

**Estudio del comportamiento experimental de muestras de arcillas estabilizadas con
carbonato de calcio**

Omar Yesid Arias Arroyo

Víctor Daniel Cordero Rangel

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Ph.D en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A Dios, por darme la oportunidad de poder vivir y disfrutar estos momentos al lado de mis seres queridos, por orientarme en cada paso que doy y por haber puesto en mi camino a personas que me han motivado a no desfallecer ante las adversidades.

A mis padres, Víctor Manuel Cordero Cabarcas y Adamary Rangel Sánchez, porque gracias a su esfuerzo y dedicación hoy puedo culminar esta etapa de mi vida, apoyándome siempre en los momentos más difíciles y sobre todo por enseñarme que con entrega y sacrificio puedo alcanzar mis objetivos.

A mis hermanos, Jorge Luis Cordero Rangel y Vivian Daniela Cordero Rangel, quienes me han brindado su apoyo y amor incondicional, acompañándome en todo momento, siempre brindándome una voz de aliento.

A mi compañero de tesis y gran amigo, Omar Yesid Arias Arroyo, por la excelente labor realizada en el desarrollo de nuestra investigación, por el esfuerzo y dedicación invertidos para obtener los resultados deseados.

Víctor Daniel Cordero Rangel.

Este logro conseguido es gracias al esfuerzo y dedicación valores con los cuales he forjado este duro camino, es por eso que ha sido dedicado en primer lugar a Dios sin el no habría podido levantarme en los momentos duros que he sufrido para llegar hasta aquí, sin él y sin mi merito no creo que hubiese sido posible conseguir este logro, que tanto a mi como a mi familia nos ha llenado de orgullo, en segundo lugar a mi familia que son el pilar más fuerte, y que gracias a los consejos y el apoyo que me han brindado desde el comienzo he podido finalizar con éxito esta etapa que me he propuesto.

Por este y por cada uno de los logros que me he prometido, gracias por la ayuda otorgada y brindada por que me la han dado sin importar mis defectos y cualidades, gracias madre por que siempre has estado hay para protegerme, ayudarme, animarme y sobre todo para regalarme todo tu amor para poder cumplir cada una de las cosas que se me han propuesto.

Padre que a pesar de los mil y un regaños siempre he contado con él para cada una de mis cosas, mis hermanitas que son lo más preciado que tengo, y mi querida tía Lucy que me brindó protección y me acogió en su techo como un hijo más en el comienzo de esta hermosa carrera, y sin quitar merito gracias a las personas que he conocido que con su aporte ya sea grande o pequeño me han ayudado a seguir y no dejar atrás todo lo que había consagrado. A ellos y a cada una de las personas que no he nombrado mil y mil gracias, este trabajo es para cada uno de ustedes.

Omar Yesid Arias Arroyo

Agradecimientos

Al ingeniero Vladimir Ernesto Merchán Jaimes y Jorge Alejandro Mendoza Rizo, quienes nos apadrinaron durante el proceso de investigación, aportándonos sus conocimientos y observaciones para la culminación de esta tesis.

A la Universidad Industrial de Santander, docentes, personal administrativo y laboratoristas, por habernos formado moral e intelectualmente como personas, siendo una experiencia única que perdurará en nuestras memorias.

A todos nuestros compañeros de clase y grandes amistades que se formaron durante esta etapa, por las grandes experiencias y vivencias compartidas, anécdotas que dejarán una huella imborrable en nuestras vidas.

Omar Yesid Arias Arroyo

Víctor Daniel Cordero Rangel

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Marco Teórico.....	15
1.1 Estabilización.....	15
1.1.1 Tipos de estabilización de suelos.....	16
1.1.1.1 Estabilización mecánica.....	17
1.1.1.2 Estabilización física	17
1.1.1.3 Estabilización físico-química.....	17
1.1.1.4 Estabilización química.....	17
1.2 Tipos de suelos.....	18
1.2.1 Suelos expansivos	20
1.2.2 Arcilla	21
1.3 La cal.....	22
1.3.1 Cal viva	22
1.3.2 Cal apagada.....	22
1.3.3 Cal hidráulica	23
1.3.4 Concepto de cal útil vial	23
1.4 Agua.....	24
1.5 Compactación estática de suelos.....	24

1.5.1 Compactación estática por presión 25

2. Metodología 26

2.1 Selección de la muestra..... 27

2.1.1 Caracterización de los materiales..... 28

2.1.1.1 Caracterización geotécnica del suelo sin tratar 28

2.1.1.2 Caracterización química del carbonato de calcio..... 28

2.1.2 Diseño de la mezcla suelo-carbonato de calcio 30

3. Análisis y Resultados 32

3.1 Fase experimental 32

4. Conclusiones 38

Referencias Bibliográficas 41

Apéndices..... 42

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de estabilización de suelos.	16
Figura 2. Metodología para la caracterización del suelo arcilloso y la mezcla suelo-carbonato de calcio.	26
Figura 3. Ensayo de pH.....	29
Figura 4. Selección del porcentaje óptimo de cal por el método de Eades y Grim.	30
Figura 5. Mezcla compactada.	31
Figura 6. Mezcla suelo (Bentonita)-carbonato de calcio al 9%, con el tiempo de curado cumplido.	31
Figura 7. Montaje en el ensayo triaxial (CU).	32
Figura 8. Resultado experimental de muestra con 9% de cal(Ensayo triaxial consolidado no drenado, $\sigma_3=20$ kPa).....	33
Figura 9. Resultado experimental de muestra con 9% de cal (Ensayo triaxial consolidado no drenado, $\sigma_3=50$ kPa).....	33
Figura 10. Resultado experimental de muestra con 9% de cal (Ensayo triaxial consolidado no drenado, $\sigma_3=150$ kPa).....	33
Figura 11. Envolverte de resistencia saturada.	34
Figura 12. Envolverte de resistencia no saturada.	35

