EVALUACIÓN PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE MATERIALES TIPO "ROCA MUERTA Y ESTÉRIL" PROCEDENTE DE LA CANTERA AGREGADOS Y MEZCLAS CACHIBI

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Sebastián Chávez Guevara

Director:

Diego Duque Arango

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Santiago de Cali, Septiembre 2024

RESUMEN

La red vial terciaria representa cerca del 70 % de la infraestructura vial de Colombia, de la cual solo 1.400 km están pavimentados, lo que evidencia el mal estado general de estas vías. Esta situación dificulta la conexión entre las zonas rurales y urbanas del país. Actualmente, se utilizan los métodos tradicionales de pavimentación, tanto rígidos como flexibles, pero su implementación conlleva un alto costo. Es importante destacar que estas vías, fundamentales para conectar áreas rurales, están bajo la responsabilidad de los municipios, los cuales, en la mayoría de los casos, no disponen de los recursos financieros suficientes para el desarrollo vial.

Ante esta problemática surge la necesidad de buscar alternativas de pavimentación que se ajusten tanto a las necesidades de conectividad como a las limitaciones económicas de estos municipios. Este trabajo de grado propone una opción de pavimento unicapa, utilizando roca muerta o material estéril, estabilizados mediante la adición de cemento de uso general y un aditivo. El objetivo es mejorar las propiedades de resistencia a la compresión y durabilidad de estos materiales, evaluando si su desempeño es adecuado para la mejora de la red vial terciaria, y si su costo resulta más favorable que el de los métodos tradicionales de pavimentación.

Palabras clave: Resistencia a la compresión, durabilidad, roca muerta, material estéril, vías terciarias, humedecimiento y secado.

TABLA DE CONTENIDO

Página

LISTA DE TABLAS VI
LISTA DE FIGURAS VIII
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Planteamiento del problema 2
1.2. Formulación del problema 3
1.3. Objetivos 4
1.3.1. Objetivo general 4
1.3.2. Objetivos específicos 4
1.4. Justificación 5
2. MARCO TEÓRICO 6
2.1. Propiedades del suelo 6
2.1.1. Estabilidad volumétrica 6
2.1.2. Resistencia 6
2.1.3. Permeabilidad 7
2.2. Consistencia del suelo 7
2.2.1. Límite líquido (LL) 8
2.2.2. Límite plástico (LP) 8
2.2.3. Índice de plasticidad (IP) 8
2.3. Clasificación del suelo 8
2.3.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS) 9
2.4. Estabilización del suelo 9
2.4.1. Estabilización de suelos con cal 10
2.4.2. Estabilización de suelos con cemento 11
2.4.3. Estabilización de suelos con asfalto 11

Page

2.4.4. Estabilización de suelos con aditivos químicos 12
2.5. Pavimentos 12
2.6. Antecedentes 13
3. METODOLOGÍA 16
3.1. Materiales 16
3.1.1. Roca muerta y material estéril 16
3.1.2. Cemento de uso general 18
3.1.3. Terrasil de Optimasoil 18
3.2. Caracterización de los materiales 18
3.2.1. Granulometría 19
3.2.2. Límites de consistencia 20
3.2.3. Equivalente de arena 21
3.2.4. Compactación - Proctor modificado 21
3.3. Resistencia de los materiales 22
3.3.1. Compresión de probetas 22
3.3.2. Durabilidad de probetas 24
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 25
4.1. Características del suelo natural 25
4.1.1. Resultados del ensayo de granulometría 25
4.1.2. Resultados del ensayo de límites de consistencia 29
4.1.3. Clasificación del suelo 35
4.1.4. Resultados del equivalente de arena 38
4.1.5. Resultados del ensayo de compactación 39
4.2. Resistencia y durabilidad 42
4.2.1. Resultados de resistencia a compresión simple 42
4.2.2. Resultados de durabilidad 51
4.2.3. Análisis económico 52
5. CONCLUSIONES 55

BIBLIOGRAFÍA 57

LISTA DE TABLAS

Tabla Página

3.1. Características físicas del Terrasil 18
3.2. Ensayos de caracterización 19
3.3. Ensayos de resistencia 22
4.1. Límite plástico roca muerta (1er muestreo) 30
4.2. Límite plástico roca muerta (2do muestreo) 32
4.3. Límite plástico estéril (1er muestreo) 33
4.4. Límite plástico roca muerta (2do muestreo) 34
4.5. Propiedades roca muerta (1er muestreo) 36
4.6. Propiedades roca muerta (2do muestreo) 36
4.7. Propiedades material estéril (1er muestreo) 37
4.8. Propiedades material estéril (2do muestreo) 37
4.9. Equivalente de arena de la roca muerta 38
4.10. Equivalente de arena del material estéril 38
4.11. Resumen de las propiedades del material granular 42
4.12. Resistencia a compresión roca muerta (1er muestreo) - cemento a 7 días . . 43
4.13. Resistencia a compresión roca muerta (1er muestreo) - cemento a 28 días . 43
4.14. Resistencia a compresión roca muerta (2do muestreo) - cemento a 7 días . 45
4.15. Resistencia a compresión roca muerta (2do muestreo) - cemento a 28 días . 45
4.16. Resistencia a compresión roca muerta (2do muestreo) - cemento - aditivo a 7 días 45
4.17. Resistencia a compresión roca muerta (2do muestreo) - cemento - aditivo a 28 días 46
4.18. Resumen de los resultados de la resistencia a la compresión de probetas con roca muerta 46
4.19. Resistencia a compresión material estéril (1er muestreo) - cemento a 7 días 47

Tabla Página

4.20. Resistencia a compresión material estéril (1er muestreo) - cemento a 28 días 47

4.21. Resistencia a compresión material estéril (2do muestreo) - cemento a 7 días 49

4.22. Resistencia a compresión material estéril (2do muestreo) - cemento a 28 días 49

4.23. Resistencia a compresión material estéril (2do muestreo) - cemento - aditivo a 7 días 50

4.24. Resistencia a compresión material estéril (2do muestreo) - cemento - aditivo a 28 días 50

4.25. Resumen de los resultados de la resistencia a la compresión de probetas con estéril 50

4.26. Cambio de volumen y humedad 51

4.27. Perdida de suelo - cemento 52

4.28. Presupuesto pavimento flexible 53

4.29. Presupuesto pavimento rígido 53

4.30. Presupuesto pavimento unicapa 54

LISTA DE FIGURAS

Figura Página

2.1. Límites de Atterberg 8
2.2. Cambio de estado luego del uso de la cal 10
3.1. Localización de la zona de extracción del material 17
3.2. Sitio de extracción del material 17
3.3. Probetas de roca muerta - cemento sumergidas en agua 23
3.4. Probeta de roca muerta - cemento luego del fallo a compresión simple . . . 23
3.5. Probetas del ensayo de durabilidad 24
4.1. Curva granulométrica roca muerta (1er muestreo) 26
4.2. Curva granulométrica roca muerta (2do muestreo) 27
4.3. Curva granulométrica estéril (1er muestreo) 28
4.4. Curva granulométrica estéril (2do muestreo) 29
4.5. Límite líquido roca muerta (1er muestreo) 30
4.6. Límite líquido roca muerta (2do muestreo) 31
4.7. Límite líquido estéril (1er muestreo) 33
4.8. Límite líquido estéril (2do muestreo) 34
4.9. Carta de plasticidad 35
4.10. Curva de compactación de la roca muerta (1er muestreo) 39
4.11. Curva de compactación de la roca muerta (2do muestreo) 40
4.12. Curva de compactación del estéril (1er muestreo) 41
4.13. Curva de compactación del estéril (2do muestreo) 41
4.14. Esfuerzos vs. porcentaje de cemento de roca muerta (1er muestreo) 44
4.15. Esfuerzos vs. porcentaje de cemento de estéril (1er muestreo) 48

1. INTRODUCCIÓN

La red vial terciaria de Colombia, encargada de conectar las zonas rurales con los centros urbanos, se encuentra en una situación crítica, ya que más del 90 % de sus vías están en mal estado. Esta problemática afecta directamente el desarrollo económico y social de las áreas rurales, impidiendo el transporte eficiente de productos agrícolas, el acceso a servicios básicos y el fortalecimiento de las economías locales. En este contexto, es imperativo desarrollar soluciones de infraestructura vial que no solo sean eficientes y de bajo costo, sino también sostenibles en el tiempo y adaptadas a las condiciones geográficas del país.

Una de las alternativas prometedoras para mejorar estas vías es la estabilización de materiales granulares mediante el uso de cemento y aditivos, permitiendo transformar suelos con baja capacidad portante en materiales aptos para la construcción de pavimentos de mayor durabilidad. Es una solución que puede ofrecer un equilibrio entre costo, facilidad de aplicación y resistencia, ideal para las características y limitaciones de las vías terciarias en Colombia.

Este trabajo de grado se enfoca en evaluar la estabilización de dos materiales granulares (roca muerta y estéril) procedentes de la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, utilizando cemento y un aditivo, y determinar si son aptos para su implementación en la construcción de pavimentos unicapa.

Al abordar esta problemática, la investigación no solo busca proponer una solución para mejorar la infraestructura vial en áreas rurales, sino también contribuir al desarrollo económico y social de estas regiones, facilitando la movilidad de personas y mercancías. Además, se espera que los resultados obtenidos sirvan como referencia para futuros proyectos de mejoramiento de vías rurales, promoviendo el uso de técnicas innovadoras y sostenibles en el contexto colombiano.

