

**ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL DE LA CANTERA DE COMBIA,
UBICADA EN EL CORREGIMIENTO DE COMBIA, PEREIRA- RISARALDA.**

AUXILIARES DE INVESTIGACIÓN:

DIANA MARCELA GIRALDO CASTAÑO

DAVID FELIPE SOLÍS HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD LIBRE

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

PEREIRA

2018

**ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL DE LA CANTERA DE COMBIA,
UBICADA EN EL CORREGIMIENTO DE COMBIA, PEREIRA- RISARALDA.**

AUXILIARES DE INVESTIGACIÓN:

DIANA MARCELA GIRALDO CASTAÑO

DAVID FELIPE SOLÍS HERNÁNDEZ

INVESTIGADOR PRINCIPAL:

ALEJANDRO ALZATE BUITRAGO

UNIVERSIDAD LIBRE

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

PEREIRA

2018

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	13
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	19
5. MARCO REFERENCIAL	20
5.1. MARCO TEÓRICO	20
5.1.1. COMPOSICIÓN INTERNA DEL SUELO.	20
5.1.2. DEFORMACIÓN EN EL SUELO	20
5.1.3. ESTABILIZACIÓN DE SUELO.....	22
5.1.5. CONSISTENCIA DE LOS SUELOS	23
5.2. MARCO DE ANTECEDENTES	24
5.3. MARCO LEGAL (NORMATIVO).....	29
5.4. MARCO CONCEPTUAL	32
5.4.1. SUELO.....	32
5.4.2. LIMITES DE A. ATTERBERG	33
5.4.3. ÍNDICE DE PLASTICIDAD.....	33
5.4.4. RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR POR SUS SIGLAS EN INGLÉS).....	34
6. DISEÑO METODOLÓGICO	35
6.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN Y TIPO DE ESTUDIO	35
6.1.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	35
6.2. MATRIZ DE DISEÑO METODOLÓGICO	37

6.3.	FASES Y RESULTADOS.....	40
6.3.1.	FASES DE LA INVESTIGACION	40
7.	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	42
7.1.	Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos. 42	
7.2.	Definir el protocolo de adición de cemento como mejorador de la condición de resistencia.....	49
7.3.	Establecer porcentaje de cemento, de mayor eficiencia para el aumento de la resistencia del material objeto de estudio.	51
8.	CONCLUSIONES	55
9.	RECOMENDACIONES	58
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad aplicada en la investigación.....	29
Tabla 2. Matriz de diseño metodológico.	37
Tabla 3. Resultados de ensayos de caracterización física del material.	43
Tabla 4. Relaciones que debe cumplir el material de afirmado.....	46
Tabla 5. Resultados de ensayos mecánicos.	48
Tabla 6. Resultado de esfuerzo máximo promedio por porcentaje en probetas de suelo- cemento.....	52
Tabla 7. Carta de correlación tipo polinómica entre el porcentaje de cemento y el esfuerzo máximo.	54

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Regresión polinómica de valores de esfuerzo máximo vs porcentaje de cemento.....	53
---	----

RESUMEN

Se estima que sólo el 25 por ciento del total de las vías terciarias del país se encuentran pavimentadas (El Tiempo, 2017), y aquellas que no lo están suelen ser intervenidas utilizando material granular generalmente conocido como afirmado, siendo este el método más empleado en la gran mayoría de las vías terciarias intervenidas por el estado. En vista de lo anterior, el presente documento evalúa las alternativas de aprovechamiento y mejoramiento de los agregados pétreos de la zona, en este caso el material de afirmado de la cantera de Combia, ubicada en el Corregimiento de Combia, Pereira - Risaralda, dicho material se optimiza mediante la adición de un agente estabilizante como lo es el cemento, es decir, se realiza una estabilización química del material de afirmado, la cual consiste en la alteración de las propiedades del suelo in situ, mediante la adición de un producto químico, el cual optimiza el comportamiento del suelo original y mejora propiedades como la resistencia, durabilidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad, y permanencia de las propiedades adquiridas (Higuera, 2012, p.24).

La investigación aquí planteada es de tipo experimental-descriptiva, y se divide en cuatro fases, la toma de muestras, la caracterización física y mecánica del material de acuerdo al Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías, INVIAS, la fase de estabilización con cemento, que comprende la elaboración, preparación y curado de cilindros de suelo-cemento, y finalmente la fase de diseño, en la cual se establece el porcentaje de cemento de mayor eficiencia para el aumento de la resistencia del material objeto de estudio, mediante la implementación del ensayo INV E – 614 – 13 de resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento.

Una vez realizado el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de cilindros moldeados de suelo-cemento, se concluye que el porcentaje optimo, oscila entre 6% y 7% y por medio de una regresión lineal, con un coeficiente de correlación de Pearson (R^2) igual a 0.9975, que brinda alto nivel de confianza, se determinó que el porcentaje óptimo de cemento es de 6.4%.

Palabras Clave: Estabilización química de suelos, Estabilización química con cemento, resistencia a la compresión de cilindros de suelo-cemento, afirmado, mejoramiento de suelos.

ABSTRACT

It is estimated that only 25% of the tertiary roads of the country are paved (El Tiempo, 2017), and those that are not are usually intervened using granular material generally known as road Surface, this is eventually the method most used in the majority of tertiary roads intervened by the government. Because of that, this document evaluates the alternatives for the use and improvement of the stony aggregates of the area, in this case the material of the quarry of Combia, located in the corregimiento of Combia, Pereira - Risaralda, said material is improved by the addition of a stabilizing agent such as cement, therefore, A chemical stabilization of the material is carried out, which consists in the alteration of the properties of the soil in situ, through the addition of a chemical product, which optimizes the behaviour of the original soil and improves properties such as strength, durability, permeability , volumetric stability, compressibility, workability, and permanence of properties acquired (Higuera, 2012, p.24).

The research presented here is of an experimental-descriptive type, and it is divided into four phases; taking of samples, physical and mechanical characterization of the material according to the Manual of Testing Standards of Materials for Roads of the National Institute of Roads INVIAS, stabilization phase with cement, which includes the elaboration, preparation and curing of soil-cement cylinders, and finally the design phase, which establishes the percentage of cement with the highest efficiency for increasing the strength of the material

by the implementation of the INV E - 614 - 13 test of resistance to compression of moulded soil-cement cylinders.

Once the test of resistance to the unconfined compression of moulded cylinders of soil-cement is carried out, it is concluded that the optimal percentage oscillates between 6% and 7% and by means of a linear regression, with a Pearson correlation coefficient (R^2) equal to 0.9975, which provides a high level of confidence, it was determined that the optimum percentage of cement is 6.4%.

Keywords: Chemical soil stabilization, chemical stabilization with cement, resistance to compression of soil-cement cylinders, road surface, soil improvement.

1. INTRODUCCIÓN

En el ejercicio de la ingeniería civil, se presentan suelos plásticos o inestables y una de las soluciones es removerlos y reemplazarlos por unos mejores, sin embargo esta solución puede ser un poco engorrosa en casos donde la cantidad a remover sea de un volumen considerable, ya que se incurriría en elevados costos de transporte, equipo y disposición del material, siendo entonces de especial consideración la estabilización química de suelos, que utiliza los suelos del mismo lugar donde se realizará la obra.

La estabilización química de suelos consiste en la alteración de las propiedades del suelo in situ, mediante la adición de un producto químico el cual luego de ser mezclado y posteriormente curado, optimiza el comportamiento del suelo original, es decir, se mejoran propiedades como son la resistencia, durabilidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad, y permanencia de las propiedades adquiridas. Sin embargo, “no todos los suelos son susceptibles de ser mejorados bajo estas circunstancias” (Higuera, 2012, p.24), ya que se trata en particular de suelos finos plásticos, como limos y arcillas especialmente y suelos finos tipo arenas, los demás tipos de suelos obedecen más a estabilizaciones de tipo mecánica y física.

