoloro o polvo blanco, obtenido al reaccionar óxido de calcio con agua.

Si se calienta a 512 °C, el hidróxido de calcio se descompone en óxido de calcio y agua. La solución de hidróxido de calcio en agua es una base fuerte

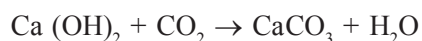
que reacciona violentamente con ácidos y ataca varios metales. Se enturbia en presencia de dióxido de carbono por la precipitación de carbonato de calcio.



Óxido de Calcio + Agua → Hidróxido de calcio + Calor

En este caso hay un proceso de pulverización con aumento considerable de volumen. La avidez por agua de la cal viva es tan grande que absorbe vapores de agua de la atmósfera y de las sustancias orgánicas produciendo efectos cáusticos. Tal circunstancia hace peligroso el manejo de la cal viva, por cuanto puede producir quemaduras si no se adoptan las precauciones necesarias.

El hidróxido de calcio es un cuerpo sólido, blanco, amorfo, pulverulento, soluble parcialmente en el agua. La cal apagada en pasta tiene la propiedad de endurecer lentamente en el aire enlazando los cuerpos sólidos, por lo cual se la emplea como aglomerante. Este endurecimiento recibe el nombre de fraguado y se debe, en principio, a una desecación por evaporación del agua con la que forma la pasta, y luego de una carbonatación por absorción del anhídrido carbónico del aire:



Hidróxido de Calcio + Anhídrido Carbónico → Carbonato de Calcio + Agua

Cal hidráulica. Procede de la calcinación de rocas calizas con más del 5% de arcilla. Da un producto que reúne las propiedades de las cales grasas y, además, presenta la propiedad de fraguar en sitios húmedos y debajo del agua por formación de silicatos y aluminatos de calcio hidratados.

Concepto de cal útil vial. Se denomina «cal útil vial – CUV» a la cal de origen o liberada que es capaz de reaccionar química y físicamente con el suelo, produciendo cambios en su naturaleza y sus propiedades, y provocando cementación al crearse productos cementantes hidráulicos. La determinación

de la cal útil vial es básica y fundamental, puesto que permite expresar todos los ensayos o dosificaciones de suelo-cal respecto a este parámetro.

Las cales comerciales generalmente no son puras y se designan por el porcentaje de CUV, que puede ser del 50%, 60%, 75% o 80%. En el caso de utilizar para los ensayos de laboratorio y los trabajos de estabilización de campo una cal, esta deberá ser analizada respecto a su pureza o, en otras palabras, según su porcentaje de cal útil vial. A manera de ejemplo, se tiene: para una cal del 75% de CUV, quiere decir que de cada kilogramo (1 kg) de cal, solamente reacciona con el suelo 0.75 kilogramos, siendo la diferencia de 0.25 kg, material inerte que no contribuye al proceso de estabilización buscado.

Será entonces de suma importancia el determinar qué porcentaje de una determinada cal comercial es útil desde el punto de vista vial, como único medio de controlar la variabilidad del producto.

4) El agua

El agua requerida para la compactación de la mezcla suelo-cal debe ser limpia, libre de impurezas, de sales o de residuos químicos.

III. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para caracterizar el suelo arcilloso y las mezclas suelo-hidróxido de calcio se resume en la siguiente figura.

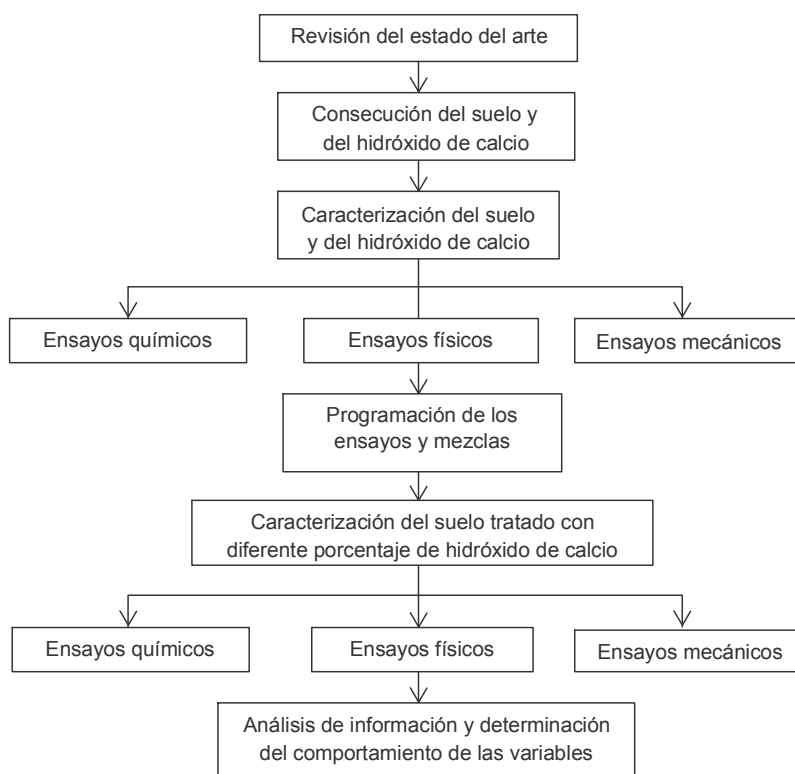


Figura 2. Metodología para la caracterización del suelo arcilloso y las mezclas suelo-hidróxido de calcio

Para la realización de los ensayos de laboratorio comprendidos en la caracterización química y fisico-mecánica del suelo y de las mezclas, se obtuvieron aproximadamente 450 kg de suelo para cubrir en su totalidad los ensayos, este material se extrajo de las instalaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Uptc (Parqueadero Edificio de Artes), en la ciudad de Tunja (Boyacá).