1.1 Planteamiento del problema

Las vías terciarias se definen como aquellas vías de acceso que conectan las cabeceras municipales con veredas o conectan veredas entre sí (INVÍAS, 2016). Según un informe presentado por el Ministerio de Transporte, el país cuenta con 205.475 km de vías, de las cuales 142.484 km pertenecen a la red terciaria, lo que representa casi un 70 % del total de la red vial de Colombia (Mintransporte, 2022). Sin embargo, este dato de vías terciarias puede ascender a 220.000 km, gracias a la plataforma Observatorio Nacional de Logística, Transporte, Minas y Energía, la cual utiliza imágenes satelitales e Inteligencia Artificial (IA) para identificar la línea base de las vías terciarias del país (Reyes, 2022).

Según el Ministerio de Transporte, la red de vías terciarias muestra que solo 1400 km están pavimentadas. Sin embargo, este dato no es certero, ya que estas vías se encuentran bajo la gestión de los municipios apartados de las grandes ciudades. Esto se debe a que la Ley 105 de 1993 descentralizó el manejo de las vías del Fondo Nacional de Caminos Vecinales, reasignándole las competencias a los municipios y departamentos (Villar y Ramirez, 2014), lo que dificulta su seguimiento y sostenimiento (Findeter, 2023).

No es un secreto la importancia que tiene el crecimiento de infraestructura de transporte en el desarrollo de la economía nacional y regional. Por lo tanto, la red terciaria de vías cumple un rol fundamental, ya que esta abarca aproximadamente el 70 % de la red vial de nuestro país. Esta red se encuentra en zonas rurales (Narvaez, 2017) y está encargada de acortar distancias entre el campo y las grandes áreas metropolitanas donde se concentran las principales actividades económicas.

Analizando todo el panorama acerca del subdesarrollo de vías que conecten las áreas rurales con las áreas metropolitanas, se le suma la relación que hay entre la ruralidad y la pobreza a nivel nacional. El índice de ruralidad (IR) se da de acuerdo con qué tan alejado está un municipio de las grandes ciudades (González, 2014), lo cual se relaciona altamente con la tasa de pobreza. Entre más alto es el IR, el porcentaje de necesidades básicas insatisfechas y pobreza es más alto (Villar y Ramirez, 2014).

En relación con lo mencionado anteriormente, se propone una metodología para la estabilización de los materiales roca muerta y estéril mediante el uso de cemento y aditivo. La finalidad de esta metodología es mejorar las características mecánicas del material, brindándole estabilidad, resistencia y durabilidad frente al efecto del agua

y las solicitaciones de los vehículos. Esta técnica podrá ser utilizada para tratar y mejorar las vías de la red terciaria.

El desarrollo de este procedimiento se llevará a cabo con la colaboración del Laboratorio de Ingeniería de Suelos y Pavimentos de la Universidad del Valle, en conjunto con Agregados y Mezclas CACHIBÍ S.A.S. Ambas instituciones trabajarán en conjunto para investigar y realizar pruebas necesarias.

El objetivo final es determinar si el material granular estabilizado cumple con los requisitos técnicos para resistir las condiciones de uso y el clima, para proporcionar una superficie de rodadura segura y duradera para los usuarios de las vías terciarias. Esta colaboración entre la academia y el sector privado permitirá implementar soluciones innovadoras y sostenibles para mejorar la infraestructura vial en Colombia.

De acuerdo con lo planteado, surge la siguiente pregunta:

1.2 Formulación del problema

¿Cómo es el comportamiento de material tipo roca muerta y esteril procedentes de la cantera Agregados y Mezclas Cachibí al adicionarle un estabilizante y cierto porcentaje de concreto?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar el comportamiento de la estabilización química de materiales tipo "roca muerta y estéril" procedente de la cantera Agregados y Mezclas Cachibi.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar la caracterización de los materiales "roca muerta y estéril" mediante pruebas de clasificación, compactación y esfuerzo.
- Seleccionar al menos dos tipos de aditivos comerciales que según su respectiva ficha técnica sea compatible con los materiales "roca muerta y estéril".
- Realizar dosificación de materiales "roca muerta y estéril" con los aditivos seleccionados y determinar la respuesta geomecánica de las mezclas.
- Evaluar el comportamiento de las dosificaciones respecto a resistencia y durabilidad
- Realizar un análisis económico entre las alternativas estudiadas.

1.4 Justificación

En Colombia, el subdesarrollo de la red vial frena el avance económico y social de las zonas rurales. Según estudios realizados por el DANE entre 2012 y 2021, las incidencias de pobreza monetaria extrema a nivel nacional aumentan año tras año (DANE, 2022). En los últimos 10 años, las zonas rurales presentan una incidencia promedio de 19.2 %. Este aumento de la pobreza monetaria está relacionado directamente al estado de las vías que conectan al campo con las áreas metropolitanas, ya que solo el 10 % de las vías terciarias se encuentran en óptimas condiciones.

Según entrevistas realizadas a habitantes de zonas rurales en varias partes del país, se reporta una inconformidad recurrente relacionada con el mal estado de las vías terciarias, lo cual genera pérdidas en la producción debido al encarecimiento del transporte de la mercancía agrícola y a las demoras ocasionadas por el mal estado de las vías (Quintero y Ramírez, 2023).

El funcionamiento en óptimas condiciones de la red vial de tercer nivel en Colombia ofrecerá un crecimiento económico para la población rural del país, lo que se traducirá en una mayor presencia del Estado en estas zonas, con la provisión de servicios públicos, salud, seguridad y educación (Narvaez, 2017).

El Plan Nacional de Desarrollo del gobierno 2022-2026 establece que uno de los aspectos principales para la transformación del país es la consolidación de las vías terciarias, destinando 8 billones de pesos para el mejoramiento y mantenimiento de estas. El objetivo es aumentar la conexión entre territorios y poblaciones, promoviendo oportunidades y beneficios entre las regiones más desarrolladas y las subdesarrolladas.

En colaboración con Agregados y Mezclas CACHIBÍ S.A.S, la Universidad del Valle busca una solución innovadora para los desafíos de la red vial terciaria en nuestro país. En lugar del convencional pavimento compuesto de asfalto y hormigón, que genera emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos durante su fabricación, se propone una alternativa amigable con el medio ambiente. Esta alternativa consiste en aprovechar el material granular proporcionado por la cantera lo que no solo reduce el impacto ambiental, sino también los costos de implementación. El objetivo final de esta propuesta es obtener un material granular estabilizado que cumpla con los requisitos técnicos para resistir las condiciones de uso y el clima. Al mismo tiempo, se busca mejorar la conectividad entre las zonas rurales y urbanas, reducir los tiempos de recorrido y promover un desarrollo más equitativo y sostenible.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Propiedades del suelo

Debido a la variabilidad de suelos que nos ofrece la naturaleza, el ingeniero se enfrenta a la decisión crucial de seleccionar con cuál trabajar. Esta elección puede recaer en el suelo existente en la obra o en un suelo proveniente de una cantera o distribuidor. Además de esta decisión, se debe determinar si el suelo se manejará en su estado actual o si se modificarán sus propiedades para obtener resultados óptimos.

Existen diversas técnicas para estabilizar o mejorar las propiedades mecánicas de los suelos. Entre ellas se encuentran la estabilización por drenaje, el empleo de calor y calcinación, así como la estabilización lograda mediante la adición de cemento, cal, asfalto o aditivos químicos.

Al considerar la estabilización o mejora de los suelos, es crucial tener en cuenta ciertas propiedades fundamentales. Estas propiedades son: Estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad (Montejo, 2002).

2.1.1 Estabilidad volumétrica

La expansión y contracción de suelos, causadas por cambios en la humedad, pueden ocurrir rápidamente, con variaciones estacionales o debido a la actividad del ingeniero. Sin control, estas expansiones pueden provocar deformaciones y rupturas en pavimentos y otras estructuras. Por lo tanto, es crucial identificar suelos expansivos, conocer su composición y aplicar el tratamiento adecuado (Montejo, 2002).

2.1.2 Resistencia

En general, la resistencia de los suelos disminuye con un mayor contenido de humedad, aunque los suelos arcillosos pueden alcanzar altas resistencias al secarse, especialmente cuando se calientan durante la fabricación de materiales como ladrillos. Sin embargo, la disminución de la humedad puede reducir la resistencia, como se

observa en deslizamientos de tierra causados por arcillas agrietadas. La acción abrasiva del tráfico puede pulverizar y despojar de cohesión a un material cohesivo.

La resistencia en suelos arcillosos varía según la humedad y la energía de compactación. La compactación en seco puede resultar en un comportamiento elástico y resistencia alta, mientras que la compactación en húmedo puede dar lugar a resistencias bajas y comportamiento plástico debido a la repulsión entre partículas arcillosas. La forma de aplicar la energía de compactación es crucial, ya que impactos en suelos húmedos pueden reducir significativamente la resistencia en comparación con la compactación estática (Montejo, 2002).

2.1.3 Permeabilidad

Modificar significativamente la permeabilidad de formaciones de suelo es factible mediante métodos como compactación e inyección. En suelos arcillosos, el uso de defloculantes, como polifosfatos, reduce la permeabilidad, mientras que los floculantes, como hidróxido de cal o yeso, la aumentan.