“Los aditivos más comunes son la cal, el cemento y la cal con ceniza muy fina. Los suelos finos plásticos como limos y arcillas son tratados con cal y los suelos finos tipos arenas se

estabilizan mejor mediante a adición de un agente hidráulico como es el caso del cemento portland” (Braja, 2000, p.760).

Cuando se pretende realizar un estudio de estabilización química de suelos, se deben caracterizar estos previamente, mediante ensayos de laboratorio que determinaran sus características físico-mecánicas y después se deben realizar mezclas de suelo aditivo, en las que se varía el porcentaje de este, con el fin de observar las tendencias de sus características y poder así seleccionar el porcentaje de aditivo optimo, que proporcione mejores condiciones al suelo que se quiere mejorar.

Una vez se tienen el porcentaje de aditivo optimo, se procede con la aplicación de este en campo, lo cual consiste primero en la preparación del suelo, después el esparcimiento de aditivo mezclado y adición de agua, compactación, terminación y curado (DE SOLMINIHAC, 2009). Sin embargo, para efectos de un proyecto de grado, no se realiza este último paso, pues el alcance se limita a la determinación de un porcentaje de aditivo optimo, en la estabilización de algún tipo de suelo problema.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

En Colombia se presenta un grave abandono en lo que a mantenimiento y pavimentación de vías se refiere, especialmente en vías terciarias, de las cuales a pesar de que no se tienen informes completos; se estima que sólo el 25 por ciento del total de vías terciarias del país se encuentran pavimentadas, mientras que aproximadamente 106.713 Kilómetros se encuentra en deficiente estado (El Tiempo, 2017). En el Plan de Desarrollo 2014-2018 Todos por un Nuevo País, del Expresidente Juan Manuel Santos, se hacía énfasis en que para lograr la integración Nacional, es necesario entre otros factores, lograr la construcción y mantenimiento adecuado de las redes viales, en particular las vías terciarias “Para ello se requiere avanzar en esquemas innovadores de ejecución de los proyectos que focalicen la participación de la comunidad en las actividades de rehabilitación y mantenimiento de infraestructura, especialmente en aquellos territorios más rezagados en su desarrollo” (Gobierno Nacional, 2014, p. 43).

En el mes de enero del año 2018 fueron destinados más de 30 mil millones de pesos para el mejoramiento de vías terciarias en cinco departamentos, entre ellos, Risaralda, en donde se planea intervenir cuatro municipios: Quinchía, Mistrató, Pueblo Rico y Balboa, en los cuales se hará una intervención con placa huella para mejorar el acceso a lugar de producción (Alcaldía Municipal de Pueblo Rico en Risaralda, 2018). Con esta noticia podemos apreciar

que se realizará una mejora en la región respecto a este tema, pero dada la magnitud las vías que necesitan intervención ésta es solo una pequeña porción de todos los kilómetros de vía que necesitan inversión, entre ellos sectores aledaños a la cabecera municipal de Pereira, incluidos Combia, en donde se aprecia un considerable crecimiento Urbanístico debido a lo apetecible de este sector para viviendas campestres, hoteles y construcciones cerradas, generando así cantidades de tráfico más grandes cada vez pero debido a diferentes factores las mejoras en las vías terciarias del sector no incrementan al mismo ritmo, generando consecuencias en el tráfico por el sector, retraso en el tiempo de movilizaciones de las personas y de los diferentes tipos de carga que se necesita movilizar.

Muchas de las carreteras terciarias son suelos susceptibles, como es el caso de las arcillas, situación que empeora en épocas de lluvia, ocasionándose “grandes problemas como deformaciones, agrietamientos, estabilidad volumétrica, pérdida de la banca y baja resistencia entre otros” (Higuera, 2012, p23).

Debido a lo anteriormente mencionado las vías terciarias que se encuentran en abandono por el estado suelen ser intervenidas utilizando material granular generalmente conocido como afirmado, y a veces con ayuda de maquinaria se le compacta, siendo éste el método más empleado en la gran mayoría de las vías terciarias aún en el país, como bien se dio a conocer, el sector de Combia presenta una creciente necesidad de intervenir las vías y cada vez más es necesario utilizar material de la denominada “Cantera de Combia” para realizar este mejoramiento.

Nuestra investigación pretende encontrar la mezcla o proporción más idónea para realizar una intervención a las vías utilizando el material especificado con anterioridad, sin necesidad de generar costos tan elevados como los generados por métodos generales de pavimentación, presentando una opción para el mejoramiento del tráfico del sector y de cualquier sector que emplee como material granular el extraído de la Cantera de Combia, generando así un mejoramiento en el bienestar y calidad de vida de los usuarios.

Como es bien sabido los costos de la construcción de una carretera, son elevados, con el agravante de que pueden deteriorarse fácilmente, especialmente por factores climatológicos, es decir, que este tipo de carreteras terciarias, como dice Orellana (2009), solo se ven sometidas a escasos mantenimientos con afirmado y balastro sin obtener resultados satisfactorios, debido a que cada año el invierno causa deterioros progresivos, tanto en la superficie como en la estructura de este.

La investigación presentará información actualmente inexistente sobre un uso óptimo para el material de la cantera de estudio, el cual es utilizado en gran medida para la mejora de vías del sector, presentando un enfoque innovador a la típica investigación de suelos en una vía, ya que se presentará una guía para todos aquellos que deseen utilizar el material de la cantera de Combia, independientemente del lugar donde se vaya a utilizar.

En virtud de lo anteriormente descrito la presente investigación tendrá un enfoque experimental-descriptivo, a través del cual se busca determinar la mezcla apropiada de material cementante, en este caso cemento con el material proveniente de esta cantera ubicada en el Sector de Combia del municipio de Pereira. De la cual, mediante la aplicación de esta investigación, se garantice el beneficio de las comunidades aledañas que hagan uso de ella, con una duración aproximada de un año.

Con la información anterior planteada se realiza la siguiente pregunta la cual será la base y guía de trabajo en la presente investigación ¿Qué proporciones de cemento con el material de La Cantera de Combia ubicada en el sector Combia en el Municipio de Pereira, presenta mejores características físicas y mecánicas?

3. JUSTIFICACIÓN

Aunque se están realizando intervenciones y mejoramiento a las vías terciarias por parte de varias gobernaciones y alcaldías del país, la pavimentación de tan grandes cantidades de kilómetros de vía representa una elevada inversión ya que se estima que el valor de cada kilómetro de vía puede alcanzar los 500 millones de pesos (Ávila, 2016), por ende, se hace necesario encontrar otros procedimientos que permitan mejorar la calidad y usabilidad de éstas vías sin necesidad de intervenciones de costo tan elevado.

La falta de vías terciarias en buen estado afecta directamente la economía del país, así como el PIB ya que estas deficiencias dificultan el transporte de productos agrícolas por parte de los pequeños y grandes agrícolas de las regiones hacia los principales puntos del país, así como hacia los puertos, inconveniente que se vería grandemente mejorado implementando una mejora en estas vías, lo cual, conllevaría a una disminución importante del tiempo que les tomaría a los diferentes transportadores moverse por el país, sin un gran impacto económico para el gobierno, por ende para nosotros.

La generación de una guía para una mezcla idónea para el material de esta cantera generará un impacto positivo en el bienestar general de todas las personas que vivan o transiten en los lugares donde es utilizado este material para el tratamiento de las vías, ya que disminuirá la dificultad para el tratamiento de la capa de rodadura, así como aumentará la eficiencia, duración y resistencia de las vías tratadas, sin necesidad de realizar una investigación individual para cada situación en específico, lo cual también tendrá beneficios económicos

ya que se generarán menores desperdicios, además de que al aumentar la eficiencia de la capa de rodadura, esta necesitará menor tratamiento y tendrá una vida útil más larga, por lo cual se necesitará menores intervenciones en la vía.

Desde un punto de vista social la investigación tendrá un impacto en la forma en que las personas de sector donde se utilice el material para el mejoramiento de vías, ya que mejorará la percepción de duración que tienen estas vías tratadas superficialmente, generando así mayor satisfacción, tanto como para los habitantes como para los turistas o personas que transiten de paso.