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tipos de estabilización.....	16
Tabla 2. Aplicabilidad de los métodos de estabilización.....	18
Tabla 3. Comparación de técnicas de estabilización.	19
Tabla 4. Propiedades físicas de la bentonita.	27
Tabla 5. Propiedades químicas de la bentonita.	27
Tabla 6. Resultados de los ensayos de límite líquido y plástico.	28
Tabla 7. Resultados de ensayos de pH.....	29
Tabla 8. Diseño de la mezcla suelo-carbonato de calcio.	31
Tabla 9. Parámetros de resistencia de la muestra con 9% de cal, bajo un grado de saturación cercano a uno.	35
Tabla 10. Parámetros de resistencia de la muestra con el 9% de cal, con humedad de compactación, sin saturación.	36

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Resultados obtenidos del ensayo triaxial.....	42
Apéndice B. Resultados obtenidos del ensayo triaxial.....	44
Apéndices C Resultados obtenidos del ensayo triaxial.....	46

Resumen

Titulo. Estudio del comportamiento experimental de muestras de arcillas estabilizadas *

Autores: Omar Yesid Arias Arroyo
Víctor Daniel Cordero Rangel**

Palabras Clave: Suelos susceptibles, Carbonato de calcio, Tratamiento de suelos susceptibles, Caracterización de Material.

Se presenta un estudio experimental del comportamiento mecánico de muestras arcillosas bentoníticas estabilizadas con carbonato de calcio, en busca del mejoramiento de sus características físicas, mecánicas y químicas. La caracterización del suelo fue determinada de manera preliminar, en donde esta consistió en la elaboración de una serie de ensayos de laboratorio que determinaron sus características físico-mecánicas y químicas. Con base a este estudio, se rediseñaron tres mezclas suelo-carbonato de calcio con las mismas características; con un porcentaje de aditivo del 9% pero con la diferencia en que el grado de saturación de la muestra es cercano a uno, dado que es la condición que representa el estado más crítico. Fabricadas las probetas, éstas se sometieron a ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado (CU), empleando la máquina triaxial estática según lo contemplado en los lineamientos y especificaciones del documento normativo ASTM D 4767 y ASTM D 2850, con el objetivo de obtener los parámetros de resistencia del suelo. Teniendo estos parámetros de la mezcla suelo-carbonato de calcio en condiciones de saturación, se comparan con los resultados obtenidos en el estudio de la mezcla estabilizada mediante compactación estática sin saturar; en donde se evaluará el comportamiento de la mezcla en cuanto a sus propiedades de resistencia y estabilidad volumétrica, para finalmente transformar un suelo pobre, en uno adecuado para diferentes estructuras civiles.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Jorge Alejandro Mendoza Rizo Ph.D en Ingeniería Civil

Abstract

Title. Study of the experimental behavior of samples of stabilized clays *

Authors: Omar Yesid Arias Arroyo
Víctor Daniel Cordero Rangel**

Key Words: Susceptible soils, Calcium Carbonate, treatment of susceptible soils, Material Characterization.

Presents an experimental study of the mechanical behaviour of clayey samples bentonite stabilised with calcium carbonate, in search of improvement of its physical, mechanical and chemical characteristics. The characterization of the soil was determined in a preliminary way, where this consisted in the preparation of a series of laboratory tests that determined their characteristics fisico-mecanicas and chemical. Based on this study, designed three mixtures suelo-carbonato of calcium with a percentage of additives of 9% but with the difference that the degree of saturation of the sample is close to one, given that it is the condition that represents the most critical state. Manufactured specimens, these were subjected to triaxial compression testing consolidated not drained (CU), using the static triaxial machine as contemplated in the guidelines and specifications of ASTM D 4767 and ASTM D 2850 normative document, with the order to obtain the soil strength parameters. Considering these parameters of the mixture of calcium suelo-carbonato saturation conditions, compared with the results obtained in the study of mixture stabilized by using static compaction without saturating; in where the behavior of the mixture shall be assessed in terms of its resistance and volumetric stability properties, to finally transform poor soil, one suitable for different civil structures.

* Degree work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering School of Civil Engineering Director Jorge Alejandro Mendoza Rizo Ph.D in Civil Engineering

Introducción

Históricamente en las obras civiles solo se consideraban los suelos granulares como material apto para el soporte de dichas infraestructuras, descartando los suelos finos debido a problemas asociados a cambios volumétricos y de consistencia. Los inconvenientes anteriormente mencionados son comunes en suelos arcillosos, debido a su estructura y composición mineralógica (Bauza, 2015).

Ante la presencia de este tipo de suelos, principalmente las arcillas expansivas, es necesario efectuar soluciones que implementen procesos físicos y/o químicos, que mejoren las características de resistencia y estabilidad a corto y largo plazo (Higuera, Gómez y Pardo, 2012). Existen diversos procedimientos que mejoran estas condiciones, sin embargo, desde el punto de vista económico y ecológico, la solución más implementada en materiales arcillosos es la modificación de la tipología estructural del material mediante la mezcla con conglomerantes u otros productos estabilizadores como lo es la cal (Bauza, 2015).

Estos procedimientos conllevan a una variación de los parámetros de resistencia, y potencial de expansión del suelo, los cuales pueden ser determinados por diversos ensayos de laboratorio tales como el ensayo de la resistencia uniaxial (ASTM D 2166), corte directo (ASTM D 3080 y ASTM D658), CBR (ASTM D 1883) y compresión triaxial (ASTM D 4767 y ASTM D 2850). De los ensayos anteriormente mencionados, el que mejor establece las propiedades de resistencia de los suelos es el ensayo triaxial, sin embargo, el elevado costo del equipo y el tiempo de ejecución, ha generado que sea poco implementado (Cometa & Mendez, 2016).

A continuación, se presenta un trabajo de investigación donde se estudia la influencia del porcentaje óptimo de cal en las propiedades de resistencia de la mezcla, en condición de saturación; para lo cual se realizaron ensayos triaxiales consolidados no drenados con determinación de presión de poros. Lo anterior, fue ejecutado en el equipo triaxial ubicado en el laboratorio de Álvaro Beltrán Pinzón de la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

Adicionalmente se realizó una comparación en las propiedades mecánicas de la mezcla suelo-carbonato de calcio compactado en condición de saturación con respecto a la mezcla estabilizada sin saturar (humedad de compactación) (Durán Jose, 2017).