La permeabilidad en suelos presenta dos problemas principales: la disipación de presiones de poro y el flujo de agua a través del suelo. Presiones de poro excesivas pueden provocar deslizamientos, mientras que el flujo de agua puede generar tubificaciones y arrastres.

La compactación de suelos arcillosos con humedad baja resulta en una alta permeabilidad debido a grumos que no se disgregan, permitiendo la formación de numerosos vacíos intersticiales. En cambio, mayores humedades de compactación conducen a menor permeabilidad, ya que el suelo tiene más posibilidades de deformarse, eliminando grandes vacíos (Montejo, 2002).

2.2 Consistencia del suelo

En 1900, Albert Mauritz Atterberg desarrolló un método para clasificar la consistencia de suelos de grano fino según los niveles de humedad. Esto resulta en cuatro estados del suelo: sólido, semisólido, plástico y líquido, dependiendo de la cantidad de humedad (Das y González, 2015).

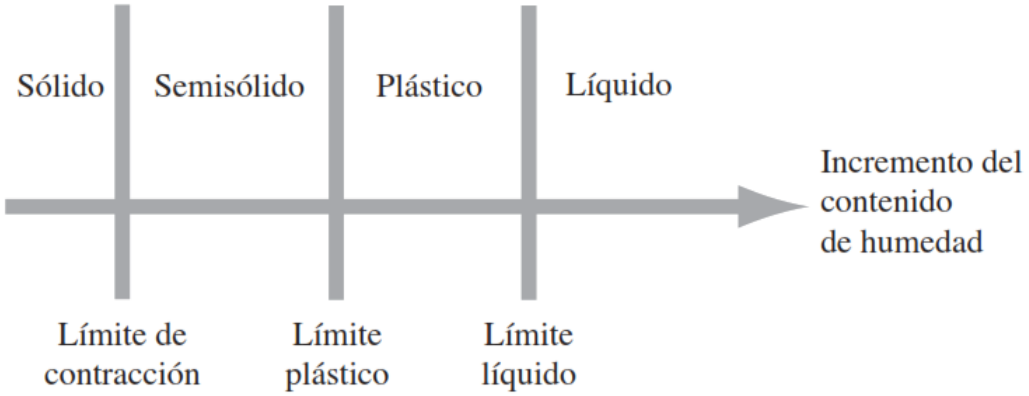


Figura 2.1.: Límites de Atterberg

2.2.1 Límite líquido (LL)

Porcentaje de contenido de humedad con que un suelo cambia, al disminuir su humedad, de la consistencia líquida a la plástica, o, al aumentar su humedad, de la consistencia plástica a la líquida.

2.2.2 Límite plástico (LP)

Contenido de agua del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido.

2.2.3 Índice de plasticidad (IP)

Rango de contenidos de agua, dentro del cual un suelo se comporta plásticamente. Numéricamente, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

$$IP = LL - LP \tag{2.1}$$

2.3 Clasificación del suelo

Los suelos que comparten propiedades similares pueden ser categorizados en grupos y subgrupos según sus características mecánicas y su comportamiento en ingeniería. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje estandarizado para

expresar de manera resumida las características generales de los suelos, evitando descripciones detalladas dada su infinita variedad. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, es ampliamente utilizado en aplicaciones ingenieriles, basándose en la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos (Das y González, 2015).

2.3.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS)

Este sistema, propuesto originalmente por Casagrande en 1948 para la construcción del aeródromo durante la Segunda Guerra Mundial, fue revisado en 1952 en colaboración con el U.S. Bureau of Reclamation. Actualmente, es ampliamente utilizado por ingenieros (Norma ASTM D-2487). El Sistema Unificado de Clasificación, clasifica los suelos en dos categorías principales: suelos de grano grueso (grava y arena) y suelos de grano fino (limos y arcillas), con símbolos de grupo que indican sus características. Los suelos de grano grueso tienen menos del 50 % que pasa por el tamiz núm. 200, mientras que los suelos de grano fino tienen 50 % o más que pasa por el mismo tamiz, con símbolos específicos para limos inorgánicos, arcillas inorgánicas, limos orgánicos y arcillas orgánicas, así como para suelos altamente orgánicos como la turba y el lodo (Das y González, 2015).

2.4 Estabilización del suelo

La estabilización de suelos es de suma importancia para la estructura de los pavimentos. Esto permite su correcto funcionamiento y capacidad de soportar las cargas de tránsito y las condiciones climáticas de la zona. El objetivo es proporcionar una capa de rodadura duradera y apta para transitar. Con el paso de los años, se han propuesto diversas metodologías para lograr mayor estabilidad, resistencia y durabilidad en los suelos. Destacan la estabilización con cal, aditivos, cemento y asfalto como las más comunes.

En 1987, el Doctor Dallas y su equipo desarrollaron un manual que ofrece al lector una alternativa para la construcción de pavimentos: la estabilización de suelos. Este manual proporciona una serie de guías para elegir el estabilizante adecuado y determinar la proporción requerida según las características del suelo. Dallas y su equipo proponen varios estabilizantes, como la cal, las cenizas volantes de cal, el asfalto, el cemento y combinaciones de estos. La estabilización ofrece ventajas como mejorar la resistencia, durabilidad y trabajabilidad de los suelos, además de reducir

los espesores del pavimento, lo que a su vez implica una disminución de los costos de construcción (Little et al., 1987).

2.4.1 Estabilización de suelos con cal

La cal es una forma económica de estabilizar el suelo. Los tipos de cal comúnmente utilizados son la cal hidratada de alto contenido de calcio, la cal dolomítica monohidratada, la cal viva de calcita y la cal dolomítica (Afrin, 2017). La elección de estos tipos de cal depende de las propiedades del suelo y de los objetivos deseados.

El artículo "Soil Stabilization Using Lime"(Negi et al., 2013) se centra en mejorar las propiedades técnicas del suelo mediante el uso de cal. Explica que la reutilización de los materiales presentes en el lugar puede resultar difícil debido a las características geotécnicas cambiantes del suelo, especialmente cuando contiene altos niveles de limo y arcilla. Estos suelos tienden a hincharse y volverse plásticos en presencia de agua, y a contraerse cuando están secos. Ante estas características, Ankit Singh Negi y su equipo proponen el uso de cal para modificar las propiedades del suelo, brindándole mayor resistencia y estabilidad a largo plazo. Las mejoras observadas en los suelos estabilizados con cal incluyen:

- El suelo pasa de estar dentro del límite plástico, a estar en estado sólido, lo cual facilita diferentes actividades como la excavación, la compactación y la nivelación del terreno. La figura 2.2, muestra el cambio de estado luego del uso de la cal.

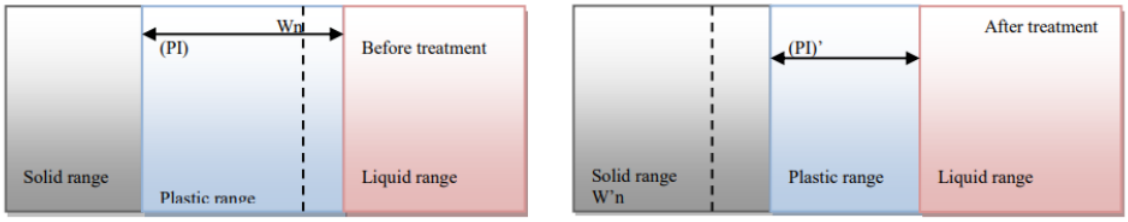


Figura 2.2.: Cambio de estado luego del uso de la cal

- Mejora la capacidad portante del suelo, en donde el CBR del suelo aumenta entre 4 y 10 veces respecto al del suelo no tratado.

El aumento de la capacidad portante para nuestra investigación es de suma importancia, ya que el documento de Mejoramiento de Vías Terciarias, Vías de Tercer

Orden (Departamento Nacional de Planeación, 2021), realizado Departamento de Nacional de Desarrollo en colaboración con Invias, recalcan que unas de las condiciones para presentar un proyecto de mejoramiento de vía terciaria, es que el CBR de la subrasante a utilizar sea mínimo de 3 %.

2.4.2 Estabilización de suelos con cemento

El cemento se utiliza ampliamente en la estabilización de suelos debido a sus propiedades de unión y endurecimiento. Cuando se agrega cemento al suelo, reacciona con el agua presente, formando compuestos químicos que actúan como agentes de unión, mejorando la cohesión y resistencia del suelo.

La estabilización del suelo con cemento implica unir las partículas del suelo mediante la reacción de hidratación del cemento. Esta reacción transforma las partículas de cemento en cristales que se entrelazan entre sí, generando una resistencia considerable a la compresión.

La combinación de cemento y agua provoca una expansión de las partículas de cemento, lo que reduce los espacios vacíos presentes en el suelo, aumentando su impermeabilidad. Además, endurece la mezcla, mejorando la resistencia al corte y la capacidad de carga del suelo.

Por otro lado, la estabilización con cemento ayuda a disminuir el límite líquido del suelo, lo que aumenta su índice de plasticidad (Afrin, 2017).