La cal viva se obtuvo en las caleras del municipio de Nobsa (Boyacá) y fue hidratada y tamizada en el laboratorio. Para el diseño de las mezclas se necesitaron aproximadamente 30 Kg de hidróxido de calcio para luego ser almacenado en bolsas y aislado de factores ambientales que pudieran alterar sus propiedades.

A. Caracterización del suelo sin tratar

Para la caracterización del suelo sin tratar se

realizaron varios ensayos químicos que comprenden la composición química mediante el equipo de difracción de rayos X, la determinación del pH con la ayuda del pH-metro y la toma de una imagen micrográfica mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) para observar la distribución de las partículas.

En la siguiente tabla se resumen los ensayos fisico-mecánicos y químicos para la caracterización del suelo sin tratar.

B. Caracterización química del hidróxido de calcio

Para el diseño de las mezclas suelo-hidróxido de calcio fue necesario determinar el porcentaje de Cal Útil Vial (CUV) con el que cuenta el hidróxido de calcio obtenido. Para esto se ejecutaron los ensayos químicos que se mencionan a continuación.

Tabla 4. Ensayos físico-mecánicos y químicos para la caracterización del suelo sin tratar

MATERIAL	CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMA INVIAS
SUELO SIN TRATAR	Física	Humedad	INVE - 122 -07
		Granulometría	INVE - 123 -07
		Peso específico	INVE - 217 -07
		Límites de consistencia	INVE - 125 -07, INVE - 126 -07
	Mecánica	Compactación	INVE -141 -07, INVE - 142 -07
		CBR del suelo fino	INVE - 148 -07
		Compresión inconfnada	INVE - 152 -07
		Ensayo de absorción	-
		Ensayo de ascensión	-
Química	Estabilidad hídrica	-	
	Análisis químico	-	
	pH	INVE - 131 -07	
		Micrografía	-

Tabla 5. Ensayos químicos del hidróxido de calcio

MATERIAL	CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMA INVIAS
Hidróxido del Calcio	Química	pH	INVE - 131 -07
		Composición química	-
		Micrografía	-

C. Caracterización de las mezclas

Para determinar el comportamiento que presenta el suelo al ser tratado con un aditivo como el hidróxido de calcio, se diseñaron seis mezclas con diferentes porcentajes (2%, 4%, 6%, 8%, 10% y 12%). A cada una de las mezclas se le realizó la misma serie de ensayos que se le aplicaron al suelo sin tratar, para poder tener un comparativo en cada una de las propiedades físicas, mecánicas y químicas, y observar su tendencia.

D. Diseño de las mezclas

Para determinar la cantidad de aditivo necesario según el porcentaje que contenga la mezcla, se calculó la cantidad corregida de hidróxido de calcio. A continuación se presenta un ejemplo para el cálculo de una mezcla suelo-hidróxido de calcio del 4% de un cilindro del ensayo de Proctor normal.

- Cálculo del peso de los sólidos

$$\begin{aligned}
 \text{Humedad natural } (H_n) &= 3.6\% \\
 \text{Peso muestra húmeda } (W_{mh}) &= 3500 \text{ gr} \\
 \text{Peso de la muestra seca } (W_{ms}) &= W_{mh} / (1 + H_n) = \\
 &= 3500 \text{ gr} / (1 + 0.036) = 3378.38 \text{ gr} \\
 \% \text{ Ca(OH)}_2 \text{ mezcla } 4\% &\rightarrow 100\% \text{ de Ca(OH)}_2 \\
 \% \text{ Ca(OH)}_2 \text{ (CUV)} &= 50\% \\
 \% \text{ Ca(OH)}_2 \text{ Corregido} &= 4\% (100\% / 50\%) = 8\% \\
 \text{Peso Ca(OH)}_2 (W_{\text{Ca(OH)}_2}) \text{ Corregido} &= W_{ms} * \% \text{ Ca(OH)}_2 \text{ Corregido} = 3378.38 \text{ gr} * 0.08 = 270.27 \text{ gr} \\
 \text{Peso de sólidos } (W_s) &= W_{ms} + W_{\text{Ca(OH)}_2} \text{ Corregido} = 3378.38 \text{ gr} + 270.27 \text{ gr} = 3648.65 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

- Cálculo de la cantidad de agua

$$\begin{aligned}
 \text{Humedad óptima } (H_{deseada}) &= 12\% \\
 \text{Humedad adicional } (H_{adicional}) &= H_{deseada} - H_n = 12\% - 3.6\% = 8.4\% \\
 \text{Humedad de agua } (W_{agua}) &= W_s * H_{deseada} = 3648.65.0 \text{ gr} * 0.084 = 306 \text{ gr (ml)}
 \end{aligned}$$

E. Caracterización físico-mecánica y química de las mezclas

Para caracterizar las mezclas suelo-hidróxido de calcio con diferentes porcentajes se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio.

