



Universidad **Mariana**

Análisis comparativo del incremento de la resistencia entre mezclas de suelo estabilizado con cal
y cemento para una subrasante

Autores:

Angela Sofia Villarreal Adrada

Cristian Danilo De La Cruz Taticuan

Mariem Julieth Zamudio Posso

Walter Yesid Buritica Erazo

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
San Juan de Pasto

2024

Análisis comparativo del incremento de la resistencia entre mezclas de suelo estabilizado con cal y cemento para una subrasante.

Autores:

Angela Sofia Villarreal Adrada
Cristian Danilo De La Cruz Taticuan
Mariem Julieth Zamudio Posso
Walter Yesid Buritica Erazo

Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Civil

Mag. Ing. Gerardo Andrés Dorado Jurado
Asesor

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
San Juan de Pasto
2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

Contenido

Introducción	13
1. Resumen del proyecto	14
1.1. Descripción del problema.....	14
1.1.1. Formulación del problema	14
1.2. Justificación.....	14
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivos específicos.....	15
1.4. Marco referencial	16
1.4.1. Antecedentes	16
1.5. Metodología	18
1.5.1. Primer objetivo.....	19
1.5.2. Segundo objetivo.....	25
1.5.3. Tercer objetivo	36
1.5.4. Descripción de la investigación.....	37
2. Presentación de resultados	38
2.1. Objetivo 1: Un suelo apropiado de la ciudad de pasto para estabilización de una subrasante con cal y cemento.....	38
2.1.1. Ensayo de granulometría por tamizado	38
2.1.2. Límites de Atterberg.....	40
2.1.3. Equivalente de arena	42
2.1.4. Análisis de resultados del primer objetivo	43
2.2. Objetivo 2: Obtener el diseño de mezcla con los porcentajes de cal y cemento óptimos para la subrasante	43

2.2.1. Ensayo humedad-densidad de suelo.....	43
2.2.2. Ensayo humedad-densidad de mezcla de suelo- cemento.....	44
2.2.3. Ensayo humedad-densidad de mezcla de suelo- cal.....	45
2.2.4. Ensayo de resistencia a la compresión cal	47
2.2.5. Ensayo de resistencia a la compresión cemento.....	48
2.3. Objetivo 3: Construir las gráficas de resistencia a compresión y resistencia CBR en una subrasante estabilizada con cemento y una subrasante estabilizada con cal.....	49
2.3.1. Gráficas de resistencia a compresión	49
2.3.2. Gráficas de resistencia CBR.....	51
3. Conclusiones	53
4. Recomendaciones.....	55
Referencias bibliográficas	56

Índice de tablas

Tabla 1. Datos granulometría por tamizado.	39
Tabla 2. Límite líquido.	40
Tabla 3. Límite plástico.	41
Tabla 4. Equivalente de arena.....	42
Tabla 5. Resumen objetivo 1.	43
Tabla 6. Proctor cal.....	46
Tabla 7. Ensayo de resistencia a la compresión cal.....	47
Tabla 8. Ensayo de resistencia a la compresión cemento.....	48
Tabla 9. Resumen objetivo 2.	49
Tabla 10. Ensayo resistencia a la compresión del suelo, cal y cemento en tiempo de curado ..	50
Tabla 11. Ensayo de resistencia CBR del suelo, cal y cemento en un tiempo de curado.....	51

Índice de Figuras

Figura 1. Decisión para la selección de estabilizadores para subrasante.....25

Índice de gráficas

Gráfica 1. Curva granulométrica.	39
Gráfica 2. Límite líquido.	41
Gráfica 3. Ensayo humedad-peso específico suelo.	44
Gráfica 4. Ensayo humedad- densidad suelo- cemento 7%.....	45
Gráfica 5. Resumen ensayos Proctor mezcla suelo-cal, variando % de cal.	46
Gráfica 6. Resistencia en función del contenido de cal.....	47
Gráfica 7. Resistencia en función del contenido de cemento.	48
Gráfica 8. Evolución resistencia a la compresión en el tiempo de curado.	50
Gráfica 9. Evolución resistencia CBR en el tiempo de curado	52

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Ensayo de granulometría	21
Ilustración 2. Ensayo límites de Atterberg (límite líquido)	23
Ilustración 3. Ensayo límites de Atterberg (límite plástico).....	23
Ilustración 4. Mezcla suelo-cal para ensayo de compactación.....	26
Ilustración 5. Curado de probetas en horno a 20°C.....	32
Ilustración 6. Ensayos de compactación.....	33
Ilustración 7. Ensayo de resistencia a la compresión	33
Ilustración 8. Ensayo de resistencia al corte CBR.....	36

Lista de siglas

CBR: California Bearing Ratio (Índice de Soporte California).

MR: Módulo de Resiliencia.

UCS: Unconfined Compressive Strength (Resistencia a la Compresión no Confinada).

PI: Plasticity Index (Índice de Plasticidad).

LL: Liquid Limit (Límite Líquido).

PL: Plastic Limit (Límite Plástico).

INVIAS: Instituto Nacional de Vías

S.U.C.S: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (en inglés, Unified Soil Classification System)

AASHTO: Asociación Americana de funcionarios de Carreteras y Transporte (American Association of State Highway and Transportation Officials, en inglés).

Glosario

Aditivos: Sustancias añadidas a una mezcla para mejorar o modificar sus propiedades.

Análisis comparativo: Evaluación de diferencias y similitudes entre dos o más elementos para identificar ventajas, desventajas o patrones.

Cal: Producto utilizado como estabilizante en suelos para mejorar su capacidad de soporte y resistencia.

Capacidad de soporte: Capacidad de un suelo o material para soportar una carga sin fallar.

Cargas: Fuerzas aplicadas a una estructura o material que generan tensiones y deformaciones.

Cemento: Material aglomerante que, al combinarse con suelo, forma una mezcla más resistente y duradera.

Esfuerzos: Fuerzas aplicadas a un material que pueden causar deformación o fractura.

Estabilizante: Sustancia utilizada para mejorar las propiedades de un suelo, como la capacidad de soporte y la resistencia.

Incremento de resistencia: Aumento en la capacidad de un material para resistir esfuerzos después de ser tratado con estabilizantes como cal o cemento.

Mezclas de suelo estabilizado: Combinaciones de suelo con aditivos (en este caso, cal o cemento) para mejorar sus propiedades mecánicas.

Resistencia: Capacidad de un material para soportar cargas o fuerzas sin deformarse o romperse.

Subrasante: Capa de suelo natural o compactado sobre la cual se construye la base de una carretera u otra infraestructura.

Resumen

El presente trabajo de grado se realiza con el propósito de evaluar la influencia de aditivos químicos como la cal y el cemento para lograr estabilizar un suelo granular para una subrasante mediante el análisis y comparación del incremento de la resistencia entre mezclas de suelo estabilizado con cal y suelo estabilizado con cemento, centrándose en la evolución de la resistencia del suelo con el mejoramiento de la cal en comparación con el cemento a lo largo del tiempo de curado. Durante la investigación se realizan ensayos de laboratorio que permiten conocer la clasificación del suelo, humedad, propiedades mecánicas de suelo, resistencia a la compresión y resistencia CBR, los resultados permiten concluir que la mezcla de suelo para una subrasante estabilizado con cemento obtiene mayor resistencia a la compresión y mayor resistencia CBR en comparación a la mezcla suelo estabilizado con cal independientemente del tiempo de curado.

Palabras clave: Estabilización del suelo, cal, cemento, resistencia, subrasante.

Abstract

This degree work is carried out with the purpose of evaluating the influence of chemical additives such as lime and cement to stabilize a granular soil for a subgrade through the analysis and comparison of the increase in resistance between mixtures of soil stabilized with lime and stabilized with cement, focusing on the evolution of soil resistance with the improvement of lime compared to cement over the curing time. During the research, laboratory tests are carried out that allow us to know the classification of the soil, moisture, mechanical properties of the soil, compression strength and CBR strength. The results allow us to conclude that the soil mixture for a subgrade stabilized with cement obtains greater compression strength and greater CBR strength compared to the lime-stabilized soil mixture regardless of the curing time.

Keywords: Soil stabilization, lime, cement, strength, subgrade.

Introducción

En el campo de Ingeniería Civil, la estabilización de suelos es un proceso fundamental para garantizar la integridad y durabilidad de las estructuras viales. La mejora de las características mecánicas del suelo es esencial para enfrentar los desafíos de tráfico pesado, condiciones climáticas extremas y otros factores ambientales que pueden afectar la estabilidad de las carreteras y vías de comunicación.

La investigación se enfocó en realizar un análisis comparativo del incremento de la resistencia entre mezclas de suelo estabilizado con cal y cemento para una subrasante, con énfasis en un suelo de la ciudad de Pasto. Este estudio se propuso como objetivo general analizar la resistencia a la compresión y la resistencia CBR de una mezcla de suelo estabilizado con cal en comparación con cemento para una subrasante.

Este análisis pretende contribuir al conocimiento en el campo de la Ingeniería Geotécnica y Vial, proporcionando información relevante para la selección y aplicación de técnicas de estabilización de suelos en la construcción y mantenimiento de infraestructuras viales en la ciudad de Pasto y/o áreas con características similares. Los resultados podrán ser utilizados para estudios con el fin de mejorar la eficiencia y la calidad de las obras viales, contribuyendo al desarrollo sostenible de la región.

1. Resumen del proyecto

1.1. Descripción del problema

La propuesta de análisis comparativo del incremento de la resistencia entre mezclas de suelo estabilizado con cal y cemento para una subrasante consiste en realizar una investigación detallada para comparar la eficacia y eficiencia de las mezclas de suelo estabilizado con cal y cemento en la mejora de la resistencia del suelo en la construcción de subrasantes para carreteras y otros proyectos de infraestructura.

En esta propuesta, se llevará a cabo una serie de pruebas y análisis para determinar el impacto de diferentes proporciones de cal y cemento en la resistencia del suelo, así como en la estabilidad y durabilidad a largo plazo de la subrasante construida con estas mezclas. Se considerarán diversos factores, como la composición del suelo, las condiciones climáticas, la humedad y el tráfico vehicular.

Los resultados del análisis comparativo se utilizarán para identificar las proporciones de cal y cemento que proporcionan la máxima resistencia y durabilidad en diferentes situaciones, y para determinar las mejores prácticas en la selección y uso de materiales para la construcción de subrasantes.

1.1.1. Formulación del problema

¿Cómo evoluciona la resistencia del suelo de una subrasante con el mejoramiento de la cal en comparación al cemento en el tiempo?

1.2. Justificación

El trabajo investigativo se centra en el estudio del aumento de la resistencia en mezclas de suelo estabilizado con cal y cemento para mejorar un suelo de subrasante, es importante contribuir al conocimiento dentro de estudios de suelos modificados con estos materiales en la ciudad de Pasto,

permitiendo comprender mejor el comportamiento de ambos aditivos.

Es necesario definir criterios y métodos claros para el diseño de estabilizaciones con el fin de asegurar un rendimiento adecuado de las mezclas, lo que resulta en un diseño óptimo de la estabilización de la subrasante. Lo anteriormente expuesto conduce a la obtención de un mayor incremento en la resistencia y disminución en los costos, es de gran importancia para el desarrollo y proyección regional.

De acuerdo con el estudio realizado en este trabajo de investigación, el proceso de estabilizar en el momento adecuado producirá una disminución en la cantidad de desperdicios que se generan debido al uso inapropiado de la dosificación de aditivos de la mezcla de suelo en terreno para estabilizar ciertos tipos de suelos, generando un ahorro económico y un menor impacto ambiental, lo cual representa un avance significativo para el correcto uso de la cal y el cemento.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar la resistencia a la compresión y resistencia CBR de una mezcla de suelo estabilizado con cal en comparación con cemento para una subrasante.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar un suelo apropiado de la ciudad de Pasto para estabilización de una subrasante con cal y cemento
- Obtener el diseño de mezcla con los porcentajes de cal y cemento óptimos para la subrasante.
- Construir las gráficas de resistencia a compresión y resistencia CBR en una subrasante estabilizada con cemento y una subrasante estabilizada con cal.