2.4.3 Estabilización de suelos con asfalto

La estabilización de los suelos con material asfáltico se puede dar de distintas formas, como por ejemplo en 2001, cuando Ibrahim Mohammed Asi propuso la estabilización del suelo sebkha con asfalto espumado y emulsionado. Los resultados de esta investigación se resumen en que el asfalto espumado sirve como alternativa para mejorar las propiedades del suelo sebkha de baja calidad y, a su vez, como investigación se le añadió un porcentaje de cemento tanto al asfalto espumado como al emulsionado y los resultados fueron aún mejores. Esta combinación cemento-asfalto proporciona al suelo más resistencia a la compresión y reduce la pérdida de estabilidad en presencia de agua. Esto se traduce en el aumento de la cohesión entre los materiales (Asi, 2001).

2.4.4 Estabilización de suelos con aditivos químicos

La modificación de las propiedades químicas de los suelos es comúnmente utilizada en la construcción de vías con el fin de mejorar las características mecánicas de los materiales utilizados para la base, subbase o subrasante de los pavimentos (Katz et al., 2001).

Se espera obtener mejoras en los suelos al añadirles aditivos químicos, similares a las obtenidas al estabilizarlos con cemento, cal o asfalto. Sin embargo, esto no siempre es así. Diversos estudios han investigado el impacto de aditivos químicos estabilizantes a base de enzimas, aceite sulfonado e iónico, y han llegado a varias hipótesis. En general, es crucial seleccionar cuidadosamente el estabilizante a utilizar, conocer su ficha técnica y sus componentes, debido a la amplia variabilidad de componentes en los suelos. Al mezclarlos con aditivos, los resultados pueden ser los esperados, como el aumento de la resistencia a la compresión y cambios significativos en los límites de Atterberg, entre otros. Sin embargo, en muchas ocasiones, los cambios en las propiedades de los suelos no son significativos (Mgangira, 2009) (Onyejekwe y Ghataora, 2015) (Gautam et al., 2020).

2.5 Pavimentos

Un pavimento se compone de capas horizontales superpuestas y compactadas, que se apoyan sobre la subrasante de una vía, preparada mediante el movimiento de tierras. Estas capas deben soportar las cargas repetitivas del tránsito durante su vida útil.

Para cumplir sus funciones adecuadamente, un pavimento debe ser resistente a las cargas vehiculares y a los factores climáticos, poseer una textura superficial adecuada para la velocidad del tránsito, resistir el desgaste de las llantas y mantener una superficie regular que proporcione comodidad. También debe ser duradero, contar con un buen drenaje, moderar el ruido de rodadura, ser económico y tener un color que evite reflejos, garantizando seguridad vial. En la construcción vial, los pavimentos más comunes son los rígidos y los flexibles (Montejo Fonseca et al., 2006).

2.6 Antecedentes

Con el propósito de llevar a cabo un análisis que incorpore distintas metodologías y aditivos para la estabilización de materiales granulares, con el objetivo de que estos sean adecuados para su empleo tanto en capas de rodadura como en capas estructurales de pavimentos, se procedió a la revisión de varios estudios previos.

Estabilización de suelo con cal y cemento para el mejoramiento de subrasante

El objetivo de este trabajo es determinar el porcentaje óptimo de cal y cemento para la estabilización de la subrasante. La investigación propone tres diferentes porcentajes de cal (1 %, 2 % y 3 %) en relación con el peso seco del material granular de la subrasante, y tres porcentajes de cemento (2 %, 3 % y 4 %) también en función del peso seco del mismo material.

De acuerdo con los resultados de los límites de consistencia del suelo en su estado natural y del suelo tratado con cal, se observa que los valores obtenidos tras la adición de cal son inferiores a los del suelo natural, lo que indica una notable reducción del límite líquido y del índice plástico a medida que aumenta la proporción de cal en el material. Además, se destaca que el suelo-cemento adquiere mayor resistencia a medida que se incrementa la cantidad de cemento añadido (Zambrano Bravo y Zambrano Meza, 2023).

Estudio Comparativo empleando el aditivo PROES y CONSOLID para la estabilización de suelos en caminos vecinales, 2018

En la tesis, se realizó una comparación entre los aditivos PROES y CONSOLID aplicados en un tramo de 1 km del camino vecinal Cedro Pampa - Villa Rica, en el distrito de Villa Rica, provincia de Oxapampa. Se realizaron ensayos de campo con dos calicatas de 1.5 m de profundidad, encontrando suelos arcillosos clasificados como CH (arcilla de alta plasticidad) y CL (arcilla de baja plasticidad) según SUCS.

Para el ensayo de CBR, se utilizó una mezcla de 70 % de material arcilloso y 30 % de material granular, añadiendo al suelo el aditivo PROES en dosificaciones de 0.30 l/m^3 y 0.35 l/m^3, ambas con 50 kg/m^3 de cemento Portland. Por su parte, el aditivo CONSOLID, compuesto por CONSOLID 444 y SOLIDRY, se dosificó con 0.0045 % de CONSOLID 444 y 1.5 % o 2 % de SOLIDRY, manteniendo la misma proporción de mezcla de suelos.

Los resultados mostraron que el aditivo PROES proporcionó una mejor capacidad de soporte, alcanzando un CBR de 45.7 % al 95 % de compactación, mientras que el aditivo CONSOLID alcanzó un CBR de 36.2 % al 95 % de compactación, lo que indica un mejor desempeño del PROES en la estabilización del suelo (Chávez Pajuelo, 2018).

Estudio de la técnica de suelo-cemento para la estabilización de vías terciarias en Colombia que posean un alto contenido de caolín

Este proyecto investigativo se centra en analizar la técnica de estabilización suelo-cemento y su comportamiento mecánico en suelos arcillosos, utilizando caolín, un mineral estable derivado de la caolinita, como suelo tipo. Se incorporan porcentajes de cemento que van del 0 % al 12 % en peso para evaluar la resistencia de la mezcla. Para ello, se moldean cuerpos de prueba que se someten a ensayos de compresión y tensión indirecta, considerando tiempos de curado de 7, 14 y 28 días para estudiar cómo la rigidez cambia a lo largo del tiempo.

El objetivo es investigar el impacto del cemento en suelos blandos y evaluar la viabilidad de esta técnica en suelos finos, con la posibilidad de sustituir la capa de subbase en pavimentos si se logran resistencias adecuadas (García-Toro, 2019).

Resultados destacados del estudio incluyen:

- El cemento actúa como un eficaz estabilizador del suelo, mejorando significativamente la resistencia bajo cargas monotónicas en mezclas con más del 8 % de cemento.
- Es crucial garantizar un contenido óptimo de agua y un tiempo de curado adecuado para maximizar la resistencia. En mezclas con 12 % de cemento, se observó una disminución de resistencia cuando el tiempo de curado era insuficiente.
- La mayor resistencia a la compresión inconfinada se logró a los 28 días de curado con un contenido del 12 % de cemento, alcanzando una resistencia última de 2.42 MPa.

Additives for soil-cement stabilization

Este estudio examina cómo el uso de cloruro sódico (NaCl) y cloruro cálcico (CaCl2) puede mejorar la ganancia de resistencia de suelos estabilizados con cemento a bajas temperaturas (2°C y 10°C), donde las reacciones cementantes suelen ralentizarse. Los resultados varían según el tipo de suelo, con aumentos y disminuciones en la resistencia a la compresión no confinada a temperaturas de curado de 3 y 7 días.

Por ejemplo, en un suelo del condado de Johnston, Carolina del Norte, la mezcla con 6 % de cemento Portland y 1.5 % de NaCl aumentó la resistencia de 1748 kPa a 2303 kPa cuando se curó a 10°C durante 7 días. Sin embargo, otros suelos, como los del condado de Buncombe, reaccionaron negativamente a la adición de NaCl. Del mismo modo, se observó un comportamiento variable con CaCl2, ya que en algunos casos mejoraba la resistencia y en otros la reducía.

Se concluye que el contenido de arcilla y la composición del suelo son factores determinantes en la eficacia de los aditivos químicos. Además, es posible que exista una dosificación óptima de NaCl y CaCl2, más allá de la cual el uso de estos aditivos podría disminuir la resistencia, lo que sugiere la necesidad de un análisis más detallado sobre la interacción entre el tipo de suelo y los aditivos (Bowers et al., 2013).

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología que se llevó a cabo para determinar el comportamiento de una roca muerta y de un material estéril al adicionarles diferentes porcentajes de cemento y aditivo.

El procedimiento consiste en las siguientes fases:

- Descripción de los materiales.
- Ensayos de caracterización para la roca muerta y material estéril definidos por el artículo 350 de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022.
- Ensayos de durabilidad y resistencia a las probetas realizadas con el material granular y con los distintos porcentajes de cemento y aditivo en el diseño de la mezcla.
- Resultados de los ensayos de caracterización, durabilidad y resistencia.

3.1 Materiales

3.1.1 Roca muerta y material estéril

- **Roca muerta:** Estos son suelos cementados constituidos por arcillas presentando una variedad en su composición, son buenos suelos para cimentar.
- **Estéril:** Es todo material sin valor económico extraído para permitir la explotación del mineral útil. Los estériles son de los más variados tipos: la capa superficial del suelo es considerada un estéril en minería (aunque sea el soporte de la vegetación), así como las rocas encajantes

La extracción del material proviene de la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, ubicada en la antigua vía entre Cali y Yumbo. El material fue transportado en bultos a la Universidad del Valle para realizar los respectivos ensayos.