F. Selección del porcentaje óptimo de hidróxido de calcio

Una vez considerado que el suelo es apto para el tratamiento con hidróxido de calcio, se pasa a determinar la fórmula de trabajo para la mezcla que permita conseguir los objetivos propuestos. La dosificación óptima de hidróxido de calcio será aquella que logre reducir incluso anular, la plasticidad del suelo, el

hinchamiento potencial y aumentar hasta un valor aceptable la capacidad portante del mismo (CBR) [1]. El porcentaje óptimo de hidróxido de calcio se puede determinar mediante dos métodos:

Uno, el método del pH, un método muy útil por su facilidad y fiabilidad, hecho por Eades y Grim (1966), indicado en la Norma ASTM C 977-00 (apéndice X1); este procedimiento se basa en el hecho de que la adición de hidróxido de calcio necesaria para estabilizar un suelo es aquella que garantiza el mantenimiento de un elevado pH, que permita el desarrollo de las reacciones puzolánicas; para ello se determina el pH con distintos porcentajes de hidróxido de calcio, se grafica y el porcentaje óptimo es aquel que permite alcanzar un valor de 12.4 [6], como se aprecia en la siguiente figura.

Tabla 6. Ensayos físico-mecánicos y químicos para la caracterización de las mezclas suelo-hidróxido de calcio

MATERIAL	CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMA INVIAS - 2007
MEZCLAS SUELO-HIDRÓXIDO DE CALCIO	Física	Humedad Granulometría Peso específico Límites de consistencia	INVE - 122 -07 INVE -123 -07 INVE -217 -07 INVE - 125 -07, INVE - 126 -07
	Mecánica	Compactación CBR del suelo fino Compresión inconfínada Ensayo de absorción Ensayo de ascensión Estabilidad hídrica Remoldeo de CBR	INVE -141 -07, INVE - 142 -07 INVE - 148 -07 INVE - 152 -07 - - - -
	Química	pH Análisis químico Micrografía	INVE - 131 -07 - -

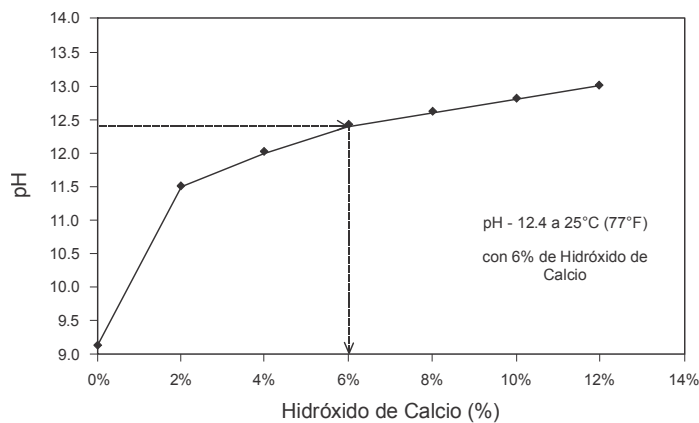


Figura 3. Selección del porcentaje óptimo de hidróxido de calcio método de Eades y Grim.
Fuente: Rodríguez, Ángel Sampedro. Tratamientos de suelos con cal. Asociación Nacional de Fabricación de Cales y Derivados de España. ANCADE. Madrid. España. Abril, 2005.

Dos, el ábaco propuesto por C. McDowell, que muestra distintas curvas con un número dentro de círculos que representa porcentajes de cal en peso de suelo seco, en función del índice plástico y del porcentaje pasa tamiz N.º 40 por vía húmeda del suelo sin estabilizar, excluyendo aquellos materiales con $IP < 3\%$ y $pasa\ tamiz\ 40 < 10\%$. Para determinar el porcentaje óptimo se entra con el

índice de plasticidad del suelo en las abscisas superiores, luego se baja en forma paralela y proporcionada a la curva más cercana (la de menos porcentaje) hasta cortar con la horizontal que proviene del porcentaje pasa N.º 40 del suelo, y en el punto de intersección se levanta una vertical donde se lee el porcentaje de cal requerido para la estabilización [6].

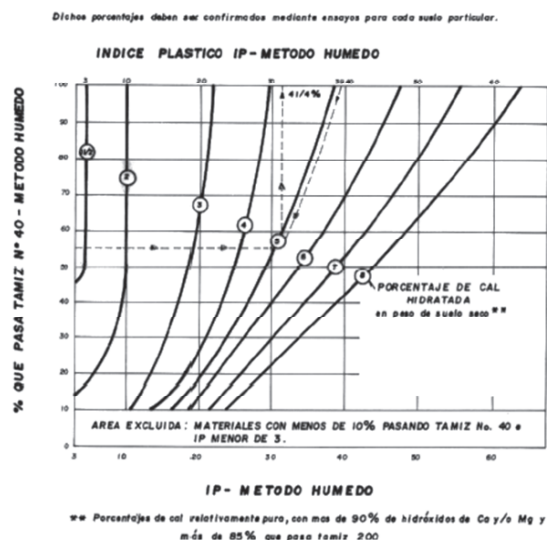


Figura 4. Selección del porcentaje óptimo de hidróxido de calcio método C. Mc.Dowell.
Fuente: DORFMAN, Boris. Estabilización de suelos. Universidad del Cauca. Popayán. 1988.

IV. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la caracterización química y físico-mecánica del suelo sin tratar y de las mezclas suelo-hidróxido de calcio, al igual que la caracterización química del hidróxido de calcio.

A. Caracterización química

1) Composición química del suelo sin tratar, del hidróxido de calcio y de las mezclas suelo-hidróxido de calcio. En la Tabla 7 se muestra el código de referencia que arrojó el programa junto con el nombre del elemento encontrado, su fórmula química, su estructura y el porcentaje en peso de cada uno de los compuestos presentes.

2) Ensayo de pH. A continuación se presentan los resultados de la prueba de pH del suelo sin tratar, del hidróxido de calcio y de las diferentes mezclas.