4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. OBJETIVO GENERAL.

Evaluar las alternativas de aprovechamiento de los agregados pétreos de la cantera de Combia, ubicada en el Corregimiento de Combia, Pereira - Risaralda, mediante la adición de un agente estabilizante.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos de la cantera de Combia, ubicada en el corregimiento de Combia, Pereira – Risaralda.

Definir el protocolo de adición de cemento como mejorador de la condición de resistencia.

Establecer porcentaje de cemento, de mayor eficiencia para el aumento de la resistencia del material objeto de estudio.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. MARCO TEÓRICO

5.1.1. COMPOSICIÓN INTERNA DEL SUELO.

El “suelo” está conformado por una gran variedad de minerales, los cuales son una sustancia inorgánica y natural, que tiene un estructura interna y características determinadas por un cierto arreglo específico de sus átomos e iones. Cuya composición química y sus propiedades o son fijas o varían dentro de límites definidos (Badillo y Rodríguez, 2012, p. 37).

5.1.2. DEFORMACIÓN EN EL SUELO

Una muestra de suelo al ser sometida a una fuerza, ejercida por un pistón, nos permite mostrar cómo se va a comportar un suelo ante esta situación, cabe decir que depende directamente del tipo de partículas que en éste se encuentren, ya que si se encuentran partículas laminares lo primero que va a tender a suceder a flectarse, de otro modo lo principal será cuando la fuerza tangencial supere la resistencia tangencial de las partículas y provocarán que éstas se comiencen a reacomodar, aproximando así los centros de masa de

éstas, por consiguiente éste podría considerarse como el primer efecto de “deformación” que se presente en un suelo.

Otro efecto es el que el esfuerzo efectuado supere la resistencia de las partículas ocasionando que éstas se rompan, llevando así también al reacomodo de las partículas, pero también a la modificación de las características del suelo ya que éste se ve fracturado y esto genera unos efectos sobre las partículas cambiando sus capacidades mecánicas, así como generando mayor área de contacto entre ellas lo cual aumenta la capacidad de soporte del suelo (Lambe, 2008).

También cabe decir que:

La naturaleza de la deformación depende de la resistencia del material y de la combinación de esfuerzos, los diferentes materiales incluyendo los suelos reaccionan de diferente manera; unos se desintegran, y otros se deforman continuamente con un mínimo o nulo cambio de esfuerzos, la deformación no es siempre proporcional al esfuerzo, sino que cambia con el tiempo y el esfuerzo.

(Sowers y Sowers, 1972, p.163)

Y debido a la gran variedad de suelos y en consecuente de comportamiento que puede tener un tipo en específico, es necesario tener en cuenta que métodos como los círculos de Mohr, módulo de Poisson, o módulo de elasticidad son aproximaciones y no representan valores exactos, por lo cual se deben interpretar con criterio para poder hacer un buen uso de estos.

5.1.3. ESTABILIZACIÓN DE SUELO.

proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. Se dice que es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su plasticidad (Zuluaga, 2005, p.5).

5.1.4. ESTABILIZACIÓN QUIMICA

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

Los aditivos químicos más usados para la estabilización química de suelos son:

- Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y puede ser económica.
- Cemento Portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- Emulsiones Asfálticas: es muy usada para material triturado sin cohesión.
- Cloruro de Sodio: impermeabilizan y disminuyen la producción de los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

- Cloruro de Calcio: impermeabilizan y disminuyen la producción de los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Escorias de Fundición: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Caucho de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

(Zuluaga, 2005, p.6)

5.1.5. CONSISTENCIA DE LOS SUELOS

La plasticidad es la propiedad que tiene el suelo para cambiar de forma (dentro de un rango de humedad dado) y mantener sin perder volumen ni romperse cuando se someten a fuerzas de compresión (Huezo y Orellana, 2009, p.24). La plasticidad comenzó siendo una caracterización utilizada en la cerámica, pero en tiempos recientes pasó a ser de interés ingenieril ya que se halló relación entre esta característica y las propiedades mecánicas de los suelos, relacionadas directamente a la parte más fina de éste compuesta por partículas laminares propio de la arcilla (Badillo y Rodríguez, 2005, p.123).

5.2. MARCO DE ANTECEDENTES

En los procesos de estabilización química de suelos los aditivos más comunes son la cal, el cemento, ceniza y sales como el cloruro de sodio. Respecto a los anteriores aditivos se han realizado diversos escritos, desde artículos de revista, tesis, manuales entre otros, los cuales se presentan a continuación.

Un estudio realizado en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, y publicado en la revista Facultad de Ingeniería UPTC, denominado “Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio”. Proponen una metodología para incorporar hidróxido de calcio a suelos susceptibles tales como arcillas, para de esta forma estabilizarlo y mejorar sus propiedades físicas, mecánica y químicas.

La metodología consistió en la caracterización del suelo sin tratar, caracterización química del hidróxido de calcio, posteriormente se realiza la caracterización de las mezclas, el diseño de las mezclas, y por último la caracterización físico-mecánica y química de las mezclas.

Higuera (2012) concluyó que el tratamiento del suelo con hidróxido de calcio mejora las características del suelo original, debido a la disminución del índice de plasticidad, aumento de la capacidad cementante del suelo, aumento de la estabilidad, aumento de la capacidad de soporte y resistencia del suelo y además la mezcla que mejor resultados mostró, fue aquella con 4% en peso seco del suelo de hidróxido de calcio en la mezcla.

La asociación nacional de fabricantes de cales y derivados de España (ANCADE, 2005), en el manual de tratamientos de suelos con cal, también le confiere a la cal como aditivo químico ventajas tales como en el uso de estabilización de suelos arcillosos de carreteras terciarias, afirmando que el índice de plasticidad disminuye notablemente y que el suelo se vuelve más friable, además de que ayuda a que los suelos húmedos se sequen más rápidamente y de esta forma facilitar la compactación, también se incrementa la capacidad portante del suelo, se aumenta la resistencia a tracción y flexión entre otros beneficios.

El manual práctico para la estabilización de suelo con cal hace énfasis en la longevidad de los suelos tratados con este aditivo, al afirmar “que cuando se estabiliza un suelo con cal, este se transforma en una capa dura, relativamente impermeable, produciendo una capa estructural que es tan fuerte como flexible” (ANFACAL, 1974). Además, se expone que los cambios más significativos ocurrieron con una adición de 3% a 4% en peso de cal, a diferencia de rangos de entre 6% y 7%, donde se mostraron menores cambios.

Otro de los antecedentes que se tiene respecto al uso de cal como se estabilizante químico de suelos, se tiene con el proyecto de grado realizado en la Universidad Libre seccional Pereira, denominado “formulación de criterios de estabilización de taludes compuestos por cenizas volcánicas, mediante el tratamiento químico de los suelos”, donde se determinó que las probetas no pueden ser ensayadas antes de 7 días y que estas deben presentar humedades de entre 20% y 30%, ya que de lo contrario es muy probable que ocurran fracturas en las mismas al ser sometidas al ensayo de compresión confinada, además de determinarse que el

porcentaje óptimo de cal en la muestra fue de 14%, pasando el terreno natural de una resistencia a la compresión de 0.6229 Kg/cm^2 a 1.8765 Kg/cm^2 , lo cual supera definitivamente el máximo esfuerzo del suelo natural (Abello, Ortiz, Ospina y Ospina, 2014).

La estabilización química de suelos también presenta resultados positivos en suelos expansivos, tal como se evidencio en un artículo de la revista Respuestas N°2 (2013), donde se presenta los resultados de la estabilización química de los suelos expansivos de una zona representativa de San José de Cúcuta, donde se han observado daños en construcciones livianas como consecuencia de la expansión retracción del suelo por la variación constante de la humedad. Para lograr dicha estabilidad del suelo arcilloso, se propone como aditivo químico cenizas volantes.