Figura 3.1.: Localización de la zona de extracción del material
Fuente: Google Maps y sitio web de Agregados y Mezclas Cachibí.



Figura 3.2.: Sitio de extracción del material
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Cemento de uso general

El cemento Portland Tipo I es el más utilizado y versátil de su clase en el mercado. Está compuesto principalmente por clínker, que se obtiene al triturar una mezcla de piedra caliza y arcilla, con la adición de pequeñas cantidades de yeso y otros componentes para controlar el tiempo de fraguado. Este cemento es valorado por su elevada resistencia y durabilidad, lo que lo convierte en una opción ideal para diversas aplicaciones en la construcción. Desde la elaboración de concreto para pavimentos, cimientos y estructuras hasta aplicaciones decorativas, el cemento Portland Tipo I destaca por ofrecer una resistencia adecuada tanto inicial como final en diferentes condiciones y entornos.

3.1.3 Terrasil de Optimasoil

Es un aditivo para suelos de última generación, formado al 100 % por organosilanos, capaz de repeler el agua, eliminar el hinchamiento y la absorción de suelos. Es, por tanto, un agente impermeabilizante de suelos, que aporta ventajas adicionales a la estabilización tradicional de suelos.

Tabla 3.1.: Características físicas del Terrasil

Característica	**Valor**
Forma	Líquida
Color	Rojizo pálido
Punto de inflamación	>90°C (recipiente cerrado)
Punto de ebullición	200°C
Propiedad explosiva	No explosivo
Densidad	1,04 g/ml
Viscosidad (25°C)	100-500 cps

Fuente: Ficha técnica del producto

3.2 Caracterización de los materiales

Se llevaron a cabo diversos ensayos en el material granular con el objetivo de caracterizarlo y clasificarlo, para determinar si cumple con los requisitos establecidos para los materiales que serán tratados con cemento (ver Tabla 1 del Artículo 350 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022).

Se selecciona un material de clase 1 para ser estabilizado con cemento y aditivo, ya que se busca caracterizar los materiales para determinar su idoneidad como capa estructural y como superficie de rodadura, especialmente en el caso de un pavimento monocapa.

Tabla 3.2.: Ensayos de caracterización

Norma de ensayo	
INV E - 123	Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos
INV E - 125	Determinación del límite líquido de los suelos
INV E - 126	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos
INV E - 133	Equivalente de arena de los suelos y agregados finos
INV E - 142	Relaciones humedad - peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación)
INV E - 148	CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada

3.2.1 Granulometría

Con el objetivo de cuantificar la distribución del tamaño de partículas en el suelo, se llevó a cabo el ensayo de granulometría conforme al procedimiento especificado en la norma INV E - 123 - 13. Se extrajo una muestra representativa de suelo seco al horno, los cuales fueron sometidos a un lavado a través del tamiz No 200 para eliminar y cuantificar las partículas finas presentes.

El material que quedó atrapado en el tamiz No 200 fue recogido y colocado en un recipiente, luego se volvió a colocar en el horno para su secado. Una vez el material estuvo completamente seco, se procedió a pesarlo para determinar el porcentaje de material que se perdió durante el proceso de lavado, en relación con el peso inicial. Si más del 50 % del material se pierde durante el lavado, se clasifica el suelo como fino.

Los gramos de material que fueron secados y retenidos se sometieron al proceso de tamizado utilizando las mallas recomendadas en la norma INV E - 123 - 13. Los resultados obtenidos de este análisis se detallan en la sección de resultados y análisis.

3.2.2 Límites de consistencia

La cantidad de humedad necesaria para que ocurra un cambio de estado varía entre distintos tipos de suelo, por lo tanto, es crucial comprender el rango de humedades en el cual el suelo exhibe un comportamiento plástico, es decir, la capacidad de deformarse sin romperse (plasticidad). El agua forma una capa alrededor de los granos, y el grosor de esta capa puede influir en los diferentes comportamientos del material. Cuando el contenido de agua es demasiado alto, el suelo carece de resistencia al esfuerzo cortante; sin embargo, esta resistencia aumenta a medida que el suelo pierde agua.

Límite líquido (LL)

Se llevó a cabo el procedimiento establecido en la norma INV E - 125 - 13, el cual implica el tratamiento de la muestra de suelo para eliminar cualquier fracción retenida en el tamiz No. 40. La determinación del límite líquido se efectúa mediante ensayos de penetración, en los que una porción de la muestra se dispersa sobre una cazuela de bronce dividida en dos secciones por medio de un ranurador, lo que permite que estas secciones fluyan hasta unirse nuevamente como resultado de un número de impactos causados por la caída repetida de la cazuela sobre una superficie normalizada. Se toma una muestra representativa de la cazuela de la sección que se unió para determinar su humedad. La finalidad de este procedimiento es obtener muestras con consistencias tales que al menos una de las determinaciones del número de golpes requeridos para cerrar la ranura del suelo se halle en cada uno de los siguientes intervalos: 25–35, 20–30 y 15–25.

Límite plástico (LP)

Este ensayo se realizó con el mismo material preparado para la determinación del limite líquido. El límite plástico se determinó al presionar repetidamente una pequeña porción de suelo húmedo hasta formar rollos de 3.2 mm (1/8") de diámetro. El contenido de agua fue reducido hasta que los rollos comenzaron a agrietarse. El límite plástico es la menor cantidad de humedad con la que se pueden formar los rollos de este diámetro sin que se agrieten o desmoronen.

3.2.3 Equivalente de arena

Se utilizó el método especificado en la norma INV E - 133 para determinar el porcentaje de arena en los materiales analizados. Este ensayo tiene como objetivo establecer, bajo condiciones estandarizadas, las proporciones relativas de polvo y materiales arcillosos o finos plásticos presentes en suelos o agregados finos con un tamaño menor a 4.75 mm. El procedimiento consiste en colocar un volumen estandarizado de suelo o agregado fino, junto con una pequeña cantidad de solución floculante, en un cilindro graduado de plástico y agitarlo. Este paso permite que las partículas de arena se liberen del recubrimiento de material arcilloso o similar. Luego, la muestra se enjuaga con más solución floculante para suspender el material arcilloso o similar sobre la arena. Después de un período de sedimentación, se miden las alturas de las capas de material arcilloso y fino floculado, así como la de la arena en el cilindro. El porcentaje de arena se calcula estableciendo la relación entre la altura de la capa de arena y la altura de la capa de arcilla, expresada en porcentaje. El término equivalente de arena, se refiere al concepto de que la mayoría de los suelos granulares y los agregados finos son mezclas de arena y partículas gruesas deseables, y de polvo y finos arcillosos o plásticos indeseables.

3.2.4 Compactación - Proctor modificado

Con el propósito de establecer la humedad ideal para alcanzar la máxima densidad del suelo, se llevó a cabo el ensayo de proctor modificado siguiendo las pautas de la norma INV E - 142 - 13, método C.

En primer lugar, se procedió a la preparación de la muestra, la cual implicó secar el suelo en un horno y posteriormente tamizarlo mediante un tamiz de 3/4".

Se compactaron 4 moldes metálicos, cada uno en cinco capas, utilizando 56 golpes en cada capa. Cada capa fue escarificada para garantizar la adherencia entre ellas. La humedad en cada molde varió. Después de la compactación, cada molde se enraizó, pesó y se tomó un testigo de humedad conforme a la norma INV E - 122 - 13. El peso unitario de la muestra seca y el porcentaje de humedad se determinaron de la siguiente manera, respectivamente:

$$\gamma d = \frac{\gamma h}{1 + \frac{w}{100}} \tag{3.1}$$

$$w = \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_R} \cdot 100 \tag{3.2}$$

Donde:

γd: Peso unitario de la muestra seca. $[g/cm^3]$
γh: Peso unitario de la muestra húmeda. $[g/cm^3]$
w: Humedad de la muestra. $[\%]$
w_1: Peso del recipiente y de la muestra húmeda. $[g]$
w_2: Peso del recipiente y de la muestra seca. $[g]$
w_R: Peso del recipiente. $[g]$

3.3 Resistencia de los materiales

Para seleccionar la mezcla óptima de material granular tratado con cemento (y aditivo), se realizaron múltiples ensayos de durabilidad y resistencia en probetas elaboradas con diferentes porcentajes de cemento. El objetivo fue intentar cumplir con los criterios de diseño para la Clase 1 de material estabilizado con cemento, según la Tabla 6 del Artículo 350 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022.

Tabla 3.3.: Ensayos de resistencia

Norma de ensayo	
INV E - 612	Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo - cemento
INV E - 614	Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo - cemento

3.3.1 Compresión de probetas

Se realizaron probetas de roca muerta y material estéril, a las cuales se les adicionó un determinado porcentaje de cemento, para ser ensayadas a compresión simple a los 7 días y 28 días. Antes de ser ensayadas, las probetas fueron sumergidas en agua durante 4 horas.