1.4. Marco referencial

1.4.1. Antecedentes

En la actualidad, existe una gran cantidad de estudios y publicaciones científicas sobre el uso de mezclas de suelo estabilizado con cal y cemento. Estos estudios se han enfocado en diversos aspectos, como el diseño de mezclas, las propiedades mecánicas y físicas de las mezclas, la evaluación del comportamiento a largo plazo, la influencia de la humedad y la temperatura, entre otros.

Trabajos de investigación internacionales.

Estabilización de suelos cohesivos por medio de cal en las vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí- Rivas. En la Universidad Autónoma de Nicaragua los ingenieros Genaro José Altamirano Navarro y Axell Exequiel Díaz Sandino expusieron, mediante su propuesta de trabajo de grado, estabilizar los suelos cohesivos de las vías en la comunidad San Isidro del Pegón, municipio de Potosí departamento Rivas, con una mezcla de cal hidratada. Para su desarrollo, recolectaron materiales de diferentes puntos de las vías de la comunidad San Isidro del Pegón y determinaron propiedades físico-mecánicas de los suelos, determinaron porcentajes de los materiales estabilizantes que emplearían y una vez con los resultados de las pruebas de laboratorio obtuvieron una mejora en las características de los suelos cohesivos, logrando reducir la susceptibilidad al hinchamiento por cambio de humedades en los suelos cohesivos y haciendo una contribución de manera sistemática al cálculo de la estabilización de suelos cohesivos con cal, mediante un proceso sencillo y confiable que pueda ser empleado fácilmente (Altamirano & Díaz, 2015).

Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del Cantón Tosagua provincia de Manabí. En la Universidad Católica del Ecuador, la ingeniera María Angélica Sánchez Albán en su trabajo de investigación se ha enfocado en estudiar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de la región del sector Calcical del cantón Tosagua, caracterizados como arcilla CH (S.U.C.S.), arcillas de alta plasticidad, con un potencial expansivo alto. El estudio se basa en la adherencia de estabilizadores al suelo, como cal viva y cemento portland puzolánico; para analizar los cambios en el comportamiento de expansión del suelo. Para llevar a cabo el estudio se realizaron ensayos para determinar

las propiedades indicativas del suelo, así como la presión de hinchamiento y la tasa de expansión que presenta. El estudio se basa en la adhesión de un agente estabilizador al suelo, tal es el caso de la cal viva y el cemento portland puzolánico; con el fin de analizar la variación en el comportamiento expansivo del suelo. Para realizar el estudio se realizaron ensayos para determinar las propiedades índices del suelo, así como su presión de hinchamiento y el porcentaje de expansión que este presenta, tanto en estado natural como con la presencia de porcentajes de estabilizante de 3,5 y 7% (Sanchez, 2014).

Guía de estabilización de subrasante. En la Universidad de California en el centro de investigación de pavimentos se generó una guía para determinar y desarrollar prácticas de estabilización de suelos en las carreteras propiedad del Departamento de Transporte de California (kestler, 2009).

La estabilización de la subrasante se considera una alternativa a las estructuras de pavimento más gruesas para abordar las siguientes problemáticas: el grado de la calzada existente debe coincidir cuando se agreguen más carriles, el tiempo de construcción requerido para excavar suelos problemáticos y/o transportar materiales adicionales debe reducirse, estrategia más económica de pavimentación.

La estabilización con cal o cemento son los métodos principales y con especificaciones utilizados en la guía que incluyen otros aditivos cementosos como cenizas volantes y polvo de horno de cemento.

Estabilización de suelos y su aplicación en el mejoramiento de subrasante. En la Universidad Nacional de Ingeniería del Perú, se realizó la investigación la cual tiene como objetivo estudiar el comportamiento de los distintos suelos estabilizados con aditivos químicos, para su aplicación en carreteras, así como sus cambios en las propiedades de capacidad de soporte, durabilidad, compresibilidad, permeabilidad y estabilidad volumétrica a corto y largo plazo, en diferentes condiciones climatológicas, ya que según la investigación son estas cinco características las principales que se deben tener en cuenta durante la realización de una estabilización de suelos.

En la investigación se determinó la mejor condición presente para su aplicación en algunas zonas del Perú, ya que la adecuada utilización de los productos consiste en evaluar las condiciones locales

de obra donde se piensa utilizar y emplear el más conveniente y no en buscar un solo producto que resuelva el problema de "Estabilización de Suelos para Carreteras" en general (Ugaz Palomino, 2006).

Trabajos de investigación nacionales.

Estabilización de suelos con cal como una alternativa viable para la construcción y rehabilitación de caminos rurales en Colombia. En la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, la Ing. Angie Lorena García Restrepo realizó su trabajo de grado con la finalidad de estudiar las ventajas técnicas, económicas, ambientales y sociales que trae consigo la estabilización de suelos naturales en sitio con cal en la vías terciarias y caminos rurales de Colombia. Para el desarrollo de este trabajo de grado se realiza un análisis a partir de la obtención de información documental a través de proyectos y estudios realizados en diferentes países que permitieron generar conceptos claros en cuanto a los beneficios que tiene la cal como conglomerante en la mejora de la subrasante que lo hacen ser más competente como estructura de subrasante repercutiendo esto en vías con mayor serviciabilidad y vida útil.

Este trabajo de investigación logró concluir que la cal permite no solo durante el proceso de construcción la reducción considerable de costos asociados a las actividades de ejecución, administración e imprevistos, sino además, los costos de mantenimiento a lo largo de los años de servicio de la estructura se reducen drásticamente, debido a que al tener una estructura más consolidada y de mejores condiciones, esta requerirá menores montos de inversión en limpieza, atención de puntos críticos, daños en la estructura, hundimientos, entre otros (García Restrepo, 2022).

1.5. Metodología

La investigación sigue una metodología que consta de varias etapas, como obtener muestras de suelo, seleccionar, preparar, realizar ensayos de laboratorio y analizar los resultados. Se realizó cada una de estas etapas de acuerdo con protocolos estandarizados en la norma del Instituto Nacional de Vías - INVIAS.

1.5.1. Primer objetivo

A continuación, se detalla la metodología empleada para abordar el primer objetivo de la investigación, que implica la realización de varios ensayos de laboratorio, donde se describen minuciosamente los materiales y procedimientos que se realizaron para su ejecución, que permitieron identificar un suelo apropiado de la ciudad de Pasto para estabilización de una subrasante con cal y cemento.

En la etapa inicial de la investigación se realizó el muestreo con el fin de encontrar y obtener un tipo de suelo, el cual incluya el mismo rango de estabilización que tienen la cal y el cemento respecto al índice de plasticidad, para así llegar a un análisis uniforme en el cual la única variable es el tipo de estabilizador (cal y cemento).

Determinación del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo- agregado INV E 122-13. El análisis de humedad en la muestra de suelo es una parte primordial de la identificación de sus propiedades. A continuación, se describen los pasos que se tuvieron en cuenta para llevar a cabo el laboratorio de humedad en el suelo de acuerdo a la normativa INVIAS:

Se llevó una muestra del material húmedo a un horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, y se secó hasta alcanzar una masa constante, se consideró que la masa perdida a causa del secado es agua y que la masa remanente corresponde a la muestra seca. El contenido de agua se calculó relacionando la masa de agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra seca. (INVIAS, INV E 126-13, 2022, pág. 173)

A continuación, se detallan los materiales requeridos para llevar a cabo la práctica de laboratorio sobre la Determinación del Contenido de Agua (Humedad) en muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado según la norma INV E 122-13, los cuales son: muestra de suelo, horno de secado, balanza de precisión, recipientes secos y limpios, etiquetas, lápiz o marcador resistente al agua, calculadora.

En el siguiente apartado se describen los procedimientos ejecutados durante la realización del laboratorio para determinar el contenido de agua (humedad) en muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado según la norma INV E 122-13.

Para la preparación de la muestra se tomó una porción representativa de la muestra de suelo cuarteada y se mezcla de manera que todas las partículas estén distribuidas de manera uniforme una vez se tenga la preparación de la mezcla se pesan los recipientes secos y limpios con ayuda de la balanza, los recipientes se utilizan para contener las muestras de suelo antes y después del secado.

Se colocó una porción de la muestra de suelo en uno de los recipientes y se anotó el peso total. Esta fue la masa inicial del suelo húmedo, luego se colocó el recipiente con la muestra de suelo en un horno de secado precalentado a una temperatura de 110°C, Se dejó la muestra en el horno durante 24 horas hasta que alcanzo un peso constante, esto aseguro que toda la humedad se haya evaporado.

Una vez que la muestra alcanzó un peso constante, se retiró el recipiente del horno, se pesó nuevamente y se tomó registro de su peso. (Este fue el peso del suelo seco) y se empleó la siguiente fórmula para calcular el contenido de humedad del suelo:

Ecuación 1

Contenido de humedad en el suelo

$$w\% = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100$$

Fuente: (INVIAS, INV E 126-13, 2022)

Donde:

Peso inicial es el peso del suelo húmedo.

Peso seco es el peso del suelo después de secarse en el horno.

Se registraron todos los datos obtenidos durante el proceso, incluyendo la masa de la muestra

húmeda, la masa de la muestra seca y el cálculo de humedad. Marcando adecuadamente la muestra para identificación futura.

La precisión y la representatividad de los resultados dependen de la exactitud en este proceso de pesado y secado, así como de la correcta preparación y manipulación de la muestra.

Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E 213-13. Una muestra de agregado seco, de masa conocida, se separó a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente más pequeñas, con el fin de determinar la distribución de los tamaños de sus partículas (INVIAS, INV E 213-13, 2022, pág. 33).

Este análisis de granulometría es un método utilizado para determinar la distribución de los tamaños de partículas existentes en un suelo. Esta información es importante para entender las propiedades del suelo, como permeabilidad y capacidad de retención de agua (ver ilustración 1).

Ilustración 1

Ensayo de granulometría



A continuación, se detallan los materiales requeridos para llevar a cabo la práctica de laboratorio sobre el análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E 213-13. Los cuales fueron: muestra de suelo, tamices de diferentes tamaños (mallas) con sus respectivos números de abertura (malla 1'', ¾'', ½'', 3/8'', # 4, # 8, # 10, # 16, # 20, # 30, # 40, # 50, # 80, # 100, # 140, # 200, fondo, tamiz # 200 de lavado) Recipientes para recoger los materiales retenidos en cada tamiz, balanzas de precisión, agua, pipetas y buretas, tubos de ensayo, desecador, estufa, calculadora.

En el siguiente apartado se describen los procedimientos ejecutados durante la realización del laboratorio sobre el análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E 213-13.

Para la preparación de la muestra se tomó una porción representativa de la muestra de suelo cuarteada y se mezcla de manera que todas las partículas estén distribuidas de manera uniforme posteriormente se pesó cada uno de los tamices y se tomó nota de su peso. Esto se hizo para asegurar que no haya variaciones significativas en los tamices que pudieran afectar los resultados.

Se colocó la muestra de suelo en el tamiz con la abertura más grande en la parte superior. Se agitó suavemente el tamiz de manera horizontal y vertical para separar las partículas, después de tamizar durante un tiempo determinado (60 golpes), se pesó el material retenido en cada tamiz y se tomó nota de los pesos. También se pesó el material que pasa a través del tamiz más fino y se anotó su peso.