La metodología consiste en clasificar y describir los estratos de la zona (ensayos físicos), ensayos químicos para determinar la capacidad de intercambio catiónico, el cual permite determinar la expansividad del suelo y por ultimo las mezclas de cenizas óptimas.

Se concluye que el efecto de la adición de las cenizas sobre el suelo arcilloso es beneficioso, ya que reduce considerablemente el límite líquido (16.50%) y el índice de plasticidad (30.74%), así como la superficie específica, aumentando la estabilidad del suelo para los fines requeridos y “el porcentaje de cenizas que arrojó los mejores resultados sobre el suelo en estudio fue el 30%” (Flórez, Zarate, Caicedo y Contreras, 2008).

Respecto al anterior aditivo se tienen evidencias similares en cuanto a la cantidad que se debe adicionar a una muestra de suelo para lograr resultados satisfactorios, dicho trabajo de grado de ingeniería en geotecnia denominado “Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada de pavimentos” Pérez (2012) concluye que “Las cenizas volantes funcionan como aditivo inhibidor de las propiedades expansivas del material, pero este requiere ser adicionado en porcentajes excesivos, en promedio mayor a 20%”.

La estabilización química con cemento, al igual que la cal y las cenizas volantes, también presenta resultados favorables en lo que respecta al mejoramiento de la capacidad de soporte del suelo y de la resistencia del mismo, tal como se especifica en la guía técnica de IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones).

En dicha guía técnica se recomienda una dosis mínima de cemento de entre 2,5% y 3%, para lograr resultados favorables.

Por otro lado, en el manual de la Asociación Nacional de Fabricantes de cales y derivados de España, se recomiendan un porcentaje de cemento de entre 3 y 5% (Jofré y Kraemer, 2003).

Otro antecedente que se tiene con respecto al uso de cemento en mezclas de suelos, es en su dosificación a material de afirmado o recebo, tal como se realizó con el proyecto de investigación denominado “Determinación de los parámetros mecánicos en afirmados estabilizados con cemento para uso en cimentaciones, extraídos de la cantera de Combia en

la ciudad de Pereira Risaralda”, en el cual se realizan mezclas de afirmado con cemento portland tipo I, para ser usadas en cimentaciones superficial, donde Amariles (2015) afirma: “que el contenido porcentual de cemento optimo oscina entre 5% y 6%, debido a que hasta esta proporción de cemento la resistencia aumenta considerablemente, ya que al agregar una mayor cantidad de cemento la resistencia tiende a ser constante y no aumenta de forma considerable” (p 103).

Además de servir como estabilizante químico de suelos, el cemento también presenta antecedentes en cuanto a su dosificación en la elaboración de bloques de tierra comprimida, los cuales son una mezcla de suelos arcillosos o limo arcillosos, escombros y cemento, siendo este último fundamental para aumentar la resistencia de los bloques. Escobar, León y Salazar (2016) concluyeron que “la dosificación con mejores resultados fue aquella con 80% de suelo derivado de cenizas volcánicas, 15% de residuos de concreto y 5% de cemento” (p 81).

5.3. MARCO LEGAL (NORMATIVO)

Tabla 1. Normatividad aplicada en la investigación

Fuente: Propia

Norma	Descripción
INV E – 122 – 13 Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.	Este método cubre la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas suelo-agregado por peso, por contenido de humedad del material se define como la relación expresada en porcentaje entre la masa de agua que llena los poros en una masa de material, y la masa de partículas sólidas del material. Laboratorio que nos es importante para la investigación ya que nos va a permitir conocer características físicas del material al momento de ser extraído de la cantera.
INV E – 123 – 13 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.	Tiene como objetivo la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo, y aquí es descrito el método para determinar los porcentajes de suelo que pasan por distintos tamices de la serie utilizada, que van hasta el 75 μm (No.200). Lo cual nos va a permitir conocer los tamaños de partículas predominantes en la extracción de nuestra cantera de investigación y relacionar de esta forma las características del suelo con el diseño de rodadura a realizar.
INV E – 125 – 13 Determinación del límite líquido de los suelos.	Por límite líquido de un suelo se entiende como el contenido de humedad secado en horno, cuando este se encuentra entre el estado líquido y el estado plástico.
INV E – 126 – 13 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.	Esta norma nos muestra un procedimiento para el cálculo del límite plástico e índice de plasticidad de suelos, entendiéndose como límite plástico al porcentaje de agua más

	<p>bajo con el cual es posible realizar rollos del material de un diámetro de 3mm, y entendiéndose como índice de plasticidad a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.</p> <p>Característica que solo será posible hallar si el material de estudio presenta una cantidad considerable de finos, incluidos limos y arcillas, que permitan tener la manejabilidad necesaria del material.</p>
INV E – 142 – 13 Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación).	La presenta norma da a conocer diferentes métodos de ensayo empleados para conocer la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos computados en un molde de un tamaño dado, con un martillo, el cual cae desde cierta altura en específico, presentado en sí 4 procedimientos alternativos a emplear.
INV E – 148 – 13 CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.	<p>Está norma describe el procedimiento para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado relación de soporte de california, que es muy conocido debido a su origen por CBR (California Bearing Ratio).</p> <p>Es una prueba de relevancia para la investigación ya que es empleada para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, subbase y base, para empleo en carreteras y pistas de aterrizaje, ya que este cálculo forma parte de varios métodos de diseño de pavimentos.</p>
Plan 51/50, Vías para la paz	Convenio firmado entre la Agencia de Renovación de Territorio y 29 municipios, el cual busca construir 50 Km de vía, en 51 municipios del País, para en total construir mas de 3000 Km de vías terciarias para mejorar la conectividad de los diferentes sectores y economías del País.
PLAN NACIONAL DE DESARROLLO	Da pautas sobre las acciones a tomar del Gobierno Nacional para mejorar el estado

	de las vías terciarias en el territorio Nacional.
INV E – 218 – 13 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½ “) por medio de la máquina de los ángeles.	Medir la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica conocida y someterlo a acciones que provoquen abrasión, impacto al interior de un tambor de acero rotatorio el cual contiene un número determinado de esferas metálicas. Tras un número específico de revoluciones, se retira el contenido del tambor y se tamiza la porción de agregado para medir la degradación, como un porcentaje de pérdida.
INV E – 220 – 13 Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio.	Consiste en la determinación de la resistencia de los agregados pétreos cuando deben soportar la intemperie en concretos y otras aplicaciones, es decir, simular la expansión del agua por congelamiento al interior de los poros del agregado.
INV E – 613 – 13 Preparación y curado de probetas de Suelo-Cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio.	Cubre el procedimiento para moldear y curar en el laboratorio probetas de suelo-cemento, bajo un control exacto de las cantidades de materiales y de las condiciones de ensayo.
INV E – 614 – 13 Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento.	Mediante el uso del equipo de compactación y de un molde de 71.1 mm de diámetro y 142.2 mm de altura (método B), se determina la resistencia a la compresión

5.4. MARCO CONCEPTUAL

5.4.1. SUELO.

Badillo y Rodríguez (2012) en su libro *Mecánica de suelos*, dan una definición todo lo que abarca al “suelo” y algunas de sus principales propiedades:

Es común creencia la de que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización. Pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían “vectorialmente”. En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y éste es un hecho del que se hace abundante aplicación... la palabra Suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta las areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. (p. 34)

También puede ser considerado como un sistema de partículas las cuales no están unidas tan fuertemente como los cristales de un metal, por lo tanto, pueden moverse con cierta libertad unas respecto a otras, pero son sólidas, por esto no pueden moverse con tanta facilidad como los elementos de un fluido (Lambe, 2008).

5.4.2. LIMITES DE A. ATTERBERG

Se trata de una serie de límites, que permiten caracterizar el comportamiento de los suelos finos, siendo estos límites, el límite líquido, límite plástico e índice de contracción.

Límite Líquido: Contenido de agua con el cual se cierra la ranura de (12.7 mm) mediante 25 golpes.

Límite plástico: Contenido de agua con el cual se agrieta al formarse un rollito de (3.13 mm) de diámetro.