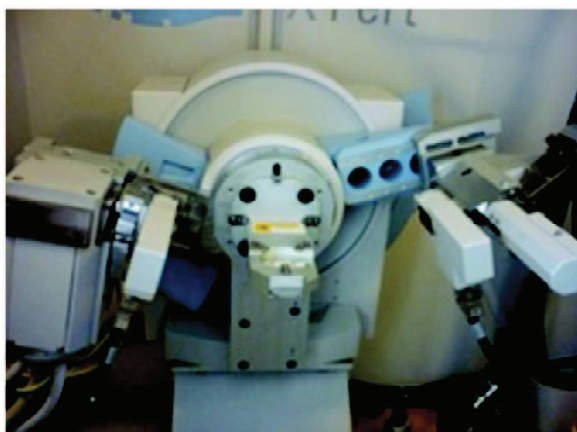


Figura 5. Ensayo de difracción de rayos X



Figura 6. Ensayo de pH

Tabla 7. Resultados del ensayo de difracción de rayos X

CÓD. REF.	NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA	Mezcla (suelo + %Ca(OH) ₂)							
			Ca(OH) ₂	Suelo sin tratar	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %
			% PESO							
01 -070 -4068	Calcium Oxide	CaO	4.0	-	0.5	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0
00 -044 -1481	Portlandite, syn	Ca(OH) ₂	45.0	-	3.0	1.0	3.0	2.0	3.0	6.0
01 -077 -1726	Coesite	SiO ₂	41.5	-	22.0	18.0	3.0	1.0	4.0	5.0
01 -071 -6488	Periclase	MgO	9.5	-	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
01 -083 -2465	SiliconDioxide	SiO ₂	-	18.2	14.0	14.0	22.0	15.0	15.0	10.0
00 -042 -1468	Alumina, Alundum	Al ₂ O ₃	-	-	1.0	4.0	2.0	4.0	3.0	2.0
01 -080 -0886	Kaolinite-1A	Al ₂ (Si ₂ O ₅)	-	3.0	3.0	2.0	5.0	3.0	6.0	3.0
00 -039 -1346	Maghemite-C, syn	Fe ₂ O ₃	-	59.6	45.0	45.0	56.0	69.0	60.0	62.0
00 -044 -1482	Brucite, syn	Mg(OH) ₂	-	-	7.0	1.0	4.0	2.0	3.0	5.0
00 -029 -0041	Gibbsite	Al(OH) ₃	-	-	4.0	13.0	2.0	2.0	3.0	5.0
01 -070 -3753	Augite	(CaMg0.74Fe0.25)	-	19.2	-	-	-	-	-	-
			100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla 8. Resultados del ensayo de pH

		MÉTODO A MEDIDOR DE	MÉTODO B PAPEL TORNASOL
PRUEBA		pH	pH
% Ca(OH) ₂	1	12.45	12 - 14
	2	12.56	12 - 14
	3	12.47	12 - 14
Promedio		12.37	12 - 14
Suelo sin tratar	1	9.55	9-10
	2	9.19	8 - 9
	3	9.10	8 - 9
Promedio		9.28	
Suelo + 2 % Ca(OH) ₂	1	12.36	12 - 14
	2	12.37	12 - 14
	3	12.37	12 - 14
Promedio		12.37	12 - 14
Suelo + 4 % Ca(OH) ₂	1	12.41	12 - 14
	2	12.41	12 - 14
	3	12.40	12 - 14
Promedio		12.41	

Fuente. Elaboración propia.

		MÉTODO A MEDIDOR DE	MÉTODO B PAPEL TORNASOL
PRUEBA		pH	pH
Suelo + 6 % Ca(OH) ₂	1	12.42	12 - 14
	2	12.43	12 - 14
	3	12.42	12 - 14
Promedio		12.42	
Suelo + 8 % Ca(OH) ₂	1	12.51	12 - 14
	2	12.52	12 - 14
	3	12.52	12 - 14
Promedio		12.52	
Suelo + 10 % Ca(OH) ₂	1	12.52	12 - 14
	2	12.52	12 - 14
	3	12.51	12 - 14
Promedio		12.51	
Suelo + 12 % Ca(OH) ₂	1	12.51	12 - 14
	2	12.51	12 - 14
	3	12.52	12 - 14
Promedio		12.52	

3) Micrografías del suelo sin tratar y de las mezclas suelo-hidróxido de calcio. En la figura 7

se aprecia la distribución de las partículas presentes en las muestras analizadas.

Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio

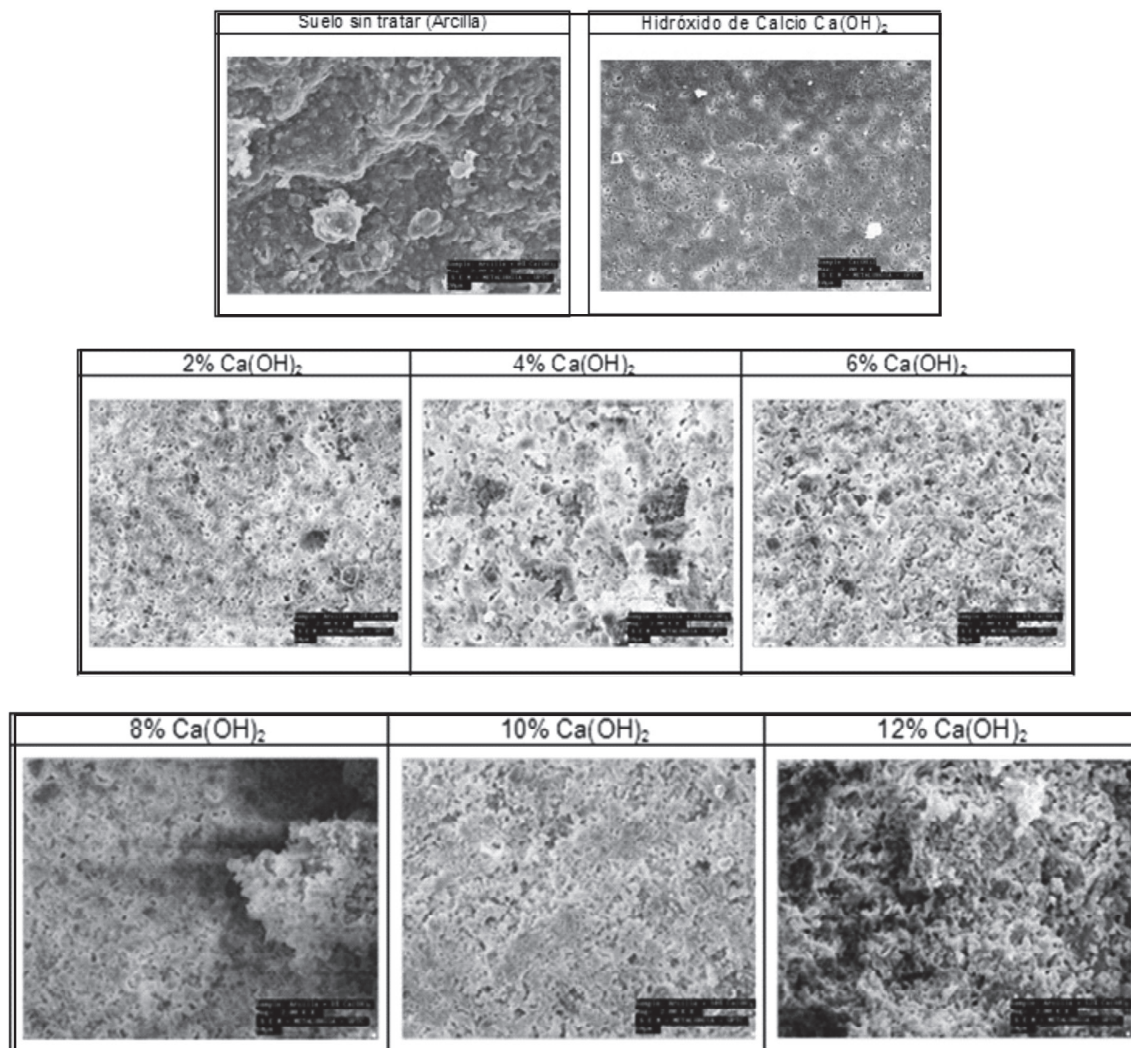


Figura 7. Micrografías de las mezclas suelo – hidróxido de calcio.
Fuente. Laboratorio de Microscopía electrónica de Barrido. Escuela de Metalurgia.

B. Caracterización físico-mecánica

1) Características físicas: En la Tabla 9 se resumen los resultados de los ensayos de límites de consistencia y gravedad específica del suelo sin tratar y las diferentes mezclas suelo-hidróxido de calcio, además de la tendencia que presentó cada propiedad al variar el porcentaje de aditivo.



Figura 8. Ensayos de caracterización física

Tabla 9. Resumen de resultados de la caracterización física

Variable	Suelo sin tratar	mezcla suelo + % Ca(OH) ₂						Tendencia
		2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %	
LL (%)	43.50	38.85	38.80	39.90	35.30	35.36	38.67	Ante un aumento del porcentaje de Ca(OH) ₂ el límite líquido disminuye
LP (%)	22.31	27.35	29.02	29.33	27.33	27.37	30.08	Ante un incremento del porcentaje de Ca(OH) ₂ el límite plástico aumenta
IP (%)	21.19	11.50	9.78	10.57	7.97	7.99	8.59	A medida que aumenta el porcentaje de Ca(OH) ₂ el índice de plasticidad disminuye
LC	20.12	22.48	26.85	19.42	22.14	24.01	22.01	Ante un aumento del porcentaje de Ca(OH) ₂ el límite de contracción no presenta una tendencia uniforme
Gs	2.701	2.631	2.572	2.524	2.492	2.486	2.454	Ante un aumento del porcentaje de Ca(OH) ₂ la gravedad específica disminuye

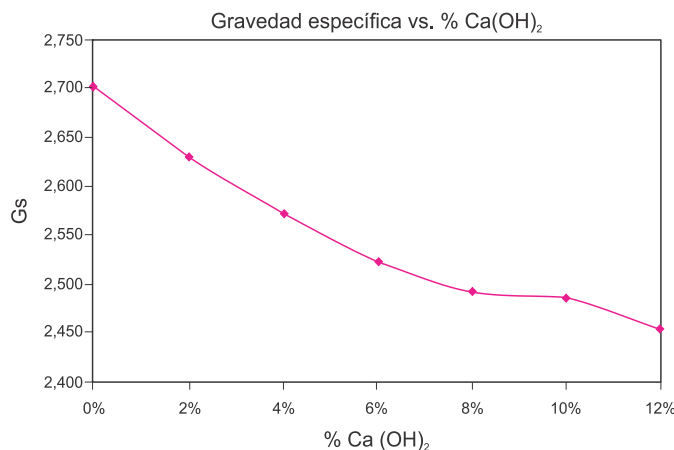
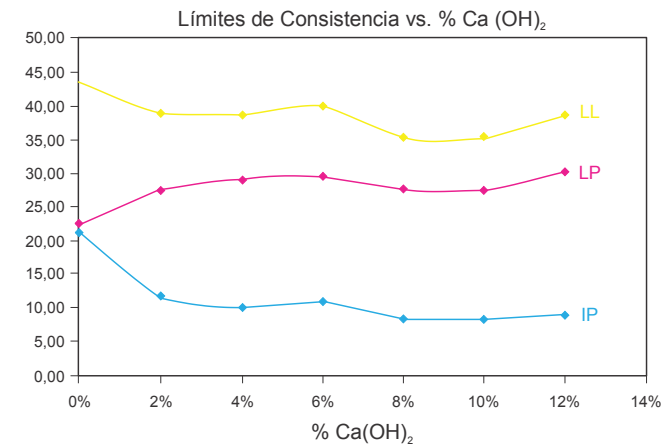