Se calcularon los porcentajes acumulativos de los materiales retenidos en cada tamiz y el porcentaje que pasó a través de cada tamiz, estos porcentajes se calcularon dividiendo el peso acumulado retenido o pasado entre el peso total de la muestra y multiplicándolo por 100. Los datos de porcentajes acumulativos se utilizaron para graficar la curva de granulometría.

Determinación de límite líquido INV E 125, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E 126-13. El ensayo de límites de Atterberg busca determinar los límites de plasticidad y liquidez de un suelo, estos límites son propiedades que permiten caracterizar el comportamiento de un suelo frente a los cambios de humedad (INVIAS, INV E 126, 2022, pág. 227).

A continuación, se detallan los materiales requeridos para llevar a cabo la práctica de laboratorio sobre la determinación del límite líquido INV E 125, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E 126-13; Muestra de suelo representativa de la sede de Alvernia de la Universidad Mariana, balanza, horno para secado, tamices, matraz de Casagrande, bastón de penetración, recipientes para muestras, agua destilada, espátulas y herramientas para manipular el suelo.

En el siguiente apartado se describen los procedimientos ejecutados durante la realización del laboratorio para determinar el límite líquido INV E 125, límite plástico e índice de plasticidad de

los suelos INV E 126-13; Para la preparación de la muestra se secó una muestra del suelo en el horno para eliminar la humedad, se trituró la muestra seca hasta obtener partículas finas y se tamizó la muestra para eliminar las partículas gruesas.

Para determinar el límite líquido se colocó una porción de la muestra tamizada en el matraz de Casagrande, se agregó agua y se mezcló hasta formar una pasta homogénea, posteriormente se moldeó una pequeña porción de la pasta y se realizaron 25 golpes estandarizados en la copa Casagrande (ver ilustración 2), y finalmente se determinó el contenido de agua en el punto en el que la pasta se cierra por completo al ser golpeada, esto es el límite líquido.

Ilustración 2

Ensayo límites de Atterberg (límite líquido)



Para determinar el límite plástico se tomó una porción de la muestra tamizada y se formó un pequeño cilindro, se utilizó un bastón de penetración para enrollar el cilindro hasta que se rompa y se determinó el contenido de agua en el punto en que el cilindro se rompió, esto es el límite plástico (ver ilustración 3), y para determinar el índice de plasticidad se calculó la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Ilustración 3

Ensayo límites de Atterberg (límite plástico)



Ensayo de equivalente de arena INV E 133-13. Para el ensayo de equivalente de arena se realizó bajo la norma INV E 133- 13, el cual determina las cantidades respectivas de polvo y material de apariencia arcillosa o finos plásticos presentes en el suelo, determinando el equivalente de arena donde, expresa el concepto de que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezclas de arena y partículas gruesas deseables de polvo y finos arcillosos o plásticos indeseables, por lo tanto la determinación del equivalente de arena es de gran importancia para determinar la calidad del suelo en términos de su contenido de partículas finas, como las arcillas o limos, cuanto mayor sea el equivalente de arena mejor será la calidad del suelo (INVIAS, INV E 133-13, 2022, pág. 297).

A continuación, se describen los procedimientos ejecutados durante la realización del ensayo de equivalente de arena INV E 133-13.

Para desarrollar este ensayo, se tomó un volumen de suelo y una pequeña cantidad de solución floculante, se colocaron en un cilindro plástico graduado y se agitaron para que las partículas de arena pierdan la cobertura de material arcilloso, luego la muestra fue rociada con solución floculante para forzar el material arcilloso a quedar en suspensión sobre la arena. Después de un periodo de sedimentación, se determinaron las alturas del material arcilloso y fino floculado y de la arena en el cilindro.

Para desarrollar estos ensayos se obtuvo una muestra de suelo de la ciudad de Pasto, donde se realizó el respectivo análisis del suelo con el fin de conocer su índice de plasticidad, para ello se realizaron ensayos para conocer el límite plástico y el límite líquido de las muestras, pero antes de realizar los ensayos anteriormente expuestos, es necesario conocer si la muestra de suelo se clasifica como una categoría de subrasante o un material base, según la AASHTO.

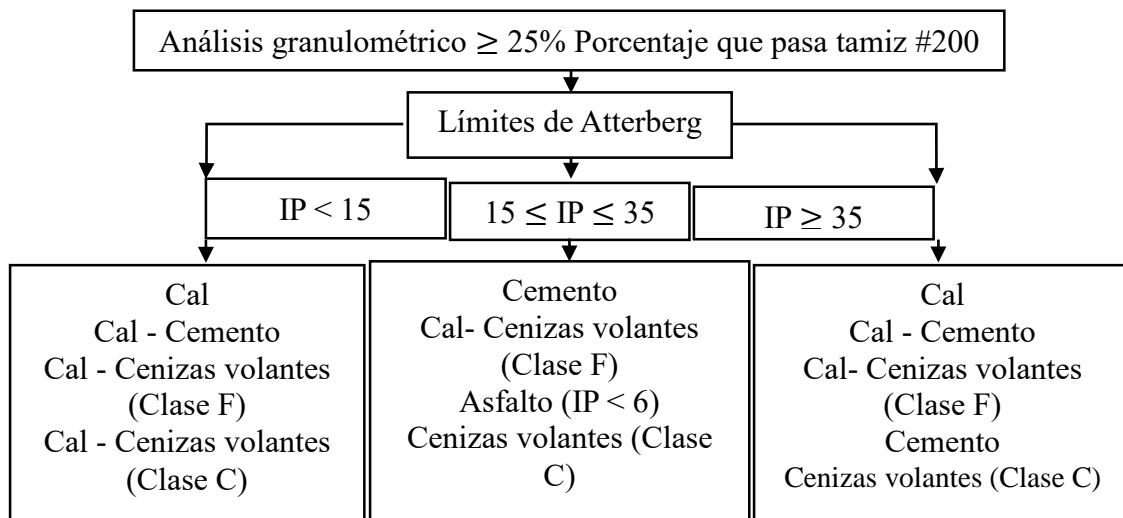
Para conocer efectivamente si la muestra se clasifica para una categoría de subrasante o una categoría de material base se realizó su respectivo análisis granulométrico, con el fin de conocer si, el porcentaje que pasa por el tamiz número 200 es menor o igual al 25%, se lo considerará como un material base, y si el porcentaje que pasa por el tamiz número 200 es mayor o igual al 25% se

lo considera como un material clasificado para subrasante.

La Figura 1 permitió identificar, a través de los resultados del índice de plasticidad, el tipo de estabilizante que podría emplearse para el suelo en estudio que tiene una plasticidad de 15, en la figura se mira exactamente qué tipos de suelo con ese IP abarcan para ser estabilizados con cal y cemento.

Figura 1

Decisión para la selección de estabilizadores para subrasante



Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2009.

1.5.2. Segundo objetivo

A continuación, se detalla la metodología empleada para abordar el segundo objetivo de la investigación, que implica la realización de varios ensayos de laboratorio, donde se describen minuciosamente los materiales y procedimientos que se realizaron para su ejecución, que permitieron obtener el diseño de mezcla con los porcentajes de cal y cemento óptimos para la subrasante.

Antes de realizar el diseño de la mezcla se realizó el ensayo de compactación Proctor estándar, el cual sirve para eliminar espacios vacíos aumentando así la densidad del suelo, y para así proseguir con el diseño de la mezcla (AASHTO, 2019).

Contenido de cal óptimo para la mezcla. La cal a utilizar debe cumplir AASHTO M 216 (ASTM C 977) o equivalente para requisitos de pureza y para determinar la cantidad de cal necesaria para lograr el diseño se utilizó el método ASTM D 6276.

El motivo por el cual se realizó el estudio de pH para el contenido de cal óptimo es para identificar la cantidad de cal necesaria para satisfacer las reacciones inmediatas de cal-suelo y también proporciona una cantidad suficiente de calcio para mantener un pH residual alto y mantener reacciones puzolánicas significativas a largo plazo (ver ilustración 4).

Ilustración 4

Mezcla suelo-cal para ensayo de compactación



El contenido de cal debe ser validado en base a pruebas de resistencia, la adición de cal cambia el contenido óptimo de humedad (OMC) y la densidad seca máxima (MDD) de los suelos debido a los efectos del intercambio catiónico y las reacciones puzolánicas a corto plazo entre la cal y el suelo. Para lo anterior la relación de densidad de humedad entre la cal y suelo debe determinarse de acuerdo con la AASHTO T99.

En lo que respecta al presente estudio, ya obtenido el porcentaje óptimo de cal para la mezcla, se realizó el ensayo a la compresión inconfiada, para así observar la ganancia de resistencia con el pasar de los días (AASHTO, 2019).

Contenido De Cemento Óptimo Para La Mezcla. Para obtener el porcentaje óptimo de cemento, se logra mediante la ayuda de la tabla 2: requerimiento de cemento para varios suelos ubicada en los requisitos establecidos en la AASHTO T135 (AASHTO, 2019).

La prueba de relación densidad-humedad, para la cantidad óptima de cemento se realizó de acuerdo con la AASHTO T134, y se utilizó dos pruebas para evaluar la eficacia de la mezcla de suelo-cemento, prueba de resistencia y prueba de durabilidad la cual se realiza de acuerdo con ASTM D559 o ASTM D560 según corresponda.

Se realizó un ensayo para observar la resistencia a la compresión simple de acuerdo con ASTM D1633 y se realizó un ensayo de resistencia a la compresión confinada, para así observar la ganancia de resistencia con el pasar de los días.

Ensayo de relación humedad-peso unitario seco (ensayo modificado de compactación) INV E 142-13. El ensayo de relación humedad-peso unitario seco en los suelos, también conocido como ensayo de compactación, se realizó de acuerdo con la norma INV E-142-13, la norma se emplea para evaluar las propiedades de los suelos y determinar su capacidad de compactación. Este ensayo es importante para caracterizar y controlar la calidad de los suelos (INVIAS, INV E 142-13, 2022, pág. 365).

El ensayo de compactación tiene como objetivo determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de un suelo, lo que permite establecer la densidad óptima del suelo y el contenido de humedad óptimo para lograr la máxima compactación. Esto es de gran importancia para garantizar la resistencia y la estabilidad de las estructuras construidas sobre el suelo.

El ensayo modificado de compactación, según la norma INV E-142-13, es un procedimiento que se emplea para conocer la densidad seca máxima y la humedad óptima de un suelo, a continuación, se mencionan los pasos que se realizaron y los resultados que proporcionó este ensayo, A continuación, se describen los procedimientos desarrollados durante la ejecución del ensayo de equivalente de Relación Humedad-Peso Unitario Seco (Ensayo Modificado De Compactación) INV E 142-13.

Se tomó una muestra representativa del suelo y se la secó a una temperatura constante de 110°C como lo recomienda la norma (INV E- 142-13), una vez seca la muestra, se tamizó la muestra seca para eliminar partículas grandes o agregados que puedan afectar el ensayo, en el caso del suelo utilizado pasa el tamiz número 4, luego se tomó una fracción representativa de la muestra tamizada, (5000 g) y se mezcló la muestra con la cantidad específica de agua para alcanzar diferentes humedades, siguiendo las indicaciones de la norma.

Para compactación se colocó la muestra húmeda en molde de compactación estándar de 6", siguiendo las especificaciones de la norma INV E 142. Luego se compactó la muestra utilizando un martillo de compactación de 2.49 kg, se realizó el ensayo con tres capas con 56 golpes cada una como lo indica el método C de la norma y para determinar la densidad seca se tomó una parte de la muestra compactada, se pesó y se llevó al horno. Se calculó la densidad seca y la humedad de la muestra compactada y se repitió el procedimiento de compactación para diferentes humedades de la muestra.