Límite de contracción: Contenido de agua con el cual el suelo no sufre ningún cambio adicional de volumen con la pérdida de agua.

(Braja, 2012, p. 16).

5.4.3. ÍNDICE DE PLASTICIDAD

El Índice de Plasticidad (IP) es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y débil. Generalmente la cal reacciona con suelos plástico que tengan un IP entre 10 a 50, reduciendo así significativamente el IP, creando de esta manera un nuevo material con resistencia estructural. Suelos con IP menores a 10, usualmente, no reaccionan tan fácilmente con la cal.

El IP se mide por dos pruebas simples en la mecánica de suelo: el límite líquido y el límite plástico; la diferencia entre los dos es el Índice de Plasticidad.

5.4.4. RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR POR SUS SIGLAS EN INGLÉS)

Es un índice de resistencia del suelo, el cual está limitado a partículas no mayores de 19 mm (3/4") el cual se utiliza para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, subbase y base, incluyendo materiales reciclados para pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje. (Instituto Nacional de Vías [INV], 2007, p.2)

Éste índice forma parte importante de varios métodos de diseño de pavimentos; se mide como un porcentaje respecto a los resultados obtenidos con una muestra patrón bien gradada y dependiendo su uso y el tipo de capa para el cual sea el material se solicitan diferentes porcentajes, desde 80 o 90% hasta el 95% en casos más exigentes.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN Y TIPO DE ESTUDIO

Se trata de una investigación de tipo experimental y descriptiva; se plantean ciertos ensayos y experimentos, que se efectuarán sobre el tema de estabilización química del suelo extraído de la Cantera de Combia, por medio de la adicción de un material adicional a dicho material pétreo, en este caso en específico, cemento, en pequeños porcentajes, diferentes entre sí, para así analizar su comportamiento mecánico.

6.1.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La estrategia por adoptar para responder al problema de la estabilización química del material se realiza mediante una investigación experimental, en donde se someterá muestras representativas del material de la Cantera de Combia, objeto de estudio, a determinadas condiciones o pruebas, para de esa forma observar los efectos que se producen. A continuación, se presentan las variables independientes y dependientes a evaluar:

Variables independientes:

- Porcentaje de cemento

Variables intervinientes

- Desgaste en la máquina de los Ángeles
- Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos
- Límite líquido
- Índice de plasticidad
- Granulometría
- Contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezcla de suelo.

Variables dependientes

- Compresión inconfiada en muestras del material.
- Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento.
- Relación de soporte de california del suelo.

6.2. MATRIZ DE DISEÑO METODOLÓGICO

Tabla 2. Matriz de diseño metodológico.

Fuente: Propia

<i>Objetivo general</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>Actividades</i>	<i>Técnica empleada</i>	<i>Instrumento</i>	<i>Producto esperado</i>
<i>Realizar la estabilización química del material de la cantera de Combia, ubicada en el corregimiento de Combia,</i>	Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del material de la cantera de Combia, ubicada en el corregimiento de	Toma de muestras de material.	Cuarteo y extracción de muestra representativa	Bitácora y registro de cantidades de muestras.	Documento técnico.
		Ensayos de laboratorio	Protocolos estandarizados por INVIAS.	Elementos de laboratorios determinados en las normas INVIAS	Base de datos de parámetros físicos, químicos o mecánicos de los agregados pétreos de la Cantera de Combia.

<i>Pereira</i> <i>Risaralda.</i>	– Combia, Pereira – Risaralda.	Interpretaci ón y análisis de resultados	Tratamiento estadístico de datos	Base de datos de los resultados de ensayos de laboratorio realizados.	Documento técnico con la interpretación en base a la información obtenida.
	Definir el protocolo de adición de cemento como mejorador de la condición de resistencia.	Preparar y curar probetas de suelo- cemento para pruebas de compresión en el laboratorio.	Protocolos establecidos por I.N.V E – 613 – 13.	Moldes para probetas de prueba de compresión, tamices, balanzas, horno, aparato para ensayo de compresión y máquina de	3 cilindros por cada porcentaje a evaluar, siendo estos el, 4%, 5%, 6%, 7% y 8% más un blanco, para un total de 18 cilindros.

				compactación por impacto.	
	Establecer porcentaje de cemento, de mayor eficiencia para el aumento de la resistencia del material objeto de estudio.	Compresión Inconfinada .	INV E – 614 – 13 Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento.	Balanzas, horno (Capaz de mantener una temperatura de 110° +/- 5° C), prensa, moldes, martillos de compactación, etc.	Base de datos de los parámetros analizados en los ensayos.
		Interpretación y análisis de resultados.	Tratamiento estadístico de datos.	Base de datos de los parámetros analizados en los ensayos.	Documento técnico con la interpretación en base a la información obtenida.

6.3. FASES Y RESULTADOS

6.3.1. FASES DE LA INVESTIGACION

FASE 1: TOMA DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS

Se realizará un cuarteo de una muestra extraída de la cantera de Combia, ubicada en el corregimiento de Combia, Pereira - Risaralda, con el objetivo de obtener muestras representativas de material de dicha fuente, para proceder a realizar los ensayos correspondientes.

FASE 2: LABORATORIO: CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

La fase de laboratorio se basa en el Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras, del Instituto Nacional de INVIAS, el cual presenta de forma estandarizada los procedimientos de ensayo en los laboratorios que realizan pruebas para los proyectos a cargo del instituto nacional de vías sobre la infraestructura carretera nacional.

El capítulo 3 – AFIRMADOS SUBBASES Y BASES, Art. 311, presenta las características físico-mecánicas que debe cumplir el material clasificado como afirmado. La caracterización del afirmado incluye, desgaste en la máquina de los Ángeles INV E 218 – 13, para verificar la dureza del material, Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos INV E 220 – 13 para evaluar la durabilidad, límites de comportamiento del suelo, también conocidos como límites de Atterberg, INV E-125-13, E-126-16 , CBR INV E 148 – 13 para definir la resistencia del

material y por último la granulometría INV E – 123 – 13, para evaluar la gradación del material.

FASE 3: FASE DE ESTABILIZACIÓN

Se realizan 3 cilindros para cada porcentaje de cemento dentro de la muestra, siendo los porcentajes por evaluar 4%, 5%, 6%, 7% y 8% más un blanco, para un total de 18 cilindros de suelo-cemento.

Para la elaboración de los cilindros de suelo cemento, se lleva a cabo la norma INV E – 613 – 13 Preparación y curado de probetas de Suelo-Cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio y para la resistencia a la compresión.

FASE 4: FASE DE DISEÑO

Se establece el porcentaje de cemento de mayor eficiencia para el aumento de la resistencia del material objeto de estudio, mediante la implementación del ensayo INV E – 614 – 13 de resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento.

7. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se va a detallar el método, los resultados y una breve observación de la información obtenida con respecto a los objetivos específicos determinados para la presente investigación.

7.1. Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos.

En este apartado se presentan los resultados de los ensayos realizados al material de la Cantera de Combia, correspondientes a los parámetros necesarios para caracterizar el material y determinar sus características físicas y mecánicas.

Las especificaciones de calidad establecidas para el material de afirmado se encuentran especificadas en El Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, capítulo 3, artículo 311, Tabla 311-1 (Requisitos de los agregados para afirmados) del Instituto Nacional de Vías, estos parámetros se toman como referencia en este documento para determinar si el material se encuentra dentro de especificaciones de calidad.

Tabla 3. Resultados de ensayos de caracterización física del material.

Fuente: Propia

RESULTADOS DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MATERIAL		
Ensayo	Unidad	Resultado
Límite líquido INV E 125 - 13	LL (%)	38.16
Límite plástico e Índice de plasticidad. INV E 126 - 13	LP (%)	22.22
	IP (%)	15.94
Granulometría INV E 123 - 13	% Pasa #4	46.36
	% Pasa # 10	25.85
	% Pasa # 40	10.34
	% Pasa # 200	5.1
	Cu	6.72
	Cc	0.95
Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos. INV E 220 - 13	% Pérdida	35.54
Desgaste en la maquina de los Ángeles. INV E 218 - 13	% Pérdida	24.08
Clasificación sistema SUCS		GP-GC (Graba arcillosa mal gradada)

INV E 125-13 Limite Liquido

Para la determinación de esta característica, la norma presenta dos métodos, para efectos de esta investigación, se utiliza el método A, el cual consiste en un ensayo de varios puntos.