1. Marco Teórico

1.1 Estabilización

Se entiende por estabilización de suelos, como 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 propiedades tales como: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad y permanencia de las propiedades adquiridas (Higuera Sandoval, 2010). 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 (Dorfman, 1988).

1.1.1 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 (Dorfman, 1988). Según el tipo de suelo por tratar, el diseñador debe determinar el tipo de estabilización más conveniente, dentro de los cuales encontramos:

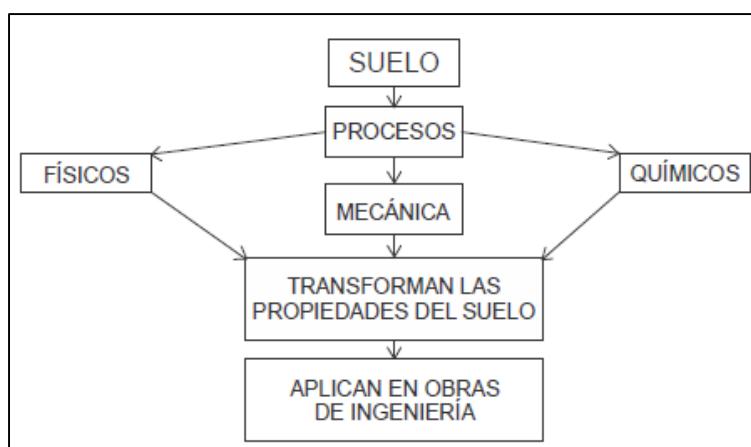


Figura 1. Diagrama de flujo de estabilización de suelos.

Nota. Tomado de: Higuera Sandoval, C. H. (2010) Estabilización de suelos. Popayán.

Tabla 1.

Tipos de estabilización.

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

Nota. Tomado de. Dorfman, B. (1998) Estabilización de suelos. Universidad del Cauca. Popayán.

1.1.1.1 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 (Sánchez Sabogal, 1985).

1.1.1.2 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 (Sánchez Sabogal, 1985).

1.1.1.3 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 (Sánchez Sabogal, 1985).

1.1.1.4 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 (Sánchez Sabogal, 1985).

Tabla 2.

Aplicabilidad de los métodos de estabilización.

Suelo	Arcillas finas	Arcillas gruesas	Limos finos	Limos gruesos	Arenas finas	Arenas gruesas
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					

Nota. Tomado de. IDU. (2005) Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos. Bogotá D.C. p.5.

1.2 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 mejoren 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 generalizaciones 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 (Higuera Sandoval, 2010).

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

Tabla 3.

Comparación de técnicas de estabilización.

Material	Estabilización			
	Mecánica	Cemento	Cal	Emulsión
Grava natural	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
Arena limpia	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
Arena arcillosa	Adición de gruesos para	4% - 8%	Es factible dependiendo	Se puede emplear. De 3% a

Material	Estabilización			
	Mecánica	Cemento	Cal	Emulsión
	mejorar resistencia		del contenido de arcilla	4% de asfalto residual
Arcilla arenosa	Usualmente no es aconsejable	4% - 12%	4% a 8% dependiendo del contenido de arcilla	Se puede emplear pero no es muy aconsejable
Arcilla pesada	Inadecuada	No es muy aconsejable. La mezcla puede favorecer con un pre tratamiento 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

Nota. Tomado de: IDU. (2005) Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos. Bogotá D.C.

1.2.1 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 (Higuera Sandoval, 2011)

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 (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

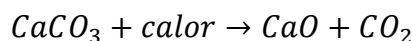
1.2.2 Arcilla. La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, 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 (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

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 (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

1.3 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 (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

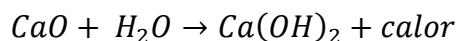
1.3.1 Cal viva. El carbonato de calcio se descompone en óxido de calcio y anhídrido carbónico que se elimina con los productos gaseosos de la combustión. El óxido de calcio, llamado cal viva, es un producto sólido, de color blanco, amorfo aparentemente, con un peso específico entre 3.18 y 3.40. Es inestable, por tener gran avidez de agua (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).



Carbonato de calcio + calor → Óxido de calcio + Anhídrido carbónico

1.3.2 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.

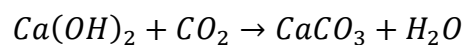
Si se calienta a 512 °C, el hidróxido de calcio se descompone en óxido de calcio y agua. La solución de hidróxido de calcio en agua es una base fuerte que reacciona violentamente con ácidos y ataca varios metales. Se enturbia en presencia de dióxido de carbono por la precipitación de carbonato de calcio (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).



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 (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

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

1.3.3 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 (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

1.3.4 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 (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

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 la cal 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 (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

1.4 Agua

El agua requerida para la compactación de la mezcla suelo-cal debe ser limpia, libre de impurezas, de sales o de residuos químicos (Higuera, Gómez, & Pardo, 2012).

1.5 Compactación estática de suelos

La compactación es el procedimiento de aplicar energía al suelo suelto para eliminar espacios vacíos, aumentando así su densidad y en consecuencia, su capacidad de soporte y estabilidad entre

otras propiedades. Su objetivo es el mejoramiento de las propiedades de ingeniería del suelo (INGEAS S.A.S.).

- **Ventajas**

- ✓ Aumento de resistencia y capacidad de carga.
- ✓ Reducción de la compresibilidad.
- ✓ Disminución de vacíos.
- ✓ Mejora el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo.
- ✓ Incremento de estabilidad de taludes de terraplenes.

- **Aplicación**

- ✓ Terraplenes para caminos y ferrocarriles.
- ✓ Cortinas para presas de tierra.
- ✓ Diques.
- ✓ Pavimentos.
- ✓ Mejoramiento de terreno natural para cimentación.