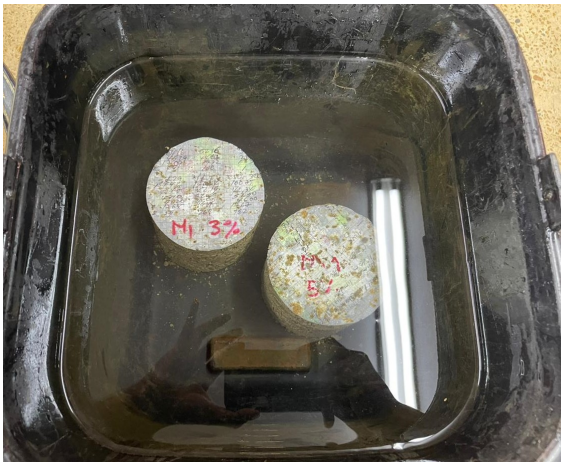


Figura 3.3.: Probetas de roca muerta - cemento sumergidas en agua

Después de transcurridas las 4 horas, las probetas fueron llevadas a la máquina de compresión simple, se aseguró el contacto entre la probeta y la máquina, se puso el deformímetro en ceros y con la palanca manual se comenzó a transmitir un esfuerzo axial a una velocidad constante de 50x10 pg/min hasta que la muestra falló. Durante este proceso, se tomaron datos de esfuerzo y deformación.



Figura 3.4.: Probeta de roca muerta - cemento luego del fallo a compresión simple

3.3.2 Durabilidad de probetas

Con el objetivo de determinar las pérdidas, cambios en la humedad y variaciones de volumen (expansión y contracción) provocados por el ciclo repetido de humedecimiento y secado de especímenes endurecidos de suelo-cemento, se compactan dos probetas por cada dosificación de suelo-cemento y suelo-cemento-aditivo. La primera probeta se utiliza para medir los cambios de volumen y humedad del espécimen, mientras que la segunda se emplea para determinar la pérdida de material (raspando toda su superficie con un cepillo de cerdas de alambre). Las probetas se someten a 12 ciclos de humedecimiento y secado, conforme a lo establecido en la norma INV E-612.



Figura 3.5.: Probetas del ensayo de durabilidad

En la Figura 3.5 se observa que la probeta de la izquierda se utiliza para determinar la pérdida de material, mientras que la probeta de la derecha se emplea para medir los cambios de volumen y humedad.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Características del suelo natural

Debido a las posibles variaciones en los materiales de los estratos superiores (estéril y roca muerta) en la zona de voladura de la cantera, se llevaron a cabo dos muestreos separados por un período de aproximadamente 11 meses para verificar cualquier cambio que pudieran presentar.

4.1.1 Resultados del ensayo de granulometría

Roca Muerta

Para el primer muestreo de material de roca muerta suministrado por la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, el peso inicial de la muestra es de 10993 gramos. Después de ser lavada por el tamiz No. 200 y secada en el horno, la muestra pesa 10309 gramos.

Los 10309 gramos fueron tamizados por las mallas: 75 mm (3"), 37.5 mm (1-½"), 19.0 mm (¾"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (No. 4), 2.36 mm (No. 8), 1.10 mm (No. 16), 0.6 mm (No. 30), 0.3 mm (No. 50), 0.15 mm (No. 100) y 0.075 mm (No. 200). Aunque teóricamente no deberían existir partículas que pasen la malla No. 200, en el proceso de tamizado se encontró que 24.50 gramos pasaron por esta malla. Esto se debe a que en el lavado algunas partículas no se disgregaron completamente y, durante el tamizado, se trituraron hasta tamaños con diámetros inferiores a 0.075 mm.

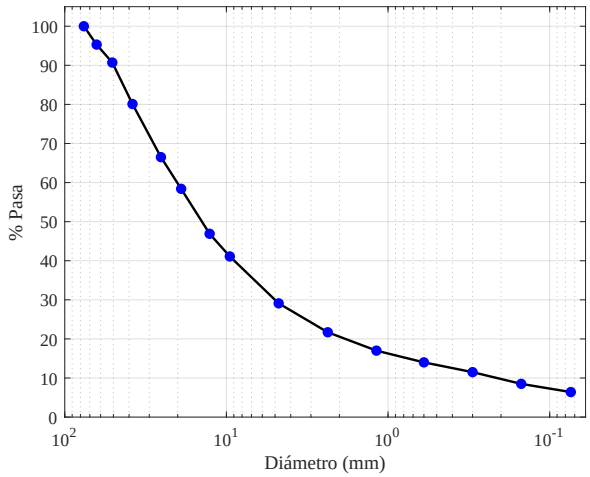


Figura 4.1.: Curva granulométrica roca muerta (1er muestreo)

De acuerdo con granulometría como se muestra en la Figura 4.1, el suelo tamizado se clasifica como grava.

Para el segundo muestreo de material de roca muerta suministrado por la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, el peso inicial de la muestra es de 3,173 gramos. Después de ser lavada por el tamiz No. 200 y secada en el horno, la muestra pesa 3,020 gramos.

Los 3,020 gramos fueron tamizados por las mallas mencionadas anteriormente. Durante el proceso de tamizado, se encontró que 3.00 gramos pasaron por la malla No. 200.

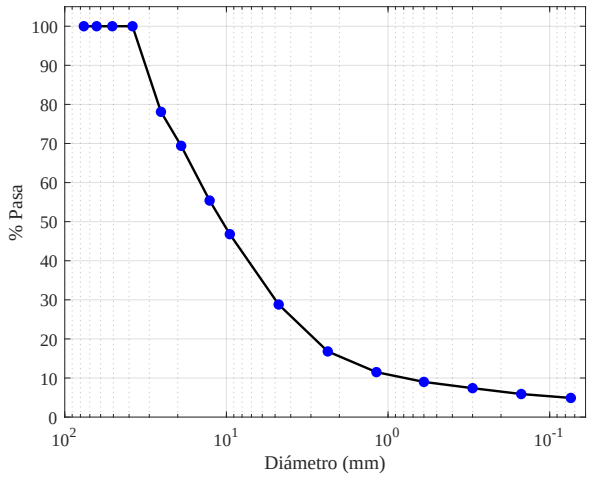


Figura 4.2.: Curva granulométrica roca muerta (2do muestreo)

De acuerdo con granulometría como se muestra en la Figura 4.2, el suelo tamizado se clasifica como grava.

Aunque ambos muestreos de roca muerta se clasificaron como suelos gruesos, específicamente como grava, los diámetros de las partículas fueron distintos. Al comparar las curvas granulométricas de las Figuras 4.1 y 4.2, se observa que en el primer muestreo, las partículas de roca muerta presentaron un tamaño mayor y una distribución más amplia en comparación con las del segundo muestreo.

Estéril

Para el primer muestreo de material estéril suministrado por la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, el peso inicial de la muestra es de 5455 gramos. Después de ser lavada por el tamiz No. 200 y secada en el horno, la muestra pesa 4804.6 gramos.

Los 4804.6 gramos fueron tamizados por las mallas: 75 mm (3"), 37.5 mm (1-½"), 19.0 mm (¾"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (No. 4), 2.36 mm (No. 8), 1.10 mm (No. 16), 0.6 mm (No. 30), 0.3 mm (No. 50), 0.15 mm (No. 100) y 0.075 mm (No. 200). Durante el proceso de tamizado, se encontró que 24.50 gramos pasaron por la malla No. 200.

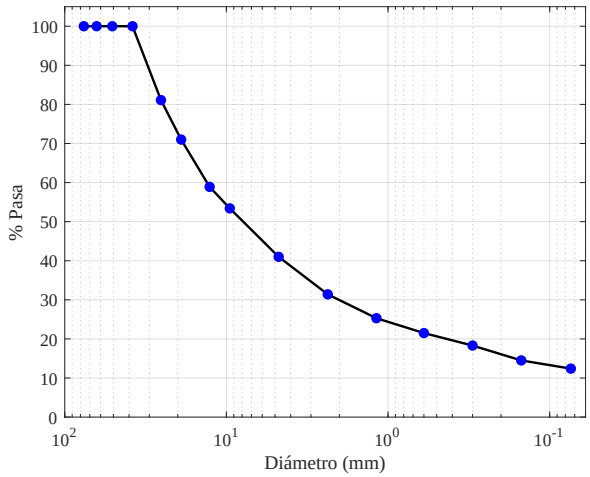


Figura 4.3.: Curva granulométrica estéril (1er muestreo)

De acuerdo con granulometría como se muestra en la Figura 4.3, el suelo tamizado se clasifica como grava.

Para el segundo muestreo de material estéril suministrado por la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, el peso inicial de la muestra es de 1816 gramos. Después de ser lavada por el tamiz No. 200 y secada en el horno, la muestra pesa 1705.5 gramos.

Los 1705.5 gramos fueron tamizados por las mallas mencionadas anteriormente. Durante el proceso de tamizado, se encontró que 3.00 gramos pasaron por la malla No. 200.

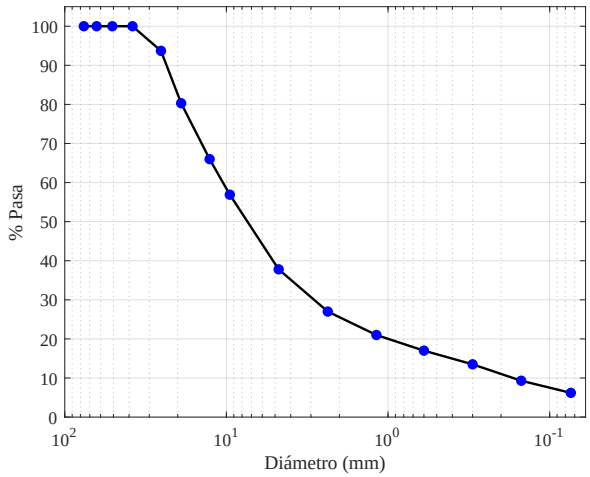


Figura 4.4.: Curva granulométrica estéril (2do muestreo)

De acuerdo con granulometría como se muestra en la Figura 4.4, el suelo tamizado se clasifica como grava.