De acuerdo con El Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, capítulo 3, artículo 311, Tabla 311-3 (Requisitos de los agregados para afirmados) del Instituto Nacional de Vías, el límite líquido debe presentar un porcentaje de humedad máximo de 40 %, lo cual quiere decir que el material cumple con esta característica, ya que el porcentaje de humedad obtenido fue de 38.16%.

INV E 126-13 Límite Plástico e Índice de Plasticidad

Para la determinación de esta característica se usa el mismo material preparado para la determinación del límite líquido, de manera que se determina la humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de 3.2 mm de diámetro aproximadamente. El valor obtenido en este ensayo fue de 22.22 %, y debido a que el índice de plasticidad es la diferencia entre el Límite líquido y el límite plástico, se tiene un índice de plasticidad de 15.94%, lo cual según El Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, capítulo 3, artículo 311, Tabla 311-3 (Requisitos de los agregados para afirmados) del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), se encuentra fuera de especificación, ya que el requisito de calidad para afirmados, debe encontrarse en un rango de 4% a 9 %.

INV E 123-13 Granulometría

Mediante la realización de este ensayo, se obtiene información acerca del comportamiento del suelo. Para determinar numéricamente la gradación del suelo se emplea el coeficiente de

curvatura (C_c) y el coeficiente de uniformidad (C_u), que como su nombre lo indica, evalúa la uniformidad del tamaño de las partículas del suelo.

Para que el material se considere no uniforme y bien graduado se debe cumplir ($3 > C_c > 1$) y ($C_u > 4$), donde los criterios de cálculo son

- D10: Abertura del tamiz por el que pasa el 10% de la muestra.
- D30: Abertura del tamiz por el que pasa el 30% de la muestra.
- D60: Abertura del tamiz por el que pasa el 60% de la muestra.

Según el Coeficiente de Uniformidad (C_u), el material de afirmado de la Cantera de Combia, arrojó un valor de 6.72, valor que es mayor de 4, por lo tanto es un suelo no uniforme, lo cual es positivo para el propósito de esta investigación, donde lo que se quiere lograr es la mayor compactación posible del material, y lo anterior se logra principalmente con una adecuada variación de tamaños que rellenen adecuadamente los huecos, es decir un suelo no uniforme. Respecto al análisis del coeficiente de curvatura, se obtiene un valor de 0.95, valor que se sale del rango establecido para materiales bien graduados.

El Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, capítulo 3, artículo 311, Tabla 311-3 (Requisitos de los agregados para afirmados) del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), establece una serie de relaciones que debe cumplir el material de afirmado para satisfacer los requisitos de calidad.

A continuación, se presentan las relaciones obtenidas en el material de estudio, donde se evidencia que cumple parcialmente con esta característica, ya que cumple dos, de las tres relaciones establecidas.

Tabla 4. Relaciones que debe cumplir el material de afirmado.

Fuente: Propia

RELACION	REQUISITO	OBSERVACIÓN
$\frac{5.1 \%}{25.85 \%} = 0.20$	0.20 a 0.45	Cumple
$\frac{5.1 \%}{10.34 \%} = 0.50$	$< o = \frac{2}{3}$	Cumple
(83.73 % - 25.85 %) x (46.46%)	16 a 34	No cumple

INV E 220 -13 Perdida en ensayos de solidez en sulfatos

Una vez realizado el ensayo, el cual simula la resistencia de los agregados pétreos a la intemperie o a la acción de agetes atmosféricos, se obtiene que el porcentaje de perdida de material fue de 35.45%, y la especificación para este material según Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, capitulo 3, articulo 311, Tabla 311-1 (Requisitos de los agregados para afirmados) del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) es de máximo 18% de pérdida, por lo tanto el material no cumple con esta característica.

INV E 218 -13 Desgaste en la máquina de los Ángeles.

El material de afirmado a ensayar cumple con los requisitos mínimos admitidos de porcentaje de pérdidas (24.08 %), ya que, de acuerdo con el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, capítulo 3, Tabla 311-1 (Requisitos de los agregados para afirmados) del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), se admite un porcentaje de pérdida de máximo 50%.

Clasificación del suelo según sistema SUCS

Una vez realizados los ensayos especificados con anterioridad, comenzando por la granulometría del material se pudo determinar por medio el método de clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), que es un material grueso compuesto por grava, el cual a su vez se determina como pobremente gradado, lo cual nos indica que no hay una distribución satisfactoria entre las cantidades de los diferentes tamaños del material, presentando un porcentaje considerable de material de tamaño superior a $1\frac{1}{2}$ ". A su vez, nos permite identificar que tiene una cantidad de material fino de entre el 5% y el 12%, lo cual lo arroja en una categoría especial en la cual presenta una doble nomenclatura, una determinada por la granulometría ya dicha y el otro por el Límite Líquido y el Índice de Plasticidad, el ensayo de límites de Atterberg permitió determinar el Límite Líquido, junto con un Índice de plasticidad, los cuales se establecieron en 38.16% y 15.44% respectivamente, permitiendo calificar dicho material como una Arcilla de Baja Plasticidad,

cuya nomenclatura se determina como GP-CL (Grava arcillosa pobremente gradada de baja plastocidad).

Tabla 5. Resultados de ensayos mecánicos.

Fuente: Propia

RESULTADOS DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL MATERIAL		
Ensayo	Unidad	Resultado
CBR de laboratorio INV E 148 - 13	%a 10 golpes	14
	%a 25 golpes	15.1
	% a 56 golpes	26.4
Proctor modificado INV E 142 - 13	Máxima densidad seca (g/cm ³)	1.91
	Humedad óptica (%)	15.3

INV E 148-13 CBR de laboratorio.

Mediante la realización de este ensayo, se determinó el índice de resistencia del material, es decir, la resistencia potencial de este.

El resultado se encontró dentro de especificación respecto a los requisitos de calidad establecidos por el INVIAS para afirmados, ya que la exigencia es un porcentaje mayor o igual a 15% y para el material se obtienen valores de 15.1% y 26.4%, para 25 y 56 golpes respectivamente.

Para efectos de esta investigación, se determina la relación de soporte con el contenido óptimo de humedad, determinado previamente en el ensayo de Proctor modificado INV E-142.

INV E 142-13 Proctor Modificado.

Mediante la implementación de este ensayo se determinó la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos, quedando de esta manera establecido el contenido de humedad óptimo, es decir, el porcentaje de humedad en el cual se genera la mayor compactación del material, que para este caso fue de 15.3%. El ensayo de CBR y la elaboración de cilindros de suelo-cemento se realizan con el porcentaje de humedad óptimo.

7.2. Definir el protocolo de adición de cemento como mejorador de la condición de resistencia.

FASE DE DOSIFICACIÓN

Los porcentajes de adición de cemento se realizan con base en estudios previos de estabilización química de suelos con cemento, en los cuales se recomiendan dosis mínimas de entre 2.5% y 3.0 %, y dosis optimas entre 5% y 6%, por lo tanto, se realizan ensayos con mezclas de suelo cemento de 4%, 5%, 6%, 7%, 8% y un blanco. Para cada porcentaje más el blanco se realizan 3 probetas, para un total de 18 probetas.

FASE DE PREPARACION DE PROBETAS DE SUELO-CEMENTO

Para evaluar el comportamiento mecánico del material una vez estabilizado químicamente con cemento, se realizan ensayos de resistencia a la compresión en cilindros de suelo-cemento con los porcentajes de cemento anteriormente mencionados. La preparación y curado de las probetas de suelo-cemento, se realizan con base en la norma **INV E 613-13** **Preparación y curado de probetas de suelo-cemento para pruebas de compresión en el laboratorio**, la cual establece el procedimiento para moldear y curar en el laboratorio probetas de suelo cemento, de acuerdo al método B de la norma INV E-614.