1.5.1 Compactación estática por presión. Consiste en ejercer sobre la superficie del material una fuerza aplicada de forma continua que origina una compresión sobre el mismo en función del área de contacto y como consecuencia de la presión resultante.

La compactación se logra utilizando una máquina pesada, cuyo peso comprime las partículas del suelo, sin necesidad de movimiento vibratorio. Por ejemplo: Rodillo con Neumáticos o Rodillo Liso (INGEAS S.A.S.).

2. Metodología

Para la ejecución adecuada de este proyecto se realizó la continuidad al trabajo de grado “Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio” realizado por los autores José Durán Baquero y Pinzón Pulido Paola. En donde la diferencia radica en que las muestras analizadas se realizaron en un estado de saturación cercano a uno, por lo que es necesario basarnos en los resultados de los ensayos de laboratorio comprendidos en la caracterización química y físico- mecánica del suelo, con el objetivo de comparar y mirar que mejoras o falencias ha presentado el material.

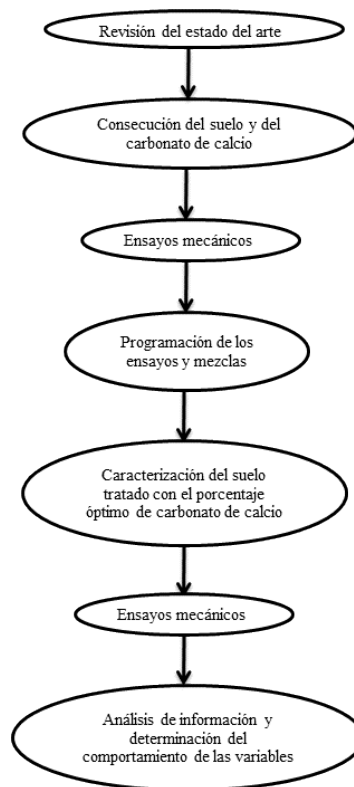


Figura 2. Metodología para la caracterización del suelo arcilloso y la mezcla suelo-carbonato de calcio.

2.1 Selección de la muestra.

Para el desarrollo de los ensayos de laboratorio que comprenden; consolidar, saturar y fallar la muestra mediante el equipo triaxial estático, se utilizaron 600 kg de bentonita sódica, la cual presenta propiedades especiales, particularmente la de expandirse en presencia de agua debido a su alta composición mineralógica de montmorillonita. En la tabla 4 y tabla 5 se presenta las especificaciones de la bentonita utilizada.

Tabla 4.

Propiedades físicas de la bentonita.

Sustancia	Cantidad (%)
Sílice (SiO ₂)	56.06
Alumina (Al ₂ O ₃)	22.27
Hierro (Fe ₂ O ₃)	3.81
Fósforo (P ₂ O ₃)	0.17
Calcio (CaO)	2.4
Potasio (K ₂ O)	1.12
Sodio (Na ₂ O)	6.2
Pérdidas a 100°C	7.94
Total	99.96

Tabla 5.

Propiedades químicas de la bentonita.

Color	Amarillo Claro
Humedad	~12
Volumen hinchamiento mínimo	25

2.1.1 Caracterización de los materiales

2.1.1.1 Caracterización geotécnica del suelo sin tratar. Del estudio realizado en el proyecto de grado “Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio”. Se tomaron los datos de la caracterización físico-mecánica del material natural, los ensayos de límite líquido y plástico. Los cuales se resumen a continuación.

Tabla 6.

Resultados de los ensayos de límite líquido y plástico.

Límite	%
Líquido	130
Plástico	56

Nota. Tomado de: Durán J., Pinzón P.. Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

Según la norma I.N.V. E-132-13 la muestra natural presento un grado de expansión elevado, lo cual nos indica que para la realización de la continuidad de este proyecto la bentonita utilizada es adecuada para evaluar la influencia de la cal en la estabilización, con muestras saturadas.

2.1.1.2 Caracterización química del carbonato de calcio. En el estudio anterior las propiedades de las arcillas con la reacción de la cal demostró que se necesita de un medio básico, con pH alto para asegurar el intercambio iónico y promover la reacción puzolánica (Bauza, 2015).

Para alcanzar estas condiciones determinaron que el contenido óptimo de cal por medio del ensayo Eades y Grim indicado en la norma ASTM C977-03. El cual realizaron a partir de una

gráfica de pH vs distintos porcentajes de cal (0, 2, 5, 10, 15 y 20 %) como se observa en la figura 3, a lo que se llegó que el porcentaje óptimo es aquel que permite alcanzar un valor de 12.45.



Figura 3. Ensayo de pH

Nota. Tomado de: Durán J., Pinzón P.. Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

A continuación en la tabla 7 y figura 4 se presentan los resultados de la prueba de pH realizados en el trabajo antecesor.

Tabla 7.

Resultados de ensayos de pH

Cal (%)	pH
0	9
2	12
5	12.25
10	12.5
15	12.75
20	13

Nota. Tomado de: Durán J., Pinzón P.. Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

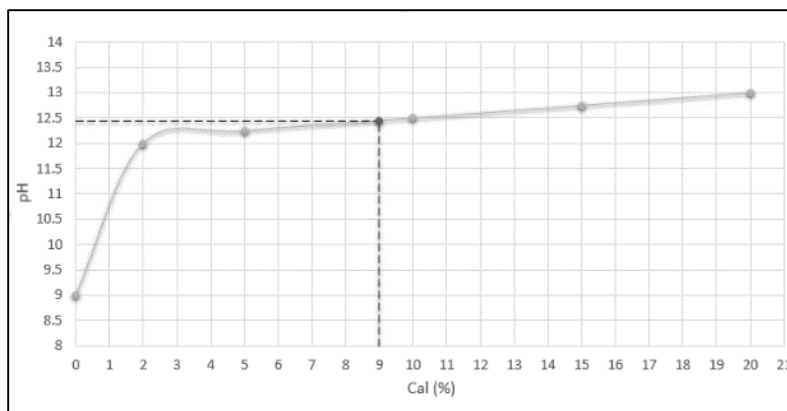


Figura 4. Selección del porcentaje óptimo de cal por el método de Eades y Grim.