Al comparar las curvas granulométricas de las Figuras 4.3 y 4.4, se observa que ambas muestras de suelo exhiben una distribución homogénea en el tamaño de las partículas, lo que sugiere una composición y origen geológico compartido. Esta uniformidad puede indicar que las propiedades mecánicas, como la compactación y estabilidad, serán equivalentes, lo que derivaría en un comportamiento similar bajo condiciones de carga y esfuerzo.

4.1.2 Resultados del ensayo de límites de consistencia

Roca Muerta

Para el primer muestreo de material de roca muerta suministrado por la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, se presentan los siguientes resultados:

Límite líquido: En la Figura 4.5 se grafican los resultados obtenidos del ensayo, donde se muestra la humedad y el número de golpes con los cuales las dos mitades de la pasta de suelo se pusieron en contacto en el fondo de la ranura.

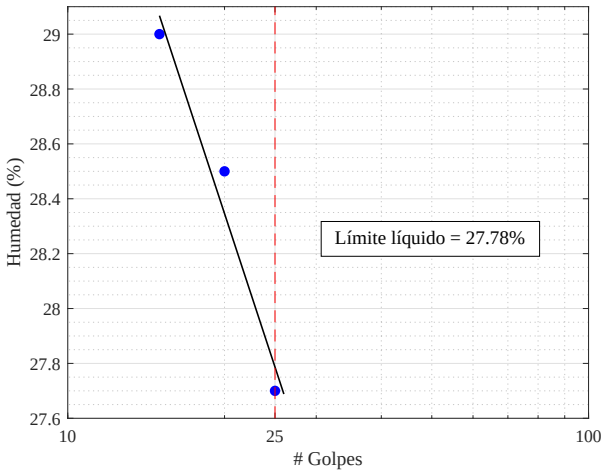


Figura 4.5.: Límite líquido roca muerta (1er muestreo)

Según la Figura 4.5, el porcentaje de humedad (límite líquido) correspondiente a los 25 golpes es de 28 %.

Límite plástico: Se toman testigos de humedad de los rollos de suelo. Los datos y cálculos se muestran la Tabla 4.1:

Tabla 4.1.: Límite plástico roca muerta (1er muestreo)

	Muestra 1	Muestra 2
P_1 (gr)	28.85	30.48
P_2 (gr)	27.06	28.30
P_3 (gr)	18.68	17.89
Humedad %	21.36	20.94

Donde:

P_1: Peso de recipiente + muestra húmeda

P_2: Peso de recipiente + muestra seca

P_3: Peso de recipiente

De acuerdo a la Tabla 4.1, el valor correspondiente al límite plástico es 21 %, este valor es el promedio de las 2 humedades que parecen en dicha tabla.

Índice de plasticidad: Tomando los valores de límite líquido y el límite plástico hallados, se calcula el índice de plasticidad (IP), mediante la Formula 2.1, dando como resultado:

IP: 7 %

Para el segundo muestreo de material de roca muerta, se presentan los siguientes resultados:

Límite líquido: En la Figura 4.6 se grafican los resultados obtenidos del ensayo.

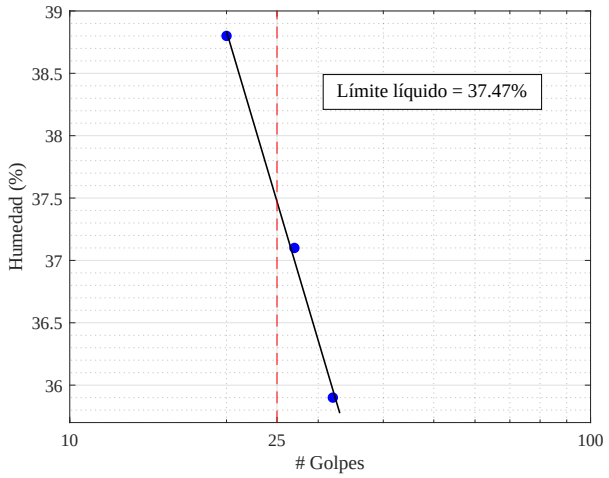


Figura 4.6.: Límite líquido roca muerta (2do muestreo)

Según la Figura 4.6, el porcentaje de humedad (límite líquido) correspondiente a los 25 golpes es de 37 %.

Límite plástico: Se toman testigos de humedad de los rollos de suelo. Los datos y cálculos se muestran la Tabla 4.2:

Tabla 4.2.: Límite plástico roca muerta (2do muestreo)

	Muestra 1	Muestra 2
P_1 (gr)	26.82	25.16
P_2 (gr)	24.92	23.78
P_3 (gr)	16.47	17.61
Humedad %	22.49	22.37

De acuerdo a la Tabla 4.2, el valor correspondiente al límite plástico es 22 %.

Índice de plasticidad: Tomando los valores de límite líquido y el límite plástico hallados, se calcula el índice de plasticidad (IP), mediante la Formula 2.1, dando como resultado:

IP: 15 %

De acuerdo con los resultados, se observa que en ambos muestreos el límite plástico es casi similar. Sin embargo, se registró un incremento considerable en el límite líquido en el segundo muestreo respecto al primero, lo que ocasiona una diferencia notable en el índice de plasticidad. Esto podría deberse a la mayor presencia de partículas de menor diámetro en el segundo muestreo, lo que implica una reducción en la capacidad portante y una mayor susceptibilidad a la deformación bajo cargas de compresión.

Estéril

Para el primer muestreo de material estéril suministrado por la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, se presentan los siguientes resultados:

Límite líquido: En la Figura 4.7 se grafican los resultados obtenidos del ensayo, donde se muestra la humedad y el número de golpes con los cuales las dos mitades de la pasta de suelo se pusieron en contacto en el fondo de la ranura.

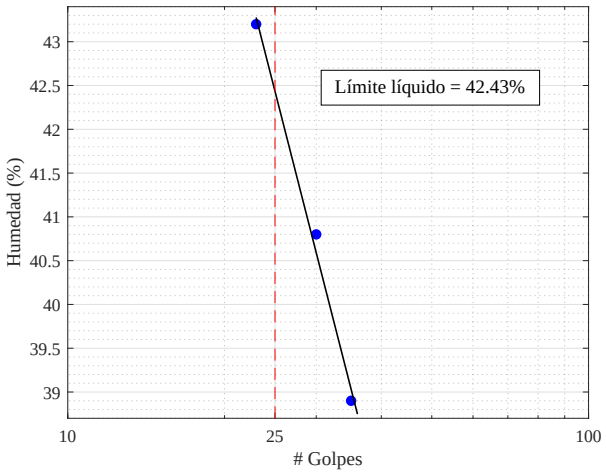


Figura 4.7.: Límite líquido estéril (1er muestreo)

Según la Figura 4.7, el porcentaje de humedad (límite líquido) correspondiente a los 25 golpes es de 42 %.

Límite plástico: Se toman testigos de humedad de los rollos de suelo. Los datos y cálculos se muestran la Tabla 4.3:

Tabla 4.3.: Límite plástico estéril (1er muestreo)

	Muestra 1	Muestra 2
P_1 (gr)	26.31	24.66
P_2 (gr)	24.73	23.27
P_3 (gr)	17.23	16.74
Humedad %	21.07	21.29

De acuerdo a la Tabla 4.3, el valor correspondiente al límite plástico es 21 %, este valor es el promedio de las 2 humedades que parecen en dicha tabla.

Índice de plasticidad: Tomando los valores de límite líquido y el límite plástico hallados, se calcula el índice de plasticidad (IP), mediante la Formula 2.1, dando como resultado:

IP: 21 %

Para el segundo muestreo de material estéril, se presentan los siguientes resultados:

Límite líquido: En la Figura 4.8 se grafican los resultados obtenidos del ensayo.

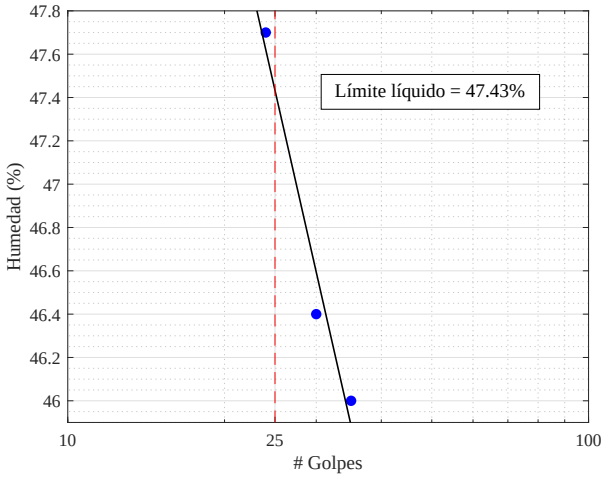


Figura 4.8.: Límite líquido estéril (2do muestreo)

Según la Figura 4.8, el porcentaje de humedad (límite líquido) correspondiente a los 25 golpes es de 47 %.