La preparación de las probetas se realiza sobre moldes de forma cilíndrica, con diámetro interior de 71 ± 0.25 mm y una altura de 229 mm, para moldear especímenes de 71 mm de diámetro y 142 mm de altura.

Se mezcla el cemento y el suelo en los porcentajes establecidos (4%, 5%, 6%, 7% y 8%), hasta lograr una mezcla uniforme, posteriormente se adiciona agua, de manera que la mezcla quede con un porcentaje de humedad de 15.30 %, siendo este último el porcentaje óptimo de humedad determinado en el ensayo de Proctor modificado (INV E 142-13). Para efectos del material de estudio, el peso de mezcla (suelo-cemento) a tomar de manera que la relación entre el diámetro y la altura de la probeta sea 1 a 2, es de aproximadamente 1100 g.

La mezcla preparada, se adiciona en el molde distribuida en tres capas. Cada capa se compacta con el martillo utilizado en el ensayo de Proctor modificado y se realizan 25 golpes por capa repitiendo el movimiento en varios puntos de la sección transversal del cilindro.

Posteriormente se remueve el cilindro de suelo-cemento del molde con una prensa de extracción.

FASE DE CURADO DE PROBETAS DE SUELO-CEMENTO.

El curado de las probetas se realiza según criterios de diseño para las mezclas de suelo-cemento establecidas en el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, capítulo 3, artículo 350, Tabla 350-5 (Criterios de diseño para la mezcla de suelo-cemento) del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) un curado de 7 días, sin embargo, para efectos de esta investigación, se realiza el curado durante 28 días.

7.3. Establecer porcentaje de cemento, de mayor eficiencia para el aumento de la resistencia del material objeto de estudio.

INV E 614-13 Resistencia a la compresión inconfiada de cilindros moldeados de suelo-cemento.

Mediante la realización de este ensayo, se determina la resistencia a la compresión del suelo-cemento, empleando cilindros moldeados como especímenes de ensayo.

La norma presenta dos procedimientos alternativos para realizar el ensayo, siendo el método B el realizado en la presente investigación.

Debido a errores aleatorios o no controlables que se pudieran presentar en el ensayo, algunos cilindros presentaron valores de resistencia a la compresión con variaciones muy considerables respecto a los demás cilindros con el mismo porcentaje (3 probetas de suelo-cemento por porcentaje) por lo cual se procede con la eliminación de los valores atípicos y se realizan los cálculos con 2 cilindros por porcentaje.

A continuación, se presenta tabla de resultados de esfuerzo máximo alcanzado por cada porcentaje.

Tabla 6. Resultado de esfuerzo máximo promedio por porcentaje en probetas de suelo-cemento.

Fuente: Propia

% de cemento	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Esfuerzo promedio (kPa)
	Esfuerzo máximo soportado (kPa)			
0	542,75	518,88	 	530,81
4	1610,22	1578,17	 	1594,20
5	2625,61	 	2157,16	2391,39
6	 	3069,29	2300,44	2684,86
7	 	2829,31	2516,16	2672,74
8	 	1837,01	2536,05	2186,53

Con los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión inconfiada, se realiza línea de tendencia para relacionar la variable independiente (% de cemento) con la variable dependiente (Esfuerzo máximo), dicha línea de tendencia es de tipo polinómica de segundo

grado, con un coeficiente de correlación de Pearson (R^2) de 0.9975, indicando este valor una correlación alta.

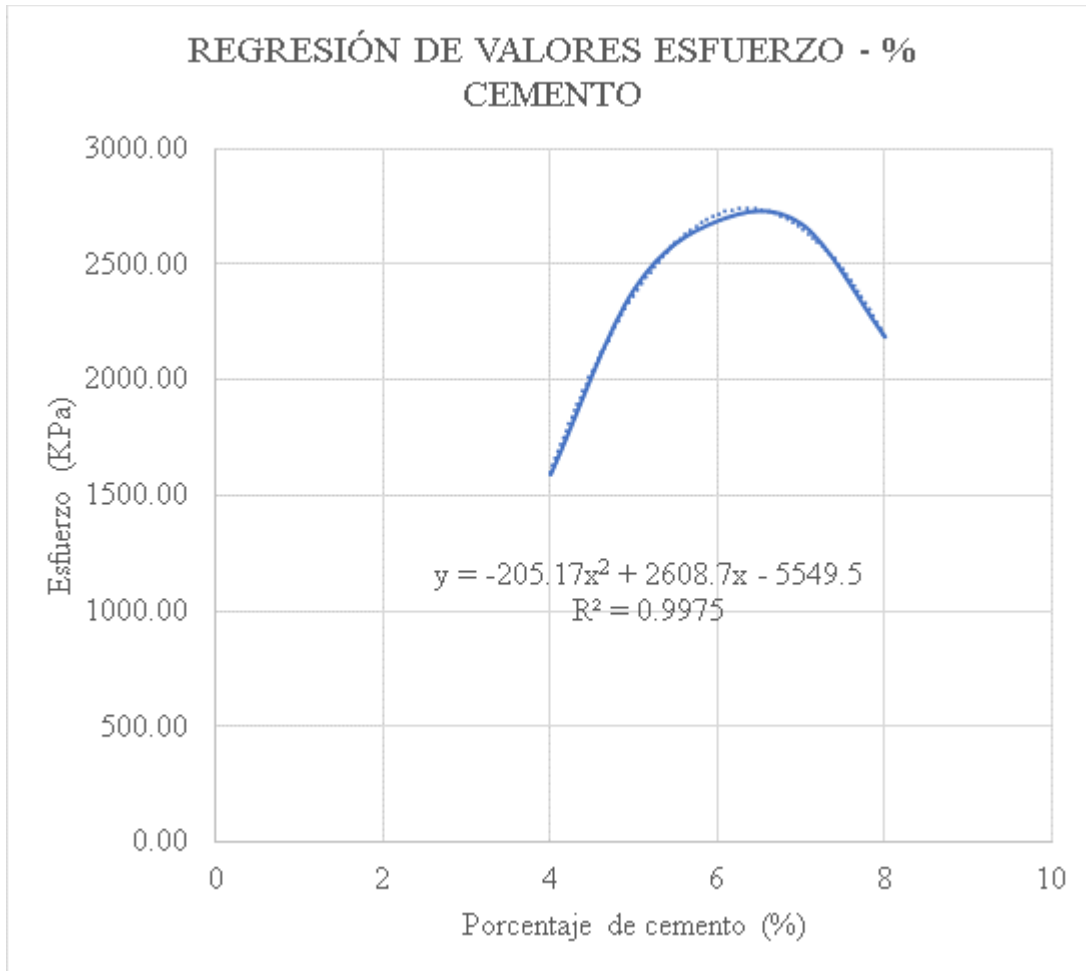


Ilustración 1. Regresión polinómica de valores de esfuerzo máximo vs porcentaje de cemento.

Fuente: Propia.

Una vez obtenida la línea de tendencia, se realiza carta de correlación entre el porcentaje de cemento y el esfuerzo máximo alcanzado para determinar el porcentaje de cemento para el

cual el material obtuvo un mayor aumento de resistencia. Se encuentra entonces que, según la ecuación de la línea de tendencia, el porcentaje de cemento optimo es 6.4%.

Tabla 7. Carta de correlación tipo polinómica entre el porcentaje de cemento y el esfuerzo máximo.