La elaboración de la curva de compactación se graficó los valores de humedad versus densidad seca obtenidos en los pasos anteriores, identificando el punto de máxima densidad seca y humedad óptima.

Ensayo relación humedad-densidad mezclas suelo cemento INV E 611-13. Para realizar el ensayo se sigue la norma INV E 611-13, la cual tiene como objetivo determinar la relación entre la humedad y la densidad de mezcla de suelo cemento cuando se compacta y antes de que ocurra la hidratación del cemento (INVIAS, INV E 611-13, 2022, pág. 63).

Mediante este ensayo se determinó la humedad óptima y la densidad máxima, que se debe emplear para moldear la muestra suelo cemento, de gran importancia para establecer la estabilidad y resistencia adecuada de la estructura construida sobre el suelo.

La compactación se realizó con una energía de compactación normal, con los siguientes materiales: molde de 6 pulgadas de diámetro, martillo pequeño de 2,49 kg o 5,5 lb que cae desde

una altura de 305 mm o 12", y se realiza en 3 capas de compactación con un número de golpes de 56, y de acuerdo a la clasificación del suelo previamente establecida se recomienda usar un porcentaje de cemento del 7%.

A continuación, se describen los procedimientos desarrollados durante la ejecución del ensayo de Relación Humedad-Densidad De Mezclas De Suelo Cemento INV E 611-13.

Se realizó la preparación de la muestra con una muestra representativa del suelo a analizar, y se secó a una temperatura de 110°C. La norma INV E-142 especifica la temperatura a la que debes secar el suelo. Luego se realizó tamizaje a la muestra seca por tamiz número 4 para eliminar partículas grandes o agregados que puedan afectar el ensayo, y se toma una fracción representativa de la muestra tamizada, (5000 g), posteriormente se preparó la muestra agregando 7% de cemento en la muestra, mezclando uniformemente, luego se mezcló la muestra con la cantidad específica de agua para alcanzar diferentes humedades, se aproximó a 12% de humedad por las condiciones observadas del suelo se aumenta la cantidad de agua hasta llegar aproximadamente a una humedad del 40% en intervalos de 8% aproximadamente.

Se colocó la muestra húmeda en molde de compactación estándar de 6", siguiendo las especificaciones de la norma INV E 142. Luego se compactó la muestra utilizando un martillo de compactación de 2.49 Kg, se realizó el ensayo con tres capas con 56 golpes cada una como lo indica el método C de la norma, y se realizó la determinación de la densidad seca tomando una parte de la muestra compactada, se pesó y se procedió a llevar al horno posteriormente se calculó la densidad seca y la humedad de la muestra compactada, se repitió y realizó el procedimiento de compactación para diferentes humedades de la muestra.

Para construir la curva de compactación se graficó los valores de humedad versus densidad seca obtenidos en los pasos anteriores, identificando el punto de máxima densidad seca y humedad óptima.

Preparación y curado de probetas de suelo–cemento para pruebas de compresión y resistencia CBR en el laboratorio INV E 613- 13. Para el proceso de preparación y curado de las probetas de suelo-cemento para pruebas de compresión y resistencia CBR en el laboratorio se siguieron algunos pasos estándar (INVIAS, INV E 613-13, 2022, pág. 87).

A continuación, se detallan los materiales requeridos para llevar a cabo la práctica de laboratorio para la preparación y curado de probetas de suelo-cemento para pruebas de compresión y resistencia CBR en el laboratorio INV E 613- 13.

Suelo y cemento para tres porcentajes: 3%, 5%, 7% y 9%, moldes para probetas de 4” para la compresión y la resistencia CBR según los estándares requeridos, herramientas de mezcla como mezcladora de suelo-cemento o herramientas manuales para mezclar, agua: para la mezcla de suelo-cemento a porcentajes de 36.2%. instrumentos de medición: Reglas, niveladores, balanzas, etc., herramientas de curado: tanques, cámaras de curado, agua, telas húmedas, etc.

En el siguiente apartado se describen los procedimientos ejecutados durante la realización del laboratorio para la preparación y curado de probetas de suelo-cemento con el fin de realizar pruebas de compresión y resistencia CBR en el laboratorio INV E 613-13.

Se inicia con la preparación de la mezcla, la cual se midió la cantidad requerida de suelo y cemento cuidadosamente según las proporciones especificadas, en el diseño de mezcla se pesaron 6 kg de suelo y el cemento en seco en los diferentes porcentajes (3% ,5%, 7% y 9%), para asegurar una distribución uniforme, enseguida se adicionó el agua gradualmente para obtener una mezcla homogénea con la cantidad de agua óptima.

Para moldear las probetas se llenaron los moldes con la mezcla preparada, compactando cada capa para eliminar burbujas de aire y asegurar la densidad requerida y se niveló la superficie con ayuda de una varilla para obtener una superficie uniforme.

Se realizó el proceso de curado, inicialmente se colocaron las probetas en agua potable, para fortalecerlas lentamente y para el tiempo de curado se siguieron las recomendaciones de tiempo de

curado de la norma, durante siete días, y un día expuestas al ambiente. Después de ocho días se realizó con cuidado el desmolde las probetas para permitir que mantengan su forma, pero sin comprometer su resistencia.

En las pruebas de compresión fue necesario que se completara el tiempo de curado, para retirar las probetas del ambiente de curado y para que sequen superficialmente, para la preparación de las probetas, fue indispensable que las probetas estén limpias y se secaron antes de llevar a cabo las pruebas de compresión., las pruebas se realizaron según los estándares aplicables, registrando los resultados.

Resistencia a la compresión de cilindros moldeados suelo-cemento INV E 614-13. La resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento es una medida crucial para evaluar la calidad y la idoneidad del suelo-cemento (INVIAS, INV E 614-13, 2022, pág. 101).

A continuación, se detallan los materiales requeridos para llevar a cabo la práctica de laboratorio sobre la determinación de la resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento INV E 614-13, moldes de cilindros de suelo-cemento, instrumentos de medición como balanzas, calibradores de altura, reglas, etc., máquina de prueba de compresión: para realizar las pruebas de resistencia a la compresión.

En el siguiente apartado se describen los procedimientos ejecutados durante la realización del laboratorio para determinar la de la resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento INV E 614-13.

En la preparación se tomó una muestra representativa del suelo y se prepararon cilindros moldeados de dimensiones específicas según la norma INV E 614, se llenaron tres capas de suelo-cemento para cada probeta a cada capa se aplicó 56 golpes con un martillo de compactación (2.49 kg), posteriormente se llevaron a cabo las pruebas de compresión mediante la colocación de los cilindros en la máquina de prueba correspondiente y se aplicó carga axial de manera gradual hasta que se produjo el fallo, se registró la carga máxima aplicada en cada caso y se procedió a calcular la resistencia a la compresión.

Es fundamental seguir los estándares y protocolos específicos establecidos para realizar las pruebas de resistencia a la compresión de los cilindros de suelo-cemento con precisión y asegurar la validez de los resultados (ver ilustración 5).

Ilustración 5

Curado de probetas en horno a 20°C



Para encontrar la humedad óptima de suelo-cal en cada uno de sus porcentajes se realiza el procedimiento de la norma INV E 611-13.

Resistencia a la compresión inconfiada de mezclas compactadas de suelo-cal INV E 605-13. Se realizó este método para la preparación, curado de la mezcla de suelo y determinación de la resistencia a la compresión inconfiada estabilizado o tratado con cal (INVIAS, INV E 605-13, 2022, pág. 27).

Con las probetas de suelo-cal, elaboradas con el contenido de cal determinado a partir del ensayo descrito en la norma INV E-601, a un peso unitario y una humedad de compactación previamente definidos, luego de un periodo de curado se realizó el ensayo de compresión inconfiada (ver ilustración 6).

Ilustración 6

Ensayos de compactación



La resistencia a compresión de las probetas se calculó a partir de la carga máxima o de la carga correspondiente a una deformación axial de 5 % (ver ilustración 7).

Ilustración 7

Ensayo de resistencia a la compresión



Este ensayo permite establecer su idoneidad para el mejoramiento de subrasantes o la estabilización de las capas inferiores de un pavimento.

A continuación, se detallan los materiales y equipos requeridos para llevar a cabo la práctica de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión inconfiada de mezclas compactadas de suelo-cal INV E 605-13, moldes de compactación, martillo de compactación, extractor de muestras, balanzas, horno, regla metálica, tamiz #4, dispositivo para medir las dimensiones de las probetas compactadas para medir la altura y el diámetro, con una precisión de 0.1 %, recipientes plásticos impermeables y de cierre hermético, para el almacenamiento de las muestras después de la

compactación, bandejas y recipientes metálicos, bandejas anchas y poco profundas, para mezclar y secar materiales, cronómetro, piedras porosas circulares, prensa y dispositivo indicador de carga, indicador de deformación, cal, agua potable, bolsas plásticas, geotextil absorbente.

En el siguiente apartado se describen los procedimientos ejecutados durante la realización del laboratorio para determinar la resistencia a la compresión inconfiada de mezclas compactadas de suelo-cal INV E 605- 13.

Para la estimación de la cantidad de cal para la elaboración de las muestras de ensayo se determinó de la humedad óptima de la mezcla suelo-cal de acuerdo con la norma INV E-141.

Se determinaron las cantidades de suelo, cal y agua, necesarias para elaborar una muestra de ensayo, así como las totales para preparar el número de muestras que requiere el ensayo completo de compactación. Se deberá preparar 10 % más del material calculado, para tener en cuenta posibles pérdidas y desperdicios. Las mezclas suelo-cal-agua se elaboraron de acuerdo con la norma INV E-603, con contenidos crecientes de agua y, en seguida, se almacenaron a temperatura ambiente en recipientes plásticos cerrados herméticamente e impermeables, durante 1 hora.

Se realiza la compactación de las mezclas en los moldes apropiados, según lo establecido en la norma INV E-141. La superficie de cada capa compactada se escarificó antes de adicionar el material para la siguiente, cada mezcla se extrajo del recipiente cerrado solamente en el instante en que se va a proceder a su compactación.

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV E-141, se calcularon las densidades de las probetas y las humedades con las cuales fueron compactadas, se elaboró la curva de compactación y se determinó la densidad seca máxima y la humedad óptima de la mezcla.

CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada INV E-148 13.

El ensayo CBR se utiliza en el diseño de pavimentos. En el ensayo, un pistón circular penetra una muestra de suelo a una velocidad constante. El CBR se expresa como la relación porcentual entre el esfuerzo requerido para que el pistón penetre 2.54 o 5.08 mm (0.1” o 0.2”) dentro de la muestra de ensayo, y el esfuerzo que se requirió para penetrar las mismas profundidades una muestra patrón de grava bien gradada (INVIAS, INV E 148-13, 2022, pág. 403).

Este método se empleó para determinar el CBR de una muestra compactada en un molde especificado. Es de responsabilidad de quien exige la ejecución de ensayos de acuerdo con esta norma, especificar la finalidad del ensayo para satisfacer sus protocolos o los requerimientos específicos del diseño.

A continuación, se detallan los materiales y equipos requeridos para llevar a cabo la práctica de laboratorio de CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada INV E-148, prensa, moldes, disco espaciador, martillo de compactación, aparato medidor de expansión, placa de metal perforada, sobrecarga metálica, pistón de penetración, tanque, horno, balanzas, tamices, regla.

En el siguiente apartado se describen los procedimientos ejecutados durante la realización del laboratorio de CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada INV E-148.