Nota. Tomado de: Durán J., Pinzón P.. Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

Según los resultados obtenidos del ensayo de pH el porcentaje óptimo de cal es del 9%. Y el cual fue el utilizado para la ejecución de este proyecto, con la única diferencia es que observaremos que cambios tiene esta mezcla pero ahora en condiciones saturadas.

2.1.2 Diseño de la mezcla suelo-carbonato de calcio Se realizaron ensayos de compresión triaxial consolidados no drenados (CU) con medición de la presión de poros a tres muestras de suelo, guardando las mismas características utilizadas en el estudio “Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio” las cuales son: porcentaje óptimo de cal (9%), compactación estática a una humedad del 28%, es decir, la mitad del límite plástico. Estas muestras fueron sometidas a un grado de saturación cercano al 100%. Por otra parte, el tiempo de curado de la mezcla fue de siete días antes de la compactación (ver figura 5), y las dimensiones de las muestras se establecieron en 7 cm de diámetro y 14 cm de alto como se observa en la figura 6.

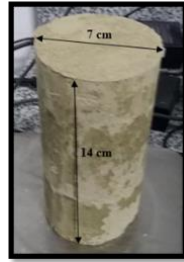


Figura 5. Mezcla compactada.



Figura 6. Mezcla suelo (Bentonita)-carbonato de calcio al 9%, con el tiempo de curado cumplido.

El diseño de estas mezclas fueron elaboradas, con el objetivo de alcanzar una densidad de compactación de aproximadamente 15 kN/m^3 , determinado mediante el criterio de la humedad óptima de compactación, en donde esta se estableció como la mitad del límite plástico, pues en este tipo de suelos; esta es la capacidad portante a alcanzar.

De esta manera, se establecieron las siguientes cantidades de agua, carbonato de calcio y bentonita.

Tabla 8.

Diseño de la mezcla suelo-carbonato de calcio.

Ws+20%	789.6	gr
Ww+20%	201.6	gr
Wcal	71.064	gr

Nota. Tomado de: Durán J., Pinzón P.. Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

3. Análisis y Resultados

3.1 Fase experimental

En la fase de estudio de la resistencia y su mejora con la aplicación de la cal, se han caracterizado mediante ensayos triaxiales consolidados no drenados (CU), con un grado de saturación cercana al 100%. Por otra parte, las muestras se sometieron a presiones de confinamiento de 20, 50 y 150 kPa. Los ensayos se realizaron en el equipo triaxial estático el cual se encuentra ubicado en el laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón de la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.



Figura 7. Montaje en el ensayo triaxial (CU).

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas:

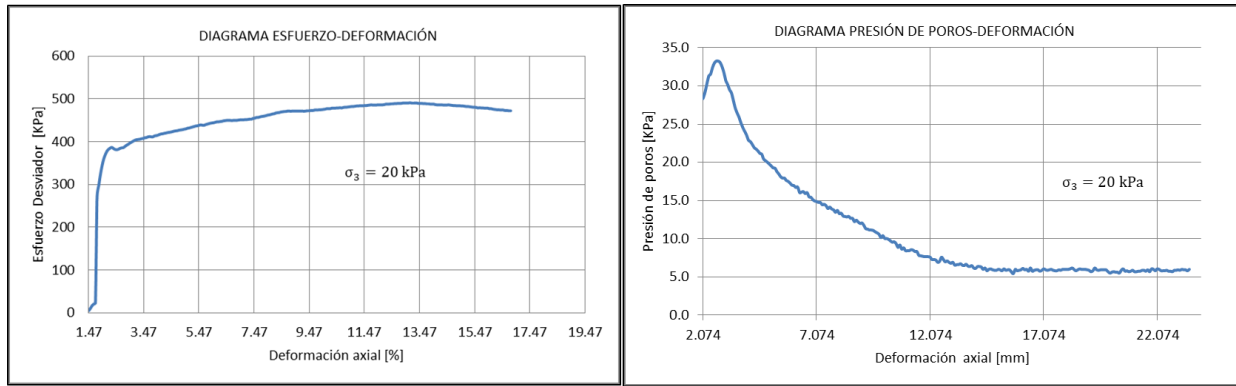


Figura 8. Resultado experimental de muestra con 9% de cal(Ensayo triaxial consolidado no drenado, $\sigma_3=20$ kPa).

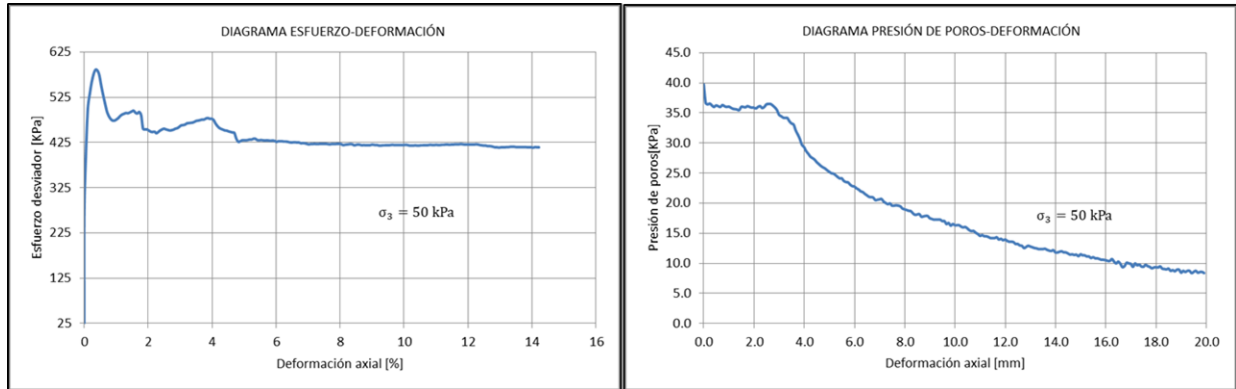


Figura 9. Resultado experimental de muestra con 9% de cal (Ensayo triaxial consolidado no drenado, $\sigma_3=50$ kPa).