Límite plástico: Se toman testigos de humedad de los rollos de suelo. Los datos y cálculos se muestran la Tabla 4.4:

Tabla 4.4.: Límite plástico roca muerta (2do muestreo)

	Muestra 1	Muestra 2
P_1 (gr)	28.30	27.90
P_2 (gr)	25.80	25.28
P_3 (gr)	16.30	15.47
Humedad %	26.32	26.71

De acuerdo a la Tabla 4.4, el valor correspondiente al límite plástico es 27 %.

Índice de plasticidad: Tomando los valores de límite líquido y el límite plástico hallados, se calcula el índice de plasticidad (IP), mediante la Formula 2.1, dando como resultado:

$$\text{IP: } 20\,\%$$

Los resultados de los índices de plasticidad de ambos muestreos de material estéril presentan valores muy cercanos, lo que sugiere una capacidad de deformación similar sin fracturarse. Al superar el 20 %, ambos suelos probablemente se clasifiquen como arcillosos de plasticidad moderada a alta, lo que podría influir en su capacidad portante y comportamiento ante cambios en la humedad. Estos suelos tienden a ser más sensibles al agua, lo que afecta su expansividad, contracción y estabilidad, factores importantes en condiciones climáticas o de drenaje variables.

4.1.3 Clasificación del suelo

Tras obtener los resultados de granulometría y límites de consistencia de ambos muestreos de roca muerta y material estéril, se aplicó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para clasificarlos. A continuación, se presentan los resultados.

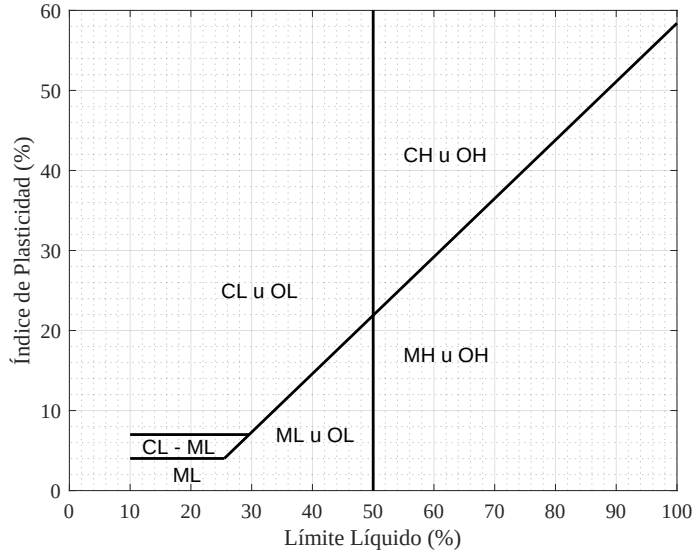


Figura 4.9.: Carta de plasticidad

Roca Muerta

Los resultados de granulometría y límites de consistencia obtenidos para el primer muestreo de roca muerta, necesarios para clasificar el suelo, se resumen en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5.: Propiedades roca muerta (1er muestreo)

Propiedad	**Valor**
Pasa tamiz No. 200 (%)	6.44
Límite líquido (%)	27.78
Índice de plasticidad (%)	6.63
Coeficiente de uniformidad (Cu)	95.01
Coeficiente de curvatura (Cc)	5.78

A partir de los resultados presentados en la Tabla 4.5 y utilizando la carta de plasticidad de la Figura 4.9, se determina que el material se clasifica como grava mal gradada con finos arcillosos (GP-GC).

Los resultados obtenidos para el segundo muestreo de roca muerta, necesarios para la clasificación del suelo, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.6.: Propiedades roca muerta (2do muestreo)

Propiedad	**Valor**
Pasa tamiz No. 200 (%)	4.90
Límite líquido (%)	37.47
Índice de plasticidad (%)	15.04
Coeficiente de uniformidad (Cu)	18.68
Coeficiente de curvatura (Cc)	2.24

A partir de los resultados presentados en la Tabla 4.6, se determina que el material se clasifica como grava bien gradada (GW).

Estéril

Los datos requeridos para la clasificacion del suelo de material estéril, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.7.: Propiedades material estéril (1er muestreo)

Propiedad	**Valor**
Pasa tamiz No. 200 (%)	12.4
Límite líquido (%)	42.43
Índice de plasticidad (%)	21.25
Coeficiente de uniformidad (Cu)	-
Coeficiente de curvatura (Cc)	-

A partir de los resultados presentados en la Tabla 4.7 y utilizando la carta de plasticidad de la Figura 4.9, se determina que el material se clasifica como grava arcillosa (GC).

Para el segundo muestreo del material estéril, los resultados necesarios se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.8.: Propiedades material estéril (2do muestreo)

Propiedad	**Valor**
Pasa tamiz No. 200 (%)	6.2
Límite líquido (%)	47.43
Índice de plasticidad (%)	20.92
Coeficiente de uniformidad (Cu)	62.31
Coeficiente de curvatura (Cc)	4.71

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 4.8 y con la ayuda de la carta de plasticidad de la Figura 4.9, el suelo de clasifica como grava mal gradada con finos arcillosos (GP-GC).

4.1.4 Resultados del equivalente de arena

Debido a la cantidad limitada de material en el primer muestreo de roca muerta y estéril, no fue viable efectuar el ensayo de equivalente de arena. No obstante, este se realizó en el segundo muestreo de ambos materiales, cuyos resultados se detallan a continuación:

Roca muerta

Los resultados del ensayo de equivalente de arena para la roca muerta se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9.: Equivalente de arena de la roca muerta

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Lectura nivel de arcilla (plg)	7.00	7.30	7.20
Lectura nivel de arena (plg)	3.80	3.60	3.50
Equivalente de arena	55 %	50 %	49 %

Promediando y redondeando al número entero próximo los resultados del ensayo de equivalente de arena, se obtiene que el valor para el segundo muestreo de roca es del 52 %.

Estéril

Los resultados del ensayo de equivalente de arena para el material estéril se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10.: Equivalente de arena del material estéril

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Lectura nivel de arcilla (plg)	8.40	8.70	8.30
Lectura nivel de arena (plg)	3.80	3.70	3.70
Equivalente de arena	46 %	43 %	45 %

Promediando y redondeando al número entero próximo los resultados del ensayo de equivalente de arena, se obtiene que el valor para el segundo muestreo de material estéril es del 45 %.

4.1.5 Resultados del ensayo de compactación

Este ensayo es crucial porque establece la densidad seca máxima que un suelo puede alcanzar y la humedad óptima requerida para lograr una compactación eficaz. Esto se traduce en una mayor estabilidad y resistencia del suelo, permitiéndole soportar cargas de compresión de manera más eficiente y mejorando su durabilidad.

Se realizaron ensayos para ambos muestreos de roca muerta y material estéril, cuyos resultados se presentan a continuación:

Roca muerta

La Figura 4.10 muestra la curva de compactación, donde se presentan los resultados obtenidos del ensayo de compactación del primer muestreo de roca muerta.

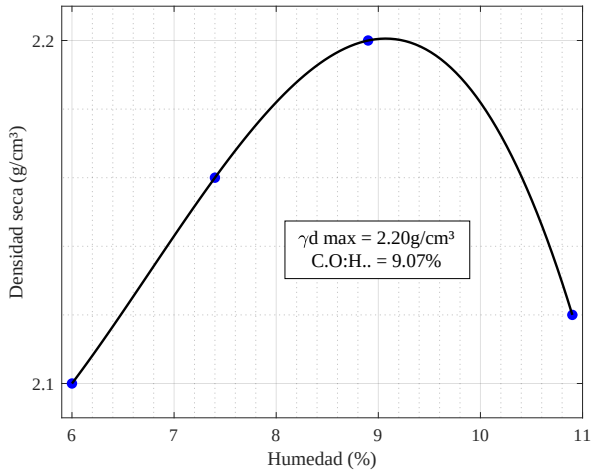


Figura 4.10.: Curva de compactación de la roca muerta (1er muestreo)

Como se aprecia en la Figura 4.10, la densidad seca máxima (γd_{max}) presenta un valor de 2,20g/cm^3, donde la humedad equivale al 9,07 %.

Para el segundo muestreo de roca muerta, se presento la siguiente curva de compactación:

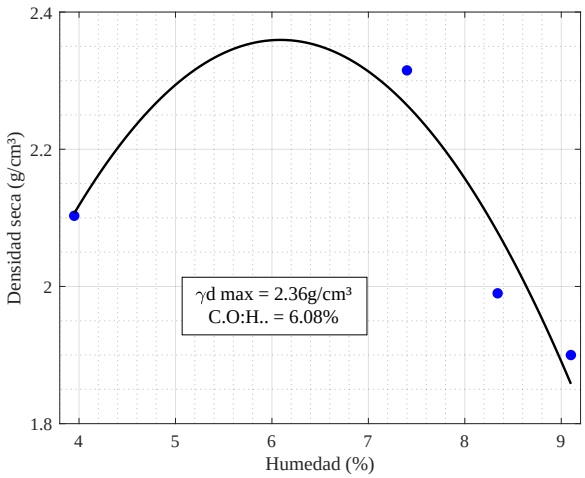


Figura 4.11.: Curva de compactación de la roca muerta (2do muestreo)

En la Figura 4.11, la densidad seca máxima (γd_{max