Figura 9. Tendencia de las características físicas, límites de consistencia y gravedad específica

2) **Características mecánicas:** A continuación se resumen los resultados de los ensayos de caracterización mecánica del suelo sin tratar y las diferentes mezclas suelo-hidróxido de calcio, además de la tendencia que presentó cada propiedad al variar el porcentaje de aditivo.



Figura 10. Ensayos de caracterización mecánica

Tabla 10. Resumen de resultados de la caracterización mecánica

Variable	Suelo sin tratar	mezcla suelo + % Ca(OH) ₂						Tendencia
		2%	4%	6%	8%	10%	12%	
γ _d (gr/cm ³)	1.780	1.692	1.664	1.638	1.625	1.605	1.562	Se presenta una reducción de la densidad seca máxima a medida que aumenta el porcentaje de Ca(OH) ₂
qu (Kg/cm ²)	2.4	3.5	3.8	4.5	3.5	3.9	3.3	Se presenta un incremento sustancial en las mezclas de 2% a 6% de Ca(OH) ₂ de ahí en adelante la resistencia disminuye
Absorción (gr/cm ²)	1.04	0.53	0.36	0.70	0.91	0.85	0.80	Se presenta un aumento en la absorción a medida que se incrementa el porcentaje de Ca(OH) ₂
Ascensión (%)	65.13	58.60	54.50	53.28	40.88	26.52	20.53	A medida que aumenta el porcentaje de Ca(OH) ₂ disminuye la capacidad de ascensión capilar
Estabilidad hídrica	Inestable	Estable	Estable	Estable	Estable	Estable	Estable	Las mezclas suelo-hidróxido de calcio presentan buena estabilidad
Expansión (%)	2.8	0.2	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	A medida que aumenta el porcentaje de Ca(OH) ₂ el porcentaje de expansión permanece constante
Remoldeo Expansión (%)	3.5	0.9	0.8	0.7	1.0	0.1	0.0	A medida que aumenta el porcentaje de Ca(OH) ₂ el porcentaje de expansión disminuye
CBR (%)	2.0	21.8	30.0	30.0	32.6	35.1	22.0	Ante un aumento del porcentaje de Ca(OH) ₂ la capacidad de soporte aumenta
Remoldeo CBR (%)	5.3	28.0	43.0	38.2	34.8	51.0	71.9	Se incrementa la capacidad de soporte debido al mayor tiempo de curado produciendo la cementación y por ende su mayor resistencia
pH	9.28	12.37	12.41	12.42	12.52	12.51	12.52	Ante un aumento del porcentaje de Ca(OH) ₂ el valor de pH se incrementa

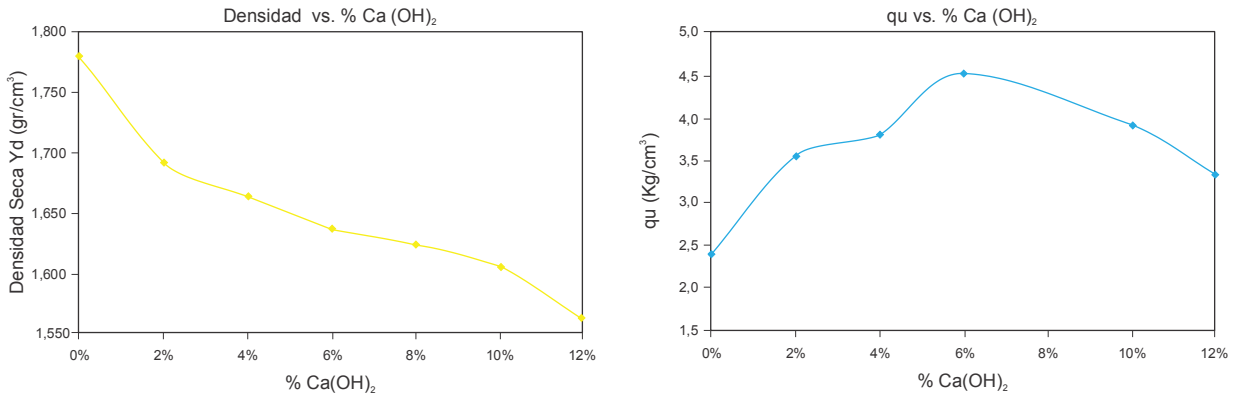


Figura 11. Tendencia de las características mecánicas de densidad y resistencia vs. Ca(OH)₂