Se preparó la muestra de suelo de acuerdo a las especificaciones y con una humedad adecuada tanto para cal, cemento y suelo, en cuanto a la compactación de la muestra, se colocó una capa de suelo en el molde CBR y se compactó en tres capas utilizando un pisón estándar, para cada capa fue necesario incluir un esfuerzo de compactación mayor de 56 golpes por cada capa (60 golpes), una vez terminada la compactación se quitó el collar de extensión y se enrasó el espécimen con regla metálica, se rellenó con material sobrante sin gruesos, comprimiéndolo con la espátula, una vez se realizó el proceso de compactación, se tomó una muestra para el contenido de humedad de acuerdo con las normas INV E-141 o INV E-142, dado que las probetas no fueron sometidas a inmersión, se realizó este procedimiento con el fin de obtener el contenido promedio de humedad.

Para la penetración de las probetas ya compactadas se aplicó sobre los especímenes una carga de 44 N para que el pistón asiente, se montó el dial medidor de manera que se pudiera medir la penetración del pistón y seguidamente se situó en ceros los diales medidores, se aplicó la carga sobre el pistón de penetración mediante el gato, de manera que produjese una velocidad de penetración uniforme y finalmente se calculó la presión aplicada por el pistón y se dibujó una curva para obtener los esfuerzos de penetración a partir de los datos de prueba (ver ilustración 8).

Ilustración 8

Ensayo de resistencia al corte CBR



1.5.3. Tercer objetivo

A continuación, se describe la metodología utilizada para abordar el tercer objetivo de la investigación. Este objetivo implica la recopilación de los resultados obtenidos durante el desarrollo del primer y segundo objetivo para la creación de gráficos de resistencia a la compresión y resistencia CBR. Estos gráficos comparan una subrasante estabilizada con cemento y otra estabilizada con cal.

Obtenido ya el ensayo de resistencia a la compresión inconfina con la mezcla de suelo – cemento y suelo – cal, se espera que con el pasar de los días, la resistencia vaya mejorando y haya una relación de las dos mezclas trabajadas en cuanto a la máxima resistencia alcanzada, para así concluir que la cal también es un aditivo con capacidades de estabilización altas como el cemento para cierto tipo de suelos y saber cómo se desarrolla o cómo evoluciona la ganancia de resistencia, para así concluir en que momentos se puede dejar de lado el cemento para dar lugar a la cal.

1.5.4. Descripción de la investigación

Este análisis comparativo busca determinar cuál de las mezclas de suelo estabilizado (con cal o cemento) es más efectiva para mejorar la capacidad portante de la subrasante, es decir, para aumentar la resistencia del suelo y evitar que se produzcan deformaciones o asentamientos excesivos durante la construcción o vida útil de la obra.

En este sentido, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio y/o ensayos in situ para medir la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la densidad y otros parámetros que permiten comparar el desempeño de ambas mezclas. Los resultados pueden ser útiles para la selección de la mejor alternativa de estabilización de suelos en función de las características específicas de la obra y del entorno en el que se encuentra.

2. Presentación de resultados

A continuación, se exponen los resultados de la investigación en concordancia con el objetivo general: “Analizar la resistencia a la compresión y resistencia CBR de una mezcla de suelo estabilizado con cal en comparación con cemento para una subrasante.”

2.1. Objetivo 1: Un suelo apropiado de la ciudad de pasto para estabilización de una subrasante con cal y cemento

En este capítulo se detallan todos los ensayos llevados a cabo en el marco del desarrollo del primer objetivo. Asimismo, al concluir dicho objetivo, se presenta una tabla con el resumen de los resultados.

2.1.1. Ensayo de granulometría por tamizado

Los resultados del análisis granulométrico del suelo de estudio se representan en la tabla 1.

Análisis de resultado granulometría por tamizado y curva granulométrica. La muestra de suelo estudiada tiene las siguientes características: 0% de gravas, 91.8% de arenas y 8.3% de finos. Con coeficientes de curvatura y uniformidad de 0.84 y 6.85 respectivamente.

Según la clasificación unificada de suelos (SUCS), se determina que se ajusta a la categoría SP-SM, es decir, arena mal graduada con limo. En el sistema de AASHTO, se clasifica como A-2-7, que indica arena limosa. Este hallazgo se confirma además mediante la observación minuciosa de la curva granulométrica, como se ilustra en la Tabla 1.

Tabla 1

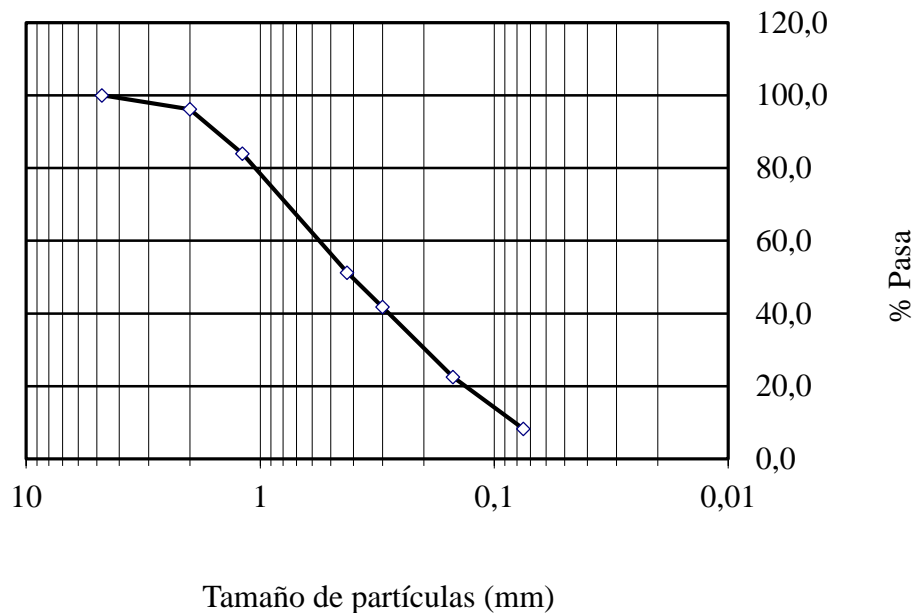
Datos granulometría por tamizado

Tamiz	Abertura [mm]	Peso retenido [g]	% Retenido	% Pasa
No. 4	4.75	0.0	0.0	100.0
No. 10	2.000	76.0	3.8	96.2
No.16	1.190	245.0	12.3	84.0
No. 40	0.425	654.0	32.7	51.3
No. 50	0.300	189.0	9.5	41.8
No. 100	0.15	386.0	19.3	22.5
No. 200	0.08	285.0	14.3	8.3
Fondo		165.0	8.3	0.0
Total		2000.0	100.0	

Para interpretar de manera adecuada el tipo de distribución del suelo de estudio se presenta la curva granulométrica en la gráfica 1.

Gráfica 1

Curva granulométrica de la muestra de suelo en estudio.



2.1.2. Límites de Atterberg

En el suelo de estudio se realizó los ensayos de límites de Atterberg se presenta: límite líquido en la tabla 2, grafica 2 y límite plástico en la tabla 3.

Análisis de resultados de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Aplicando el ensayo de límite líquido (tabla 2, grafica 2) y límite plástico (tabla 3) se obtuvo un límite líquido del 45.6%, un límite plástico de 39% y un índice de plasticidad de 6.6%. Partiendo de este resultado se puede concluir que para valores menores a 10 se considera baja plasticidad y valores cercanos a los 20 señalan suelos muy plásticos.

Tabla 2

Límite líquido

Descripción	Límite líquido		
	1	2	3
N° de ensayo	1	2	3
N° capsula	A	B	C
Peso de cápsula (g)	20.2	20.5	20.9
Peso de cápsula + M. húmeda (g)	41.7	46.72	52.7
Peso de cápsula + M. seca (g)	34.7	38.61	43.1
Peso del agua	7.1	8.1	9.6
Peso de la muestra seca (g)	14.5	18.2	22.2
Contenido de humedad (%)	48.8	44.7	43.4
N° de golpes	18	20	25
Promedio C. de humedad (%)	45.6		

Se construye la “curva de flujo” como se indica en la *gráfica 2*. Los puntos obtenidos tienden a alinearse sobre la tendencia de una recta lo que permite interpolar para la determinación de la ordenada Contenido de humedad (%) para la abscisa N° de golpes N = 25 golpes.

Gráfica 2

Límite líquido de la muestra de suelo.

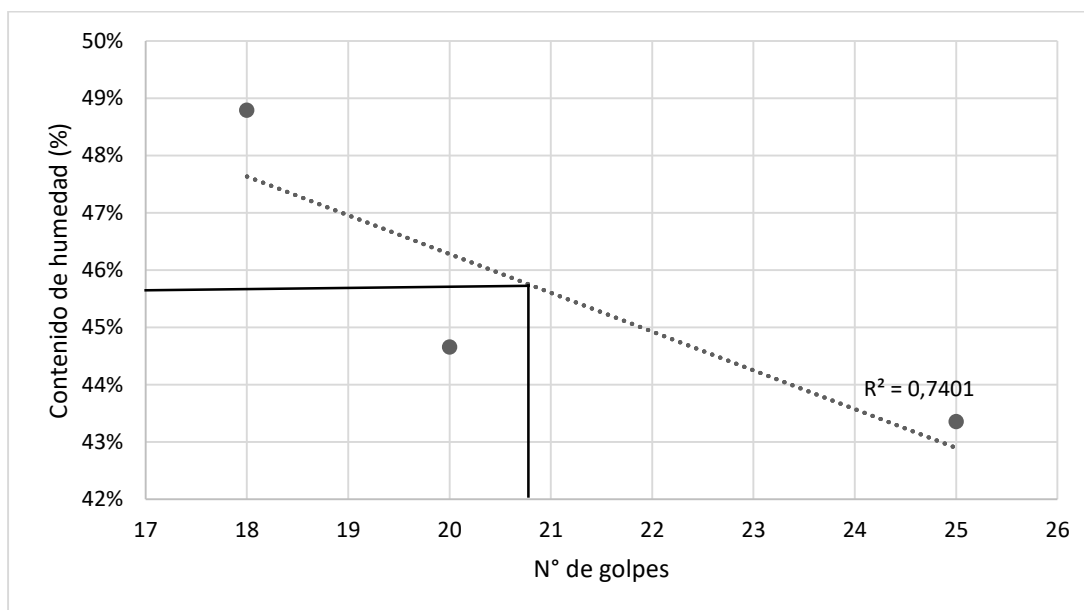


Tabla 3

Límite plástico

Descripción	Límite plástico		
	1	2	3
Nº de ensayo	A	B	C
Nº capsula	A	B	C
Peso de cápsula (g)	18.4	21.4	21.3
Peso de cápsula + M. húmeda (g)	21.2	23.2	26.0
Peso de cápsula + M. seca (g)	20.4	22.7	24.7
Peso del agua	0.8	0.5	1.3
Peso de la muestra seca (g)	2.0	1.3	3.4
Contenido de humedad (%)	39.3	40.6	37.2
Promedio C. de humedad (%)	39.0		

Índice de plasticidad de muestra de suelo en estudio. El índice de plasticidad (IP) se calcula restando el límite líquido (LL) del límite plástico (LP), el resultado del cálculo proporciona información sobre la plasticidad del suelo, es decir, su capacidad para deformarse sin romperse cuando se somete a esfuerzos de compresión, la ecuación para calcular el índice de plasticidad es:

Ecuación 2

Índice de plasticidad

$$IP = LL - LP$$

$$IP = 45.6\% - 39\% = 6.6\%$$

Fuente: (INVIAS, INV E 126-13, 2022)

2.1.3. Equivalente de arena

El ensayo de equivalente de arena tomando una proporción de suelo obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 4.