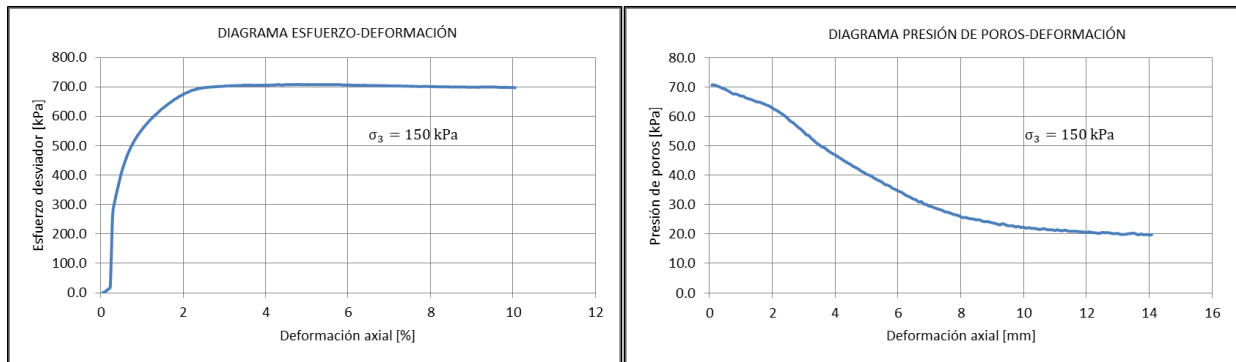


Figura 10. Resultado experimental de muestra con 9% de cal (Ensayo triaxial consolidado no drenado, $\sigma_3=150$ kPa).

Con base en estos resultados, se obtuvieron los parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción interna) para las mezcla suelo-carbonato de calcio, aplicando la teoría de falla de Mohr–Coulomb. La envolvente de falla de Mohr se obtiene como la tangente común a los círculos. En este caso por ser un suelo arcilloso, se necesitan los parámetros de cohesión y ángulo de fricción para representar la resistencia del suelo.

Se determinan los parámetros de resistencia, teniendo en cuenta que la mezcla suelo carbonato de calcio está bajo la influencia de un grado de saturación cercano al 100%, en donde el objetivo es comparar estos resultados respecto a los obtenidos en la mezcla estabilizada con el mismo porcentaje de aditivo, la cual presenta una característica importante, y es que se encuentra compactada estáticamente sin saturar, es decir, sólo contiene la humedad óptima de compactación.

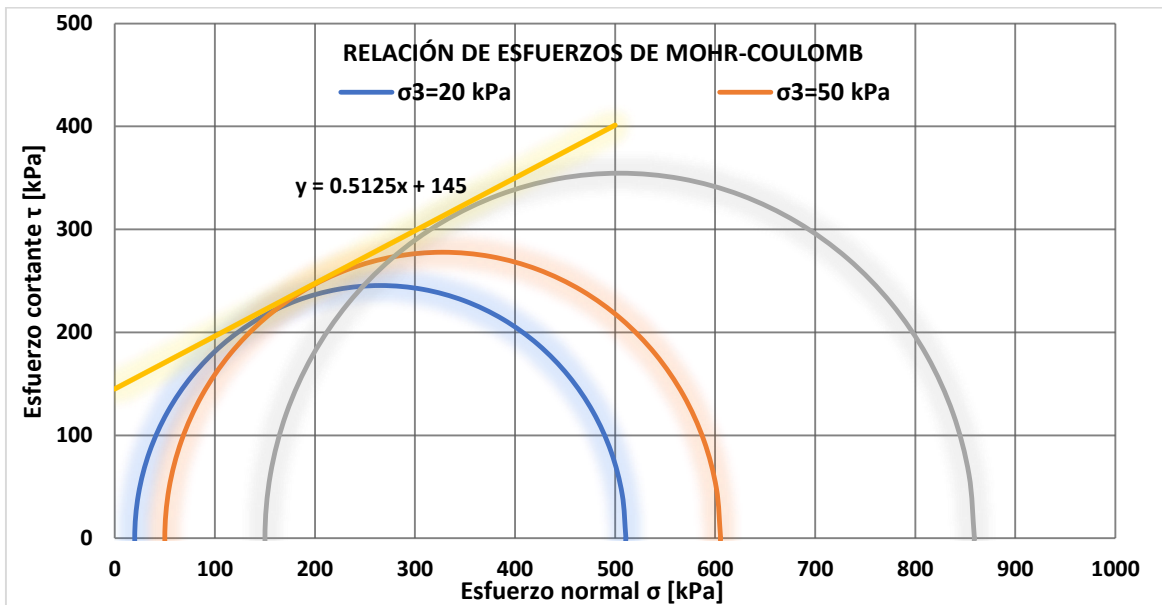


Figura 11. Envolvente de resistencia saturada.