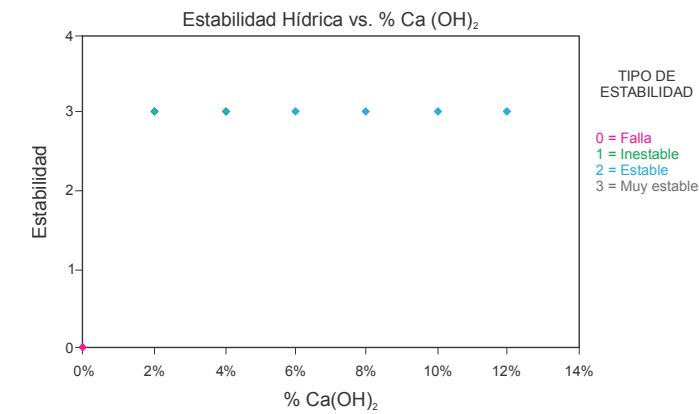
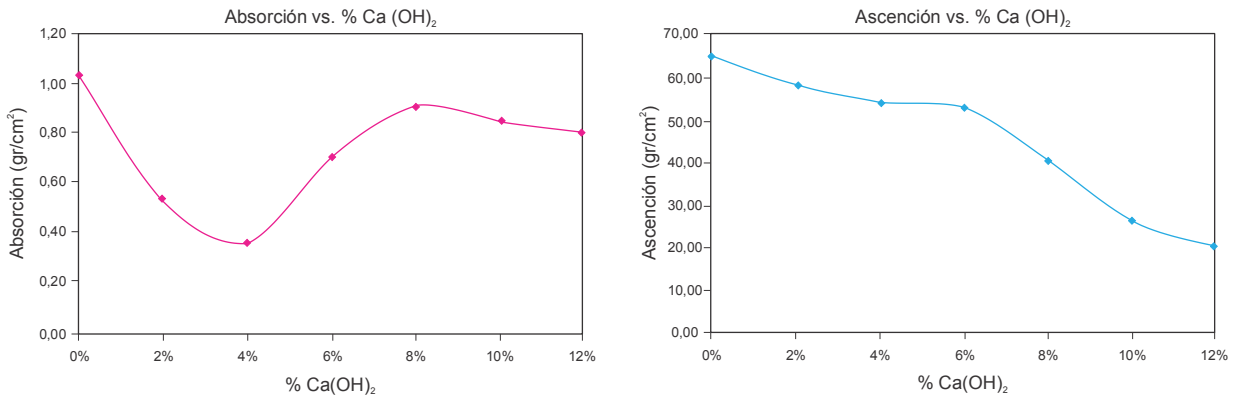


Figura 12. Tendencia de las características mecánicas de absorción, ascensión capilar y estabilidad hídrica vs. Ca(OH)₂

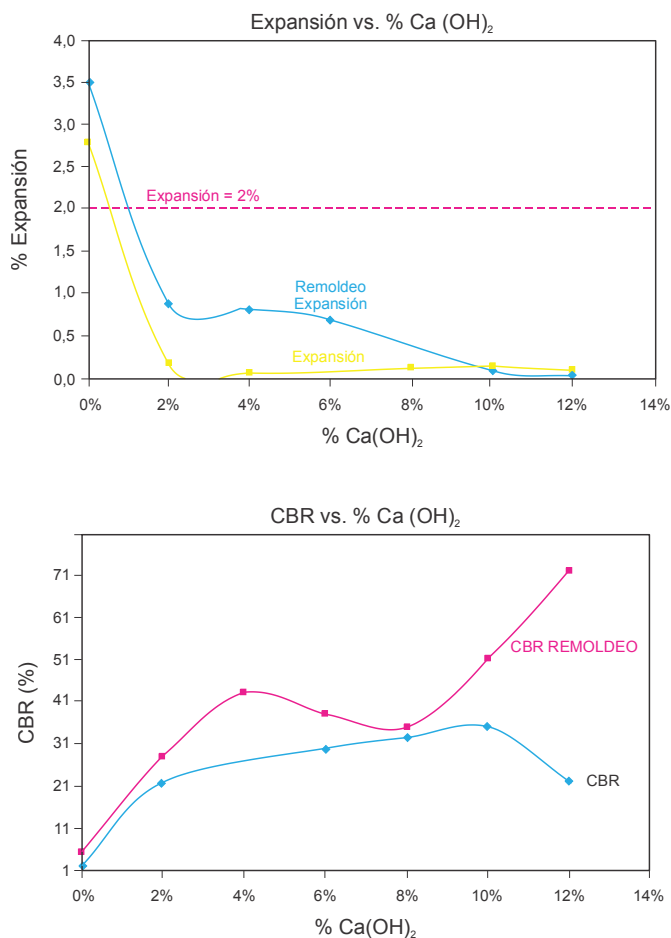


Figura 13. Tendencia de las características mecánicas expansión y CBR vs. Ca(OH)₂

C. Caracterización de la mezcla óptima suelo + 4% Ca(OH)₂

1) Ensayos físicos de la mezcla óptima suelo + 4% Ca(OH)₂: A continuación se observa la comparación de los resultados de la caracterización física de la mezcla óptima y del suelo sin tratar.

2) Caracterización mecánica: En la Tabla 12 se observa la comparación de los resultados de las características mecánicas del suelo sin tratar y de la mezcla con el porcentaje óptimo de hidróxido de calcio.