Análisis de resultados de equivalente de arena. Con base en los resultados de la tabla 4 se determinó que el valor promedio de equivalente de arena fue de 51, que es un valor aceptable según la tabla 300.1 de requisitos de agregados para afirmados, subbases granulares de la norma de ensayos de INV E-133-13 donde se especifica que para una correcta construcción de una subbase granular el valor de equivalente de arena debe ser mayor a 25 y para la base granular mayor a 30, por lo anterior, el material cumple con los requisitos.

Tabla 4

Equivalente de arena

Ensayo de equivalente de arena		
Descripción	Ensayo 1	Ensayo 2
Lectura de arena	72	68
Lectura de arcilla	135	140
EA %	53,3	48,6
EA	53	49
EA promedio	51	

2.1.4. Análisis de resultados del primer objetivo

En la tabla 5 se presentan de manera resumida los resultados de la investigación, incluyendo la clasificación del suelo, los límites de Atterberg y el índice de plasticidad, que son datos relevantes del primer objetivo. Este capítulo detalla exhaustivamente todos los resultados con los respectivos análisis de los ensayos realizados con el fin de alcanzar el objetivo inicial de la investigación.

Tabla 5

Resumen objetivo 1

Resumen clasificación y propiedades suelo de estudio		
Simbología	SUCS	SP-SM: Arena mal graduada con limo
	AASHTO	A-2-7: Arena limosa
Límite líquido		45.60%
Límite plástico		39%
Índice de plasticidad		6.6%

2.2. Objetivo 2: Obtener el diseño de mezcla con los porcentajes de cal y cemento óptimos para la subrasante

En este capítulo se detallan todos los ensayos llevados a cabo en el marco del desarrollo del segundo objetivo. Asimismo, al concluir dicho objetivo, se presenta una tabla 9 resumen que sintetiza los resultados.

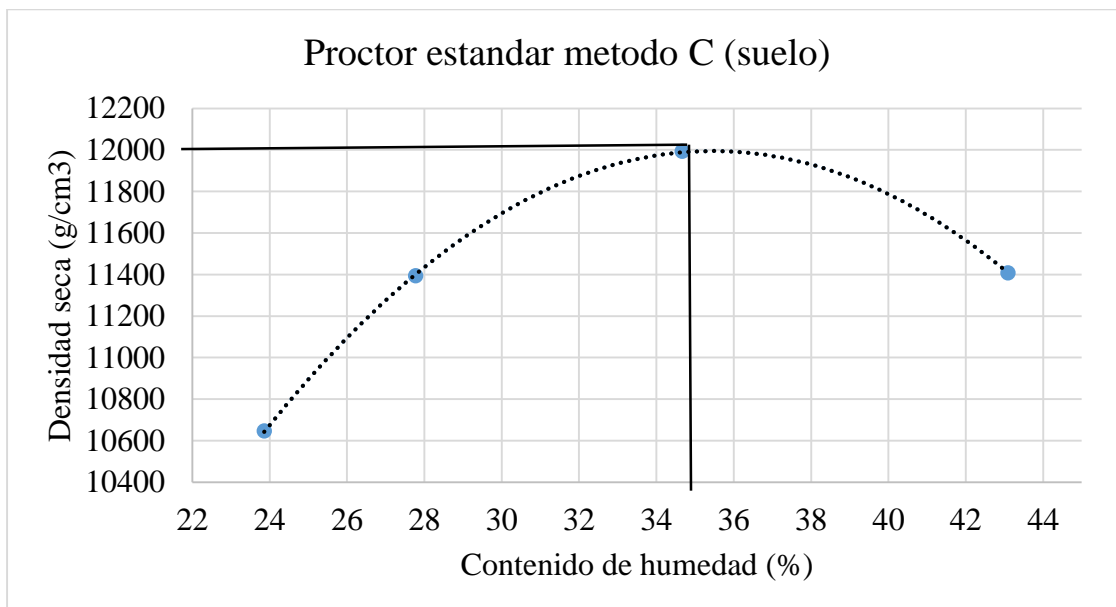
2.2.1. Ensayo humedad-densidad de suelo

Los resultados de los ensayos realizados con el fin obtener la humedad óptima para el diseño de mezcla se presentan en la gráfica 3.

Análisis de resultados de humedad óptima para suelo. Aplicando el ensayo de Proctor estándar método C suelo con relación a los datos obtenidos en la gráfica 3, se puede observar que el suelo analizado contiene una humedad óptima de 35.6% en el punto máximo de densidad de 12000 g/cm^3 , se realizaron cinco ensayos de contenido de humedad con poca variación donde se obtuvo una curva cóncava, el punto máximo indica el contenido de humedad óptimo para este suelo.

Gráfica 3

Ensayo humedad-peso específico suelo



2.2.2. Ensayo humedad-densidad de mezcla de suelo- cemento

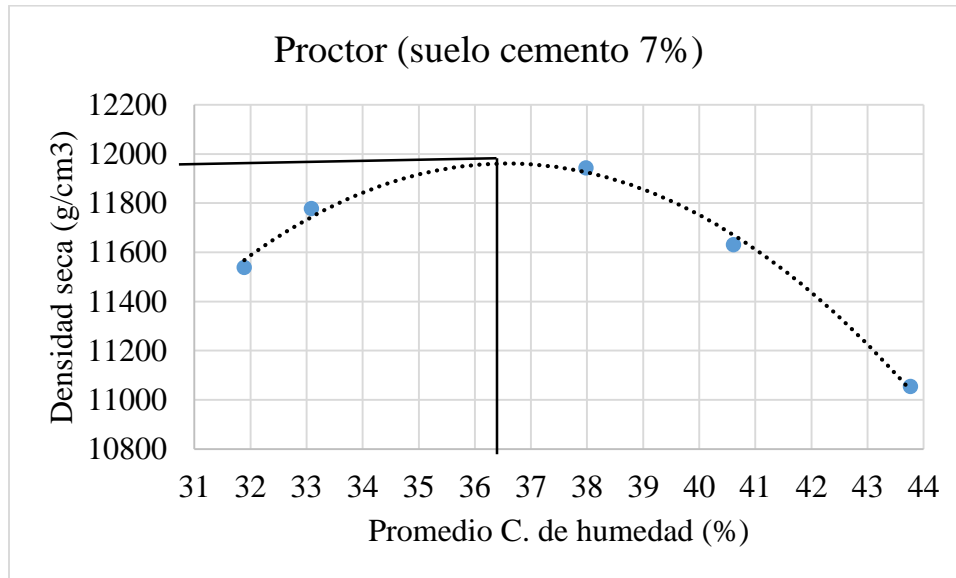
Los resultados de los ensayos realizados con el fin obtener la humedad óptima para el diseño de mezcla suelo-cemento se presentan en la gráfica 4.

Análisis de resultados de humedad óptima para suelo cemento 7%. El ensayo humedad-densidad de suelo-cemento se realizó con una adición de 7% de cemento proporcional a la cantidad de suelo requerida para cada ensayo, se realizaron cinco ensayos de contenido de humedad con poca variación donde se obtuvo una curva cóncava, el punto máximo indica el contenido de humedad óptimo para este suelo.

Con relación a los datos obtenidos en la gráfica 4, se puede observar que el suelo-cemento analizado contiene una humedad óptima de 36.5% en el punto máximo de densidad de 11970 g/cm^3 , para este suelo.

Gráfica 4

Ensayo humedad- densidad suelo- cemento 7%



2.2.3. Ensayo humedad-densidad de mezcla de suelo- cal

Los resultados de los ensayos realizados con el fin obtener la humedad óptima para el diseño de mezcla suelo-cal, con los contenidos de cal de 1%, 2%, 3%, 4% y 5% se presentan en la tabla 6.

Análisis de resultados de humedad óptima para suelo cal. En la tabla 6 se encuentran registrados los datos obtenidos del ensayo de Proctor con cal, dando a conocer la humedad óptima en porcentaje y la densidad seca de cada porcentaje de suelo-cal.

Se realizaron cinco ensayos de contenido de humedad con poca variación donde se obtuvo una curva, el punto máximo indica el contenido de humedad óptimo para este suelo.

De acuerdo con la gráfica 5 se puede observar que el porcentaje de humedad óptima varía en un rango de 36% y 38.2%. Este rango proporciona la humedad adecuada para alcanzar las propiedades

deseadas en la mezcla, esta variación sugiere que existe una estabilidad en la humedad óptima para la mezcla de suelo cal en el rango analizado.

En la gráfica 5 se presentan las curvas de densidad seca vs contenido de humedad, teniendo en cuenta los porcentajes de cal de 1%, 2%, 3%, 4% y 5%

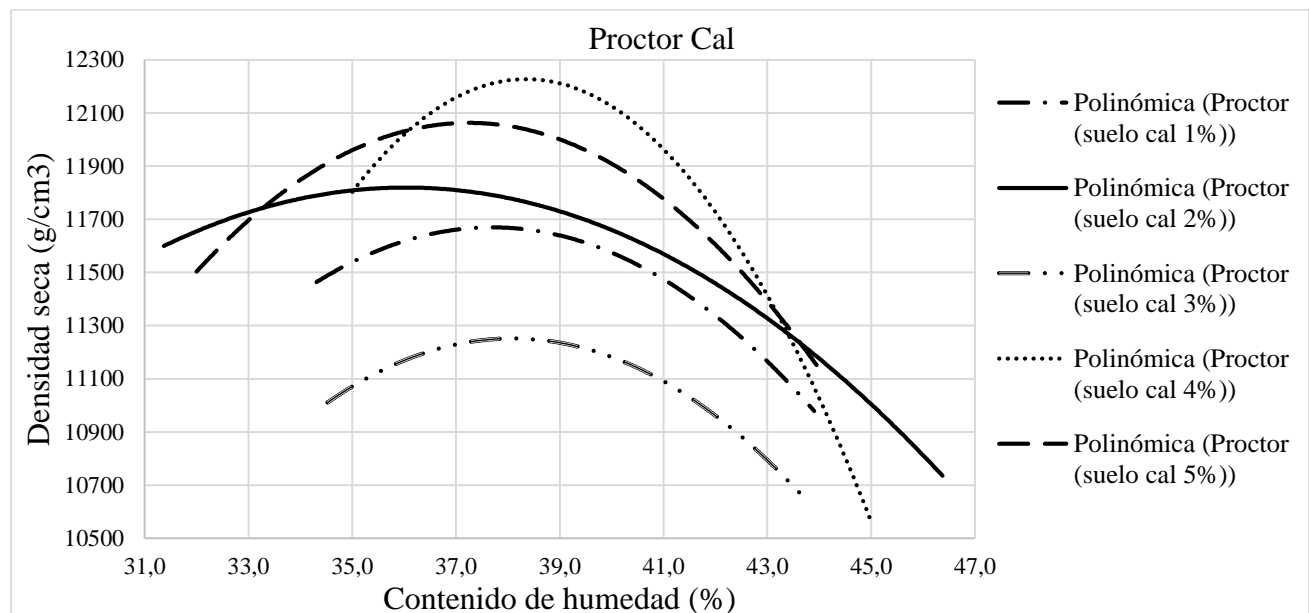
Tabla 6

Ensayo Proctor con suelo-cal

% Suelo-cal	Humedad Óptima %	Densidad seca (g/cm ³)
1	37.8	11500
2	36.1	11820
3	38.0	11240
4	38.2	11250
5	37.4	12050

Gráfica 5

Resumen ensayos Proctor mezcla suelo-cal, variando % de cal



Nota: Se utilizó una función polinómica de segundo grado con el fin de identificar la tendencia visual de la gráfica, sin comprometer los parámetros matemáticos de la regresión.

2.2.4. Ensayo de resistencia a la compresión cal

En la tabla 7 y la gráfica 6 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la compresión con el fin de determinar el porcentaje óptimo de cal para realizar el diseño de mezcla cumpliendo el objetivo 2.