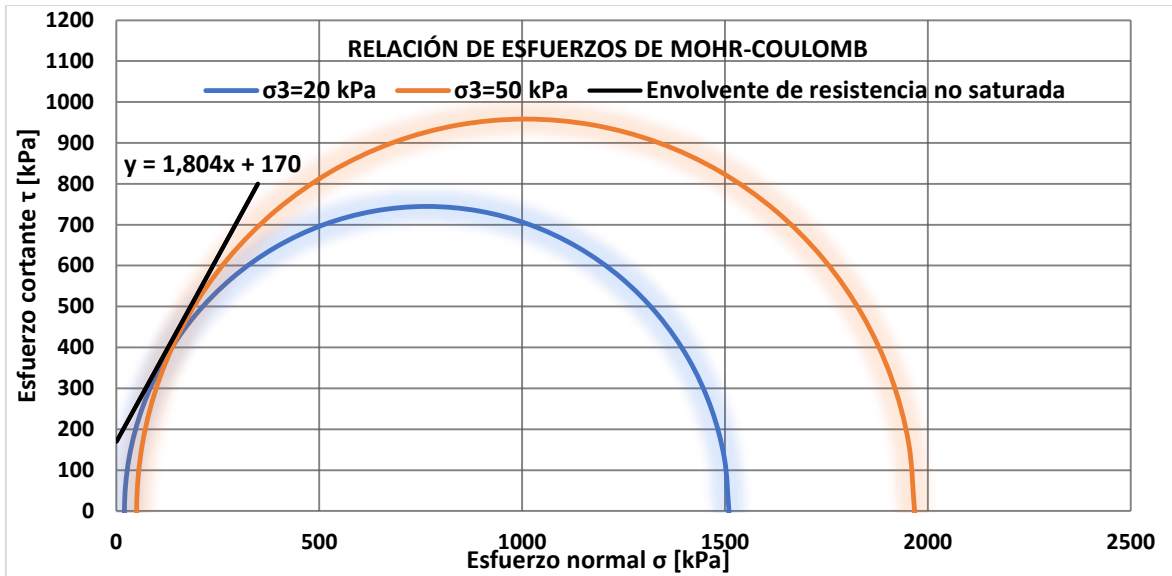


Figura 12. Envolverte de resistencia no saturada.

Nota. Tomado de: Durán J., Pinzón P.. Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

A continuación se presentan en las siguientes tablas, los resultados de los parámetros anteriormente mencionados.

Tabla 9.

Parámetros de resistencia de la muestra con 9% de cal, bajo un grado de saturación cercano a uno.

	Cohesión	145 kPa
	Fricción	27 °
Resistencia pico	$\sigma_3=20$ kPa	490.69 kPa
	$\sigma_3=50$ kPa	585.59 kPa
	$\sigma_3=150$ kPa	708.96 kPa

Tabla 10.

Parámetros de resistencia de la muestra con el 9% de cal, con humedad de compactación, sin saturación.

Cohesión		170 kPa
Fricción		61 °
Resistencia pico		1917 kPa
E ₅₀	σ ₃ =20 kPa	54087 kPa
	σ ₃ =50 kPa	123114 kPa

Nota. Tomado de: Durán J., Pinzón P.. Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

De las curvas esfuerzo-deformación obtenidas experimentalmente, se evidencia un decremento significativo en la resistencia de la mezcla suelo-carbonato de calcio, esto se debe principalmente a que en el ensayo CU, durante la fase de corte, la válvula de drenaje permanece cerrada; en consecuencia como la muestra se encuentra saturada, se presenta impedimento de que el agua entre o salga de la muestra, es decir, el volumen de la misma permanece constante durante toda la fase de corte ($\Delta V = 0$). En estas condiciones, en las gráficas de presión de poros vs deformación, se observa que para pequeñas deformaciones en el suelo ensayado, la presión de poros aumenta o se mantiene constante con respecto al esfuerzo efectivo, debido a la tendencia de disminución del volumen (contracción), seguido de un disminución en la presión de poros ocasionado por un aumento del volumen de la muestra cuando esta es sometida a la fase de corte.

Respecto al desempeño del material durante la falla, la muestra dosificada con 9% en condición de saturación, presentó un comportamiento dúctil (la resistencia pico tiende a ser muy similar a la resistencia residual), muy característico de las arcillas, donde soportaron una deformación considerable para incrementos importantes de carga y sus fallas se presentaron de manera progresiva.

De los parámetros de resistencia se observa que el ángulo de fricción disminuye, este hecho se fundamenta debido a que la presión de poros disminuye los esfuerzos normales efectivos entre partículas, tratando de separarlas y reduciendo su resistencia a la fricción. La cohesión presenta una reducción debido a que la adherencia entre las partículas del suelo varió al estar en estado de saturación, generado por las modificaciones en las características físicas del suelo.

Para la modelación o representación matemática del fenómeno de falla al cortante, se realizó utilizando la teoría de resistencia de materiales. Los suelos al fallar a cortante se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación de Mohr-Coulomb.

$$\tau = c' + (\sigma - u)\tan(\phi')$$

(Para suelos saturados)

Donde:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte

c' = cohesión o cementación efectiva

σ = Esfuerzo normal total

u = Presión del agua intersticial o de poros

ϕ' = Ángulo de fricción interna

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere conocer los parámetros, el ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo. La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo que depende de las presiones internas o de poros de acuerdo con la ecuación de Coulomb, en la cual el factor u está restando al valor de la presión normal total. A la presión resultante, se le conoce con el nombre de presión efectiva σ' .

Por lo tanto,

$$\tau = \boxed{145 \text{ kPa} + (\sigma')\tan(27^\circ)}$$

4. Conclusiones

1. Con base a los resultados de los diagramas esfuerzo-deformación, se evidenció que el material durante la falla presentó un comportamiento dúctil bajo los esfuerzos de confinamiento de 20 y 150 kPa; muy característico de las arcillas, donde soportó una deformación considerable para incrementos importantes de carga y sus fallas se presentaron de manera progresiva. En el esfuerzo de confinamiento de 50 kPa, el material presentó un comportamiento frágil dado que la diferencia entre la resistencia \acute{p} ico y residual es bastante significativa.

2. En relación a las propiedades mecánicas, se ha comprobado que al estar la muestra bajo condición de saturación, refleja su estado más crítico, pues se evidencia una disminución considerable de la resistencia; alcanzado valores de 709 kPa con respecto a los 1917 kPa, de la muestra estabilizada sin saturar.

3. Los resultados de laboratorio arrojaron que la adición del 9% en peso seco del suelo de carbonato 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 la 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 del suelo original.

4. La cohesión presentó una reducción debido a que la adherencia entre las partículas del suelo varió al estar en estado de saturación, generado por las modificaciones en las características físicas

del suelo, que conllevan a la aparición de la reacción puzolánica. Este hecho se refleja en los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales, con valores de cohesión de 145 kPa para la muestra estabilizada saturada y 170 kPa para la muestra estabilizada sin saturar.