Fuente: Propia

% de cementante	Esfuerzo soportado	% de cemento	Esfuerzo soportado
4.1	1697.26	6.1	2729.19
4.2	1787.84	6.2	2737.71
4.3	1874.32	6.3	2742.11
4.4	1956.69	6.4	2742.42
4.5	2034.96	6.5	2738.62
4.6	2109.12	6.6	2730.71
4.7	2179.18	6.7	2718.71
4.8	2245.14	6.8	2702.60
4.9	2307.00	6.9	2682.39
5	2364.75	7	2658.07
5.1	2418.40	7.1	2629.65
5.2	2467.94	7.2	2597.13
5.3	2513.38	7.3	2560.50
5.4	2554.72	7.4	2519.77
5.5	2591.96	7.5	2474.94
5.6	2625.09	7.6	2426.00
5.7	2654.12	7.7	2372.96
5.8	2679.04	7.8	2315.82
5.9	2699.86	7.9	2254.57
6	2716.58	8	2189.22

Máximo:	2742.42
---------	---------

8. CONCLUSIONES

Según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el material de afirmado de la Cantera de Combia es un caso fronterero, es decir, un suelo grueso con contenido de finos comprendido entre 5% y 12%, tratándose por lo tanto de una grava arcillosa pobremente gradada.

El análisis de distribución de tamaños de partículas indica según el coeficiente de curvatura que es una grava mal gradada (GP), sin embargo, el coeficiente de uniformidad indica que el material es no uniforme, lo cual es favorable al momento de conseguir una óptima compactación con disminución de vacíos.

Respecto a la dureza del material, determinada a través del ensayo de resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los ángeles, se obtuvo un resultado positivo según requerimientos del INVIAS, por el contrario la durabilidad del material, determinado por las pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, se encuentra por debajo del límite inferior establecido por el INVIAS, sin embargo esta característica está relacionada a la resistencia de los agregados a situaciones de hielo y deshielo provocadas por el clima, entonces se puede deducir que el clima de la zona no afecta en gran medida a los agregados que componen el material de afirmado, ya que no se dan esas variaciones drásticas de temperatura.

La caracterización mecánica del material permitió constatar mediante el ensayo de Proctor modificado, la humedad que relaciona la densidad seca más alta, es decir, la humedad con la cual se obtiene la máxima compactación del material, siendo este porcentaje de humedad 15.3%. El porcentaje de humedad hallado en el Proctor modificado fue usado para la realización del ensayo de CBR y para la elaboración de las probetas de suelo-cemento. La resistencia del material, determinada mediante el ensayo de CBR, permitió establecer que el afirmado de la Cantera de Combia, cumple con los requerimientos del INVIAS, ya que los resultados obtenidos a los 25 y 56 golpes son mayores de 15%. Además de encontrarse dentro de especificación para los requerimientos del INVIAS, esto representa una característica positiva en el material para su uso como capa de rodadura en vías terciarias.

Para la determinación del porcentaje de cemento de mayor eficiencia, mediante la realización de ensayos de resistencia a la compresión inconfiada de cilindros moldeados de suelo-cemento, se concluye que el porcentaje óptimo, oscila entre 6% y 7% debido a que hasta esta proporción de cemento la resistencia del material va en ascenso, después de 7%, se evidencia un descenso en la resistencia, lo cual puede obedecer a una mayor demanda de agua por parte de la mezcla de suelo-cemento, por incremento de este último.

Por medio de una regresión lineal, con un coeficiente de correlación de Pearson (R^2) igual a 0.9975, que brinda alto nivel de confianza, se determinó que el porcentaje óptimo de cemento es de 6.4%.

Respecto al proyecto de grado *“Determinación de los parámetros mecánicos en afirmados estabilizados con cemento para uso en cimentaciones extraídos de la cantera de Combia en la ciudad de Pereira Risaralda”* el cual se convirtió en un antecedente de peso para efectos de esta investigación debido a que se trata del mismo material, se tiene que el porcentaje óptimo de cemento osciló entre 5% y 6%, ya que según Amariles (2015) *“hasta esta proporción de cemento, la resistencia aumenta considerablemente, al agregar una mayor cuantía de cemento la resistencia tiende a ser constante y no aumento de forma considerable”* (p 103) y el porcentaje óptimo de cemento determinado en esta investigación fue de 6.4 %, valor que guarda una alta concordancia con la investigación de Amariles.

9. RECOMENDACIONES

El material de afirmado de la cantera de Combia, presenta un porcentaje en peso de finos de entre 5% y 12%, clasificándose dichos finos de acuerdo a los límites de Atterberg como arcillas de baja plasticidad, por lo tanto se recomienda para un futuro proyecto de investigación la estabilización química de este afirmado usando como aditivo Cal, ya que según se especificó en el marco de antecedentes, la cal es especialmente usada como aditivo químico en arcillas, pues se logran resultados como el incremento de la capacidad portante del suelo y el aumento de la resistencia a compresión.

De acuerdo con la norma **INV E 614-13 Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento**, se especifica que al final del periodo de curado húmedo, los especímenes se deben sumergir en agua por 4 horas, para posteriormente efectuar el ensayo a la compresión, sin embargo, para efectos del material de afirmado de la cantera de Combia, no se recomienda este paso, debido a que los cilindros se desintegran por la acción del agua.

Una vez establecido el porcentaje de cemento de mayor eficiencia para el aumento de la resistencia del material, se recomienda realizar ensayo de CBR, de manera que se convierta en una característica adicional y de respaldo para evidenciar la mejora en la resistencia del material.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agudelo, K. (2018). Tiendas de café y vías terciarias, los retos en 2018. Pueblo Rico, Colombia: Alcaldía Municipal de Pueblo Rico en Risaralda. Recuperado de www.pueblorico-risaralda.gov.co/

Amariles, C. (2015). *Determinación de los parámetros mecánicos en afirmados estabilizados con cemento para uso en cimentaciones, extraídos de la cantera de Combia en la ciudad de Pereira Risaralda.* (proyecto de pregrado). Universidad Libre, Pereira, Colombia.

ANFACAL. (2015). *Manual Práctico para la estabilización de suelos con cal.* México D.F., México: ANFACAL. Recuperado de <http://www.anfacal.org/>

Ávila, A. (2016). La esperanza de las vías terciarias. Colombia: Publicaciones SEMANA S.A. Recuperado de <https://www.semana.com/>

Badillo, E. J. y Rodríguez A. R. (2012). *Mecánica de Suelos, 1.* México D.F., México: Limusa.

Berry, P. L. y Reid, D. (1998) *Mecánica de suelos.* Reino Unido: McGraw-Hill Companies.

Braja, M. Das. (2012) *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Ciudad de México, México, Cengage Learning.

De Solminihaç, H., Echeverría G. y Thenoux G. (1989). Estabilización química de suelos: aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. *Ingeniería de Construcción*, (6), 53-78.

Escobar, C., León, J y Salazar, V. (2016). *Bloques de tierra comprimida con adición de residuos de concreto y cemento como solución sostenible para la construcción de muros no estructurales*. (proyecto de pregrado). Universidad Libre, Pereira, Colombia.

Flórez, C. H. Zarate, R. Caicedo, Z. K. y Contreras, B. A. (2008) Estabilización química de suelos expansivos de san José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes. *Respuestas*. 13(2). 27-28. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/>

Higuera, C. H., Gómez J. C. y Pardo, O. E. (2012). Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio, *Revista Facultad de Ingeniería*, 21(32), 21-40. Recuperado de <http://www.uptc.edu.co/>

Huezo, H. M. y Orellana, A. C. (2009). Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el salvador. San Salvador, El Salvador: Universidad de el salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/>

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012). *Manual de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>

Jofre, C. y Kraemer, C. (2003). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Madrid, España: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Recuperado de <http://www.anter.es/>

Lambe, T. W. y Whitman, R. V. (2008). *Mecánica de Suelos*. México D.F., México: Limusa.

Pérez, R. C. (2012). *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o subbase de pavimentos* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Sampedro, A. (2005). *Tratamientos de suelos con cal*. Madrid, España: Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España.

Santos, J. M. (2015) Bases del Plan Nacional de Desarrollo. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura. Recuperado de <https://www.minagricultura.gov.co/>

Sowers, G. B. y Sowers G. F. (1972). Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones. México D.F., México: Limusa-Wiley.

(2017). Solo 25 por ciento de vías terciarias del país están en buen estado. Colombia: Periódico El Tiempo. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/>