Análisis de resultados porcentaje óptimo para una mezcla de suelo-cal. En la gráfica 6 se registró la resistencia máxima para cada porcentaje de cal, la gráfica permite identificar la resistencia máxima de 69 kPa para un contenido de cal del 4% para lograr una adecuada estabilización, teniendo en cuenta el criterio de máxima resistencia a la compresión.

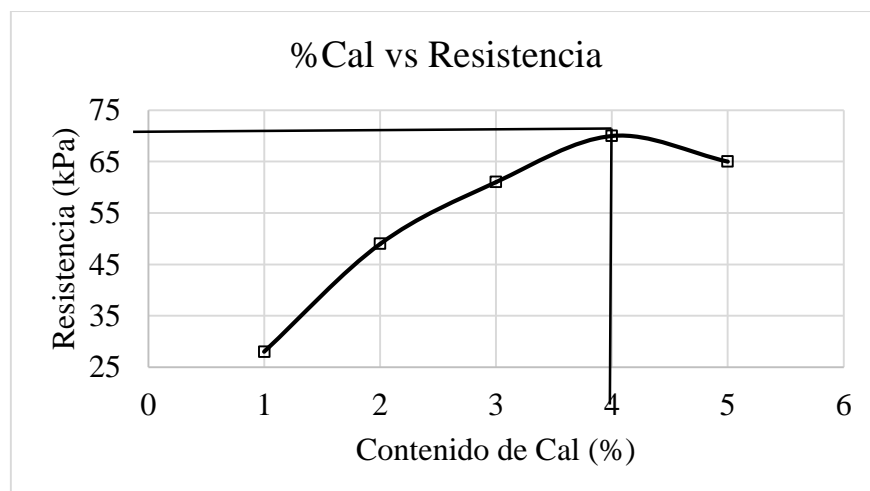
Tabla 7

Ensayo de resistencia a la compresión cal

Ensayo de resistencia a la compresión cal	
cal (%)	Resistencia (kPa)
1	28
2	49
3	61
4	70
5	65

Gráfica 6

Resistencia en función del contenido de cal



2.2.5. Ensayo de resistencia a la compresión cemento

En la tabla 8 y la gráfica 7 se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión con el fin de determinar el porcentaje óptimo de cemento para realizar el diseño de mezcla cumpliendo el objetivo 2.

Análisis De Resultados Porcentaje Óptimo Para Una Mezcla De Suelo-Cemento. En la gráfica 7 se registró la resistencia máxima para cada porcentaje de cemento, la gráfica permite identificar la resistencia máxima de 99 kPa para un contenido de cal del 5% para lograr una adecuada estabilización, teniendo en cuenta el criterio de máxima resistencia a la compresión.

Tabla 8

Ensayo de resistencia a la compresión cemento

Ensayo de resistencia a la compresión cemento	
Cemento (%)	Resistencia (kPa)
3	85
5	99
7	87
9	64

Gráfica 7

Resistencia en función del contenido de cemento

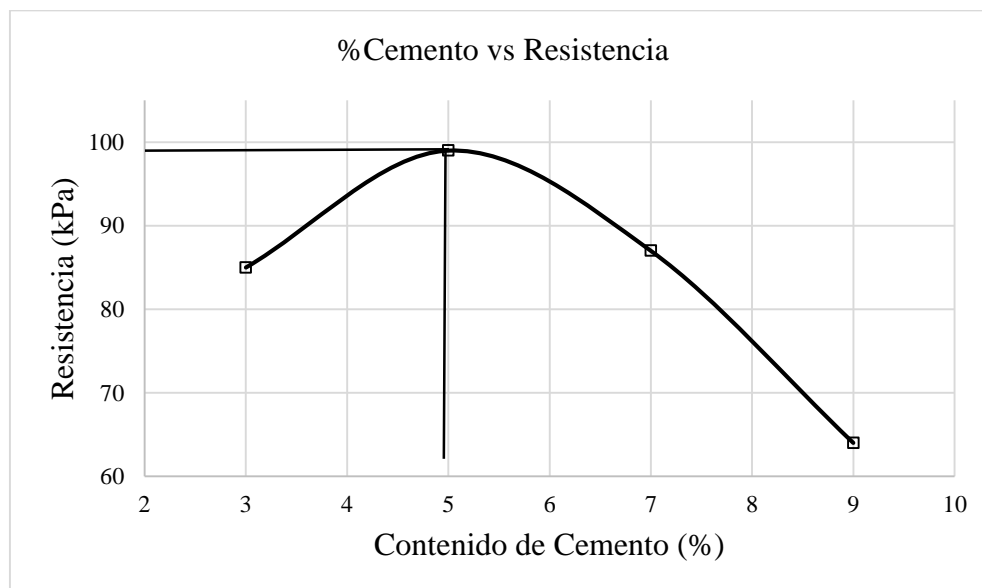


Tabla 9

Resumen de resultados del objetivo 2

Resumen del porcentaje de cal, cemento y humedad óptimos		
	Contenido óptimo de estabilizante (%)	Humedad óptima (%)
Suelo	-	35
Cal	4	38.2
Cemento	5	36.2

2.3. Objetivo 3: Construir las gráficas de resistencia a compresión y resistencia CBR en una subrasante estabilizada con cemento y una subrasante estabilizada con cal.

En este capítulo se presentan los resultados recopilados para construir las gráficas de resistencia a la compresión y resistencia CBR en una subrasante estabilizada con cal y cemento. El propósito de estas gráficas es analizar y comparar el comportamiento de la cal y el cemento como estabilizantes.

2.3.1. Gráficas de resistencia a compresión

En la Tabla 10 y la Gráfica 8, se muestran las curvas de evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo de curado para el suelo de estudio. Estas pruebas se realizaron utilizando diferentes estabilizantes como parte del último objetivo de este trabajo de grado, que consiste en construir gráficas de resistencia a compresión para una subrasante estabilizada con cemento y otra con cal.

Análisis de resultados evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado. En la gráfica 8 para un tiempo de curado de 28 días la muestra de suelo natural alcanzó una resistencia a la compresión de 79 kPa, un suelo estabilizado con cal alcanzo una resistencia a la compresión de 116 kPa y un suelo estabilizado con cemento alcanzo una resistencia a la compresión de 196 kPa.

Se registraron las resistencias máximas alcanzadas en un tiempo de curado de 28 días, en

comparación al suelo natural con suelo-cal hay un incremento de 46.8% a la resistencia a la compresión, en comparación en el suelo natural con el suelo-cemento hay un incremento de 148% a la resistencia a la compresión y en comparación en el suelo-cal con el suelo-cemento hay un incremento de 69.0% creando un notorio incremento y demostrando que el cemento genera una mayor resistencia independiente al tiempo de curado.

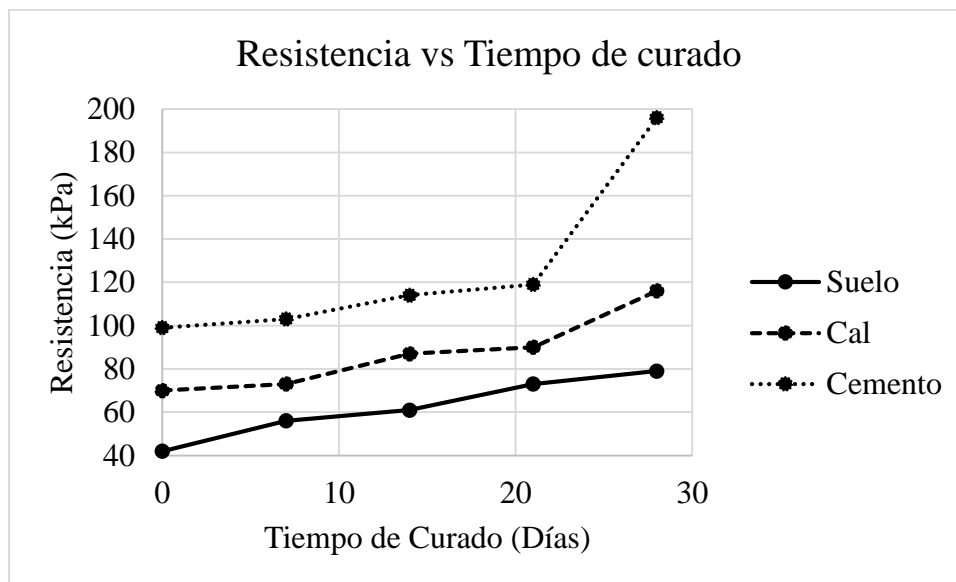
Tabla 10

Ensayo resistencia a la compresión del suelo, cal y cemento en tiempo de curado

Tiempo de curado (Días)	Resistencia (kPa)		
	Suelo	Cal	Cemento
0	42	70	99
7	56	73	103
14	61	87	114
21	73	90	119
28	79	116	196

Gráfica 8

Evolución resistencia a la compresión en el tiempo de curado



2.3.2. Gráficas de resistencia CBR

En la tabla 11 y la gráfica 9, se presentan las curvas de evolución de la resistencia CBR teniendo en cuenta el tiempo de curado para el suelo de estudio utilizando diferentes estabilizantes.

Análisis de resultados evolución de la resistencia CBR en función del tiempo de curado. En la gráfica 9 para un tiempo de curado de 28 días la muestra de suelo natural alcanzó una resistencia CBR de 14.0%, un suelo estabilizado con cal alcanzó una resistencia CBR de 20.1% y un suelo estabilizado con cemento alcanzó una resistencia CBR de 28.1%, de acuerdo con lo anterior, los resultados de resistencia CBR son mayores a 10% y 20%, por lo cual, permite clasificarla como una subrasante buena y buena respectivamente, de acuerdo los resultados que se establecen en la categoría de subrasante del manual de diseño de pavimentos de concreto para vías de bajos, medios y altos volúmenes de tráfico de INVIAS. (INVIAS, 2022)

Al analizar las pendientes y tendencias, observamos que la razón de cambio indica que la tasa de aumento es constante para las mezclas de suelo natural, cemento y cal a lo largo del tiempo de curado.

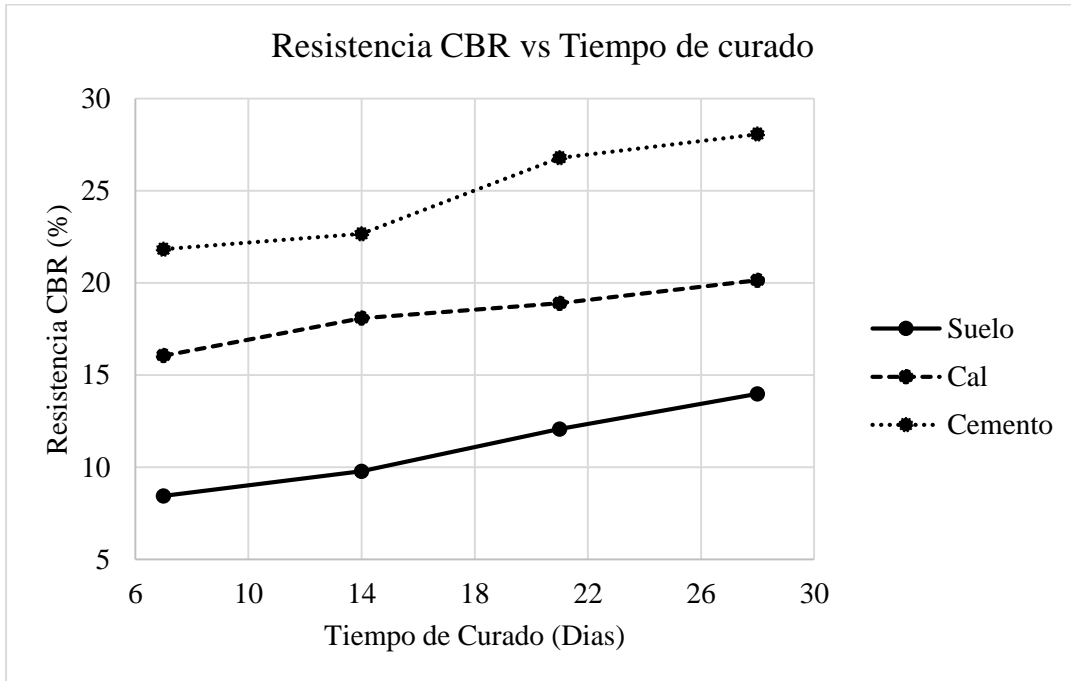
Tabla 11

Ensayo de resistencia CBR del suelo, cal y cemento en un tiempo de curado

Tiempo de curado (Días)	Resistencia CBR (%)		
	Suelo	Cal	Cemento
7	8.45	16.06	21.83
14	9.78	18.09	22.66
21	12.07	18.89	26.78
28	13.98	20.14	28.07

Gráfica 9

Evolución resistencia CBR en el tiempo de curado



3. Conclusiones

Según el progreso del primer objetivo, durante las pruebas de caracterización, se determinó que el suelo en su estado natural se clasifica según la norma AASHTO como A-2-7: Arena limosa. Asimismo, conforme a la clasificación unificada de suelos (SUCS), se identifica que corresponde a la categoría SP-SM: Arena mal graduada con limo. En las pruebas de caracterización realizadas, se clasificó el suelo en estado natural con la norma AASHTO como un A-2-7: Arena limosa y de acuerdo a la clasificación unificada de suelos (SUCS) se identifica que cumple con la simbología SP-SM: Arena mal graduada con limo.