5. El ángulo de fricción presentó un decrecimiento significativo, este hecho se fundamenta debido a que la presión de poros disminuye los esfuerzos normales efectivos entre partículas, tratando de separarlas y reduciendo su resistencia a la fricción. Lo anterior se refleja en los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales, con valores de ángulo de fricción de 27° para el suelo tratado saturado y de 61° para suelo tratado sin saturar.

6. Durante la fase de corte del ensayo CU, la válvula de drenaje permaneció cerrada. En consecuencia como la muestra se encuentra saturada, se presentó impedimento de que el agua entre o salga de la muestra, es decir, el volumen de la misma permanece constante durante toda la fase de corte ($\Delta V = 0$). En estas condiciones; en los diagramas de “presión de poros vs deformación”, se observó que para pequeñas deformaciones, el suelo ensayado presentó un aumento de la presión de poros significativo con respecto al esfuerzo efectivo debido a la tendencia de disminución del volumen (contracción), seguido de un decremento subsecuente de la presión de poros ocasionado por un aumento del volumen cuando se le sometió a corte (dilatancia).

7. La estabilidad del suelo tratado con carbonato de calcio aumentó significativamente en relación con el suelo sin tratar al someterse a condiciones de saturación, incluso tiempo después del periodo de observación.

8. Efectivamente, la utilización del carbonato 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.

9. 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.

Referencias Bibliográficas

- Bauza, J. (2015). *El tratamiento de los suelos arcillosos con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad (Tesis doctoral)*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Cometa, S., & Mendez, N. (2016). *Correlación entre los resultados obtenidos en el ensayo de corte directo y el ensayo triaxial en un suelo arcilloso típico de la zona occidental de Bogotá (Tesis de pregrado)*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Dorfman, B. (1988). *Estabilización de suelos*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Durán Jose, P. P. (2017). *Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio. Tesis de investigación*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. .
- Higuera Sandoval, C. H. (2010). *Estabilización de Suelos. Guías de clase*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Higuera Sandoval, C. H. (2011). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimento para carreteras. Volumen I*. Tunja.
- Higuera, C., Gómez, J., & Pardo, O. (2012). *Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. Publicación técnica [PhD Tesis]*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Transportes y Vías.
- INGEAS S.A.S. (s.f.). *Ingenieros Geotecnistas Asociados*. Obtenido de <http://www.ingeassas.com>
- Sánchez Sabogal, F. (1985). *Estabilización de suelos con cal*. Popayán: Universidad del Cauca.

Apéndices

Apéndice A Resultados obtenidos del ensayo triaxial

<u>ENSAYO TRIAXIAL</u>		
TIPO DE ENSAYO	Consolidado no Drenado (CU)	
TIPO DE MUESTRA	Alterada	
CONDICIONES DEL ESPECÍMEN		
Condiciones iniciales		
ALTURA	140	[mm]
DIÁMETRO	70	[mm]
ÁREA	3848.36	[mm ²]
Condiciones después de saturación		
Presión de cámara	650	[kPa]
Contrapresión	585	[kPa]
$\Delta\sigma_3$	20	[kPa]
ΔU	19	[kPa]
Parámetro B	0.95	[%]
Condiciones después de consolidación		
Presión de cámara	50	[kPa]
Contrapresión	20	[kPa]
Esfuerzo de consolidación efectivo	20	[kPa]

Etapa de falla		
Presión de cámara Inicial	50	[kPa]
Presión de poros inicial	23.641	[kPa]
Velocidad de falla	0.5	mm/min
Esfuerzo desviador máximo	490.69	[kPa]
deformación axial	16.78	[%]
Tiempo de falla	56	[min]
Ángulo de fricción Interno	27	[°]

Apéndice B. Resultados obtenidos del ensayo triaxial

<u>ENSAYO TRIAXIAL</u>		
TIPO DE ENSAYO	Consolidado no Drenado (CU)	
TIPO DE MUESTRA	Alterada	
CONDICIONES DEL ESPECÍMEN		
Condiciones iniciales		
ALTURA	140	[mm]
DIÁMETRO	70	[mm]
ÁREA	3848.36	[mm ²]
Condiciones después de saturación		
Presión de cámara	700	[kPa]
Contrapresión	642	[kPa]
$\Delta\sigma_3$	35	[kPa]
ΔU	34	[kPa]
Parámetro B	0.97	[%]
Condiciones después de consolidación		
Presión de cámara	100	[kPa]
Contrapresión	50	[kPa]
Esfuerzo de consolidación efectivo	50	[kPa]

Etapa de falla		
Presión de cámara Inicial	100	[kPa]
Presión de poros inicial	37.85	[kPa]
Velocidad de falla	0.5	mm/min
Esfuerzo desviador máximo	585.59	[kPa]
deformación axial	0.34	[%]
Tiempo de falla	56	[min]
Ángulo de fricción Interno	27	[°]

Apéndices C Resultados obtenidos del ensayo triaxial

<u>ENSAYO TRIAXIAL</u>		
TIPO DE ENSAYO	Consolidado no Drenado (CU)	
TIPO DE MUESTRA	Alterada	
CONDICIONES DEL ESPECÍMEN		
Condiciones iniciales		
ALTURA	140	[mm]
DIÁMETRO	70	[mm]
ÁREA	3848.36	[mm ²]
Condiciones después de saturación		
Presión de cámara	200	[kPa]
Contrapresión	101	[kPa]
$\Delta\sigma_3$	40	[kPa]
ΔU	38	[kPa]
Parámetro B	0.95	[%]
Condiciones después de consolidación		
Presión de cámara	150	[kPa]
Contrapresión	15	[kPa]
Esfuerzo de consolidación efectivo	150	[kPa]

Etapa de falla		
Presión de cámara Inicial	150	[kPa]
Presión de poros inicial	70.667	[kPa]
Velocidad de falla	0.5	mm/min
Esfuerzo desviador máximo	708.96	[kPa]
deformación axial	4.75	[%]
Tiempo de falla	56	[min]
Ángulo de fricción Interno	27	[°]