Tabla 11. Resumen de las propiedades físicas del suelo sin tratar y la mezcla óptima suelo + 4% Ca(OH)₂

	Suelo sin tratar	suelo + 4% Ca(OH) ₂
LL, (%)	43.50	38.80
LP, (%)	22.31	29.02
IP, (%)	21.19	9.78
LC	20.12	26.85
Gs	2.701	2.572



Figura 14. Ensayos de caracterización mecánica de la mezcla óptima suelo + 4% Ca(OH)₂

Tabla 12. Resumen de las propiedades mecánicas del suelo sin tratar y la mezcla óptima suelo + 4% Ca(OH)₂

Variable	Suelo sin tratar	Suelo + 4% Ca(OH) ₂
γ _d (gr/cm ³)	1.780	1.664
γ _L (gr/cm ³)	1.689	1.583
q _u (Kg/cm ²)	2.39	3.79
Absorción (gr/cm ²)	1.04	0.36
Ascensión (%)	65.13	54.50
Estabilidad hídrica	Inestable	Estable
Expansión (%)	1.3	0.1
CBR (%)	2.1	92.0

V. CONCLUSIONES

- La caracterización física del suelo sin tratar clasificó el material como una arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad, con un bajo potencial de expansión.
- En cuanto a la caracterización química, el ensayo de difracción de rayos X mostró la presencia de óxidos de hierro, aluminio, silicio y compuestos de magnesio, este último posee gran capacidad de atracción de agua debido a una

descompensación de cargas superficiales, causando inestabilidad en el material. Por otro lado, la prueba de pH demostró que el material es básico, por lo que se clasifica como un suelo pasivo.

- El suelo sin tratar soporta un esfuerzo último por unidad de área de 2.4 kg/cm², lo que se clasificó como un suelo de consistencia muy firme, según Terzaghi y Peck.
- El ensayo de CBR con inmersión del suelo sin tratar determinó una capacidad de soporte de 2.1%, clasificándolo como un suelo muy pobre, mientras que la expansión esperada del suelo fue de 1.32% lo que corroboró su bajo grado de expansividad.
- El tratamiento del suelo con hidróxido de calcio modificó las características físicas del suelo original, causando el aumento del límite plástico y la disminución del límite líquido, lo que generó la disminución del índice de plasticidad, debido a que los iones de calcio Ca⁺⁺ existentes en el aditivo remueven los iones de Mg⁺⁺ presentes en este tipo de suelo que son los encargados de atraer el agua reduciendo así su plasticidad.
- En cuanto a la composición química, la mezcla suelo-hidróxido de calcio dio lugar a la formación de silicatos y aluminatos de calcio aportándole gran capacidad cementante en el material resultante.
- Las características mecánicas del suelo original también fueron modificadas con la adición del hidróxido de calcio, permitiendo que fuera compactado con mayores humedades. El efecto del aditivo con el agua generó el esponjamiento de las mezclas aumentando su volumen y disminuyendo así su densidad seca máxima a medida que aumentaba el porcentaje de aditivo en las mezclas.
- La tendencia de absorción capilar de las diferentes mezclas suelo-hidróxido de calcio mostró una mayor capacidad de absorción de agua a medida

que aumentaba la cantidad de aditivo en la mezcla, por el contrario, el comportamiento de la ascensión capilar presentó una disminución significativa debido a que se generó menor tensión capilar por el aumento en el diámetro de los tubos formados por la interconexión de vacíos.

- La estabilidad del suelo tratado con hidróxido de calcio aumentó significativamente en relación con el suelo sin tratar al someterse a condiciones de saturación, incluso tiempo después del periodo de observación.
- Se logró incrementar la capacidad de soporte CBR y la resistencia del suelo-hidróxido de calcio, lo anterior se presentó solo para algunos porcentajes de aditivo, ya que las mezclas que mejor comportamiento mecánico presentaron fueron las que contenían los porcentajes más bajos de hidróxido de calcio, lo anterior se vio reflejado en la mejor distribución de las partículas y reducción en los vacíos en las mezclas con porcentajes del 2%, 4% y 6% de aditivo.
- Al realizar el remoldeo a las mezclas suelo-hidróxido de calcio, el porcentaje de expansión no presenta aumento significativo en relación con los resultados de expansión de las mezclas iniciales, mientras que la capacidad de soporte presenta incrementos significativos a medida que aumenta el porcentaje de aditivo. Por lo anterior, se determinó que la estructura original no sufrió pérdida de resistencia al remoldeo, demostrando así la baja sensibilidad del material.
- Los resultados de laboratorio arrojaron que la adición del 4% en peso seco del suelo de hidróxido de calcio en la mezcla, proporciona las condiciones adecuadas para el mejoramiento de las características químicas y físico-mecánicas del material. La mezcla resultante genera la

disminución del índice de plasticidad, aportándole al material la capacidad de recuperar su resistencia rápidamente ante una posible saturación del suelo. La formación de silicatos y aluminatos de calcio en la mezcla aporta agentes cementantes al material, lo que causa el incremento de la capacidad de soporte CBR del suelo original, pasando del 2% al 92%.

- Efectivamente, la utilización del hidróxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos genera cambios importantes en las propiedades físico-mecánicas y químicas del suelo, mejorando sus características y haciéndolos aptos para la utilización en estructuras de pavimentos.

REFERENCIAS

- [1] C. H. Higuera Sandoval. *Estabilización de Suelos*. Guías de clase, Universidad del Cauca, Popayán, 2010.
- [2] B. Dorfman. *Estabilización de suelos*. Universidad del Cauca, Popayán, 1988.
- [3] F. Sánchez Sabogal. *Estabilización de suelos con cal*. Universidad del Cauca. Popayán. 1985.
- [4] C. H. Higuera Sandoval. *Estabilización de Suelos*. Guías de clase. Universidad del Cauca. Popayán. 2010.
- [5] C. H. Higuera Sandoval. *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimento para carreteras*. Volumen 1. Tunja. 2011.
- [6] A. S. Rodríguez. *Manual*. ANCADE. *Tratamientos de suelos con cal. Planteamiento general, diseño y control de calidad*. Madrid. 2005.