Se determinó que el diseño de mezcla óptimo para suelo estabilizado con cal es del 4%, con una humedad óptima de 38.2%, mientras que para suelo estabilizado con cemento es del 5%, con una humedad óptima de 36.5%. Es interesante notar que estas humedades óptimas son muy cercanas a la humedad natural del suelo. Sin embargo, al analizar la densidad seca máxima en la gráfica 5, se observa que la mezcla óptima de suelo-cal permite una mayor densidad seca máxima que la mezcla de suelo-cemento. Esto sugiere que la mezcla suelo-cal logra una mayor compactación, lo que a su vez reduce la permeabilidad al agua.

Esta conexión entre la densidad y la permeabilidad se puede explicar mediante la ley de Darcy, que establece que el flujo de agua a través de un medio poroso es proporcional al gradiente hidráulico y a la conductividad hidráulica, pero inversamente proporcional al área de la sección transversal y a la longitud del flujo. La conductividad hidráulica, a su vez, se ve influenciada por propiedades como la porosidad y la densidad del suelo. En este contexto, una mayor densidad seca máxima en la mezcla suelo-cal indica una menor permeabilidad, lo que sugiere que esta mezcla podría ser más efectiva en la reducción de la infiltración de agua en comparación con la mezcla suelo-cemento.

En función a la gráfica 8 la resistencia a la compresión en un tiempo de curado de 21 días de acuerdo a la tendencia la tasa de aumento es similar para los tres casos, a partir de los 21 días de curado el cemento alcanza una resistencia mayor y de forma rápida debido a que los compuestos del cemento han tenido el tiempo suficiente para hidratarse, formarse y desarrollar su resistencia.

En un tiempo de curado de 28 días el suelo de estudio estabilizado con cemento mejora su resistencia a la compresión en un 69% respecto al suelo estabilizado con cal y una resistencia CBR de 39%.

La mezcla de suelo estabilizado con cemento independientemente del tiempo de curado siempre obtiene mayor resistencia a la compresión y resistencia CBR, debido a que este aditivo se hidrata de forma rápida, alcanza una mayor capacidad de carga, es resistente a esfuerzos cíclicos y en comparación con la cal contiene una mayor proporción de componentes activos.

Los valores de CBR obtenidos al final del tiempo de curado clasifican de acuerdo a la “tabla 2-13: Clasificación de la subrasante de acuerdo a su resistencia del manual de diseño de pavimentos de concreto. (Instituto Colombiano de Productores de Cemento ICPC)” a la mezcla suelo-cal como tipo S4 una subrasante media o buena, mientras que la mezcla suelo-cemento se clasifica como tipo S5 una subrasante muy buena, condición que es de vital importancia al momento de diseñar un pavimento rígido.

Se registraron unas resistencias máximas en un tiempo de curado de 28 días, en comparación en suelo natural con suelo cal hay un incremento de 44.1% a la resistencia de CBR, en comparación en suelo natural con suelo-cemento hay un incremento de 100.8% a la resistencia a CBR y en comparación en suelo-cal con suelo-cemento hay un incremento de 39.3%, creando un notorio incremento y demostrando que el cemento genera una mayor resistencia independiente al tiempo de curado.

4. Recomendaciones

Se pueden realizar estos tipos de estudios con otros aditivos no tan convencionales como la cal y el cemento como, por ejemplo: residuos industriales (cenizas volantes, escorias, lodos, etc.), aditivos químicos específicos para estabilización del suelo, biopolímeros y materiales biodegradables, materiales fibrosos como paja, cáñamo, o geotextiles, geo polímeros y materiales geo poliméricos, polímeros sintéticos, considerando también otros tipos de suelos como: arcilla, arena, limos, grava, suelos orgánicos, suelos expansivos, suelos colapsables, suelos residuales (por ejemplo, residuos de minería), suelos contaminados.

Se identifican varios factores variables en este tipo de investigación, entre ellos la temperatura de curado, la cual está vinculada tanto a la temperatura ambiente como a la del suelo. Se sugiere llevar a cabo estos ensayos a diversas temperaturas estándar para comprender mejor cómo la temperatura puede incidir en el proceso de curado.

Sería beneficioso profundizar en el entendimiento de lo que sucede después del tiempo de curado contemplado en este estudio. Además, sería útil explorar otros ensayos de laboratorio y diferentes métodos de curado para obtener una visión más completa del proceso.

En futuras investigaciones donde se requiera llevar a cabo ensayos de laboratorio mencionados en este trabajo de grado, especialmente aquellos que dependan de tiempos de curado establecidos por la norma, es fundamental elaborar un cronograma adecuado que contemple posibles retrasos o imprevistos. Se debe identificar y priorizar los ensayos que se consideren críticos en cuanto al tiempo necesario para obtener resultados dentro del cronograma establecido.

Referencias bibliográficas

AASHTO. (2019). *Normas de ensayo para carreteras T99*.

AASHTO. (2019). *Normas de ensayos para carreteras T135*.

Adaska, W. S. (1990). *state of the art Report on Soil Cement*. ACI committee 230.

Alcaldía de Pasto. (2015). *Cuaderno diagnóstico gestión del riesgo*. Pasto- Nariño.

Alcaldía de Pasto. (2020). *entro Iberoamericano de Desarrollo Estratégico Urbano*. Pasto- Nariño.

Altamirano, G., & Díaz, A. (2015). *Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí-Rivas*.

Fonseca, A. M., & Piratova, A. M. (2019). *Estabilización de suelos*. Ediciones de la U.

García Restrepo, A. L. (2022). *Estabilización de suelos con cal como una alternativa viable para la construcción y rehabilitación de caminos rurales en Colombia*.

Hicks, R. G. (2002). *Alaska soil stabilization design guide*. Alaska: Department of Transportation and Public Facilities. Research and Technology Transfer.

Instituto Colombiano de Productores de Cemento ICPC. (s.f.). *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. Bogotá, Colombia.

Instituto Mexicano del Transporte. (2009). *CTR Construcción*. México.

Instituto Nacional de Vías. (2022). Art. 450 Mezclas asfálticas. Bogotá.

INVIAS. (2022). *Documentos técnicos: Normas de ensayo para materiales de carreteras.*

INVIAS. (2022). INV E 122-13. En *Documentos técnicos: SECCION 100 Normas de ensayo para materiales de carreteras* (pág. 173).

INVIAS. (2022). INV E 126. En *Documentos técnicos: Sección 100, Normas de ensayo para carreteras* (pág. 227).

INVIAS. (2022). INV E 133-13. En *Documentos técnicos: Sección 100, Normas de ensayos para carreteras* (pág. 297).

INVIAS. (2022). INV E 142-13. En *Documentos técnicos: Sección 100, Normas de ensayos para carreteras* (pág. 365).

INVIAS. (2022). INV E 148-13. En *Documentos técnicos: Sección 100, Normas de ensayos para carreteras* (pág. 403).

INVIAS. (2022). INV E 213-13. En *Documentos técnicos: Sección 200, Normas de ensayos para carreteras* (pág. 33).

INVIAS. (2022). INV E 605-13. En *Documentos técnicos: Sección 600, Normas de ensayos para carreteras* (pág. 27).

INVIAS. (2022). INV E 611-13. En *Documentos técnicos: Sección 600, Normas de ensayos para carreteras* (pág. 63).

INVIAS. (2022). INV E 613-13. En *Documentos técnicos: Sección 600, Normas de ensayos para carreteras* (pág. 87).

INVIAS. (2022). INV E 614-13. En *Documentos técnicos: Sección 600, Normas de ensayos para carreteras* (pág. 101).

Jagannat Mallela, H. V. (2004). *Consideration of lime stabilized layers in mechanistic empirical pavement design*. Arlington, Virginia.

kestler, M. A. (2009). *stabilization selection guide for agregate and native surfaced low volume roads*. US department of agriculture.

Little, D. N., & Nair, S. (2009). *Recommended practice for stabilization for sulfate rich subgrade soils*. Washington, DC: National Highway Cooperative Research Program, Transportation Research Board of the National Academies.

Navarro Gabarini, H. M. (2022). *Análisis comparativo de las características físico mecánicas de suelos arcillosos en la via Agua Buena Colegio La Salle con la adición de cal 2 y 4% y cemento 7, 9 y 11% para subrasante*.

Pitta, I. M. (2002). *construccion de bases de suelo-cemento por el proceso de mezcla en sitio*. Associacao brasileira de cimento portland.

Rebolledo , R. J. (2010). *Deterioros en pavimentos flexibles y rigidos*. Santiago de Chile: Universidad Austral.

Reyes, F., & Rondón, H. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Sanchez, M. (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del cantón Tosagua*. Quito- Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Secretaria de infraestructura y valoraización. (2019). *Informe de gestión*. Pasto - Nariño.

Ugaz Palomino, R. M. (2006). *Estabilización de suelos y su aplicación en el mejoramiento de subrasante*.

Zuñiga, F., Huertas, J., Guerrero, G., Sarasty, J., Dorner, J., & Burbano, H. (2018). *Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño*. Nariño, Colombia.

Anexos

Con el propósito de presentar de manera detallada el trabajo de grado titulado: “Análisis comparativo del incremento de la resistencia entre mezclas de suelo estabilizado con cal y cemento para una subrasante” se ha diseñado un archivo de Excel en donde se presentan los cálculos y procedimientos técnicos, presentando de manera más visible dichos resultados. El archivo de Excel está compuesto por:

- Tamizado
- Límites
- Equivalente de arena
- Proctor estándar método C (suelo)
- Proctor cemento 7%
- Proctor cal 1%
- Proctor cal 2%
- Proctor cal 3%
- Proctor cal 4%
- Proctor cal 5%
- Proctor cal
- Ensayo de resistencia a la compresión cal
- Ensayo de resistencia a la compresión cemento
- Ensayo de resistencia a la compresión
- Ensayo de resistencia CBR

En el anexo adjunto número 1 “Laboratorios de análisis comparativo del incremento de la resistencia entre mezclas de suelo estabilizado con cal y cemento para una subrasante.” Dicho anexo está relacionado con la metodología empleada en el trabajo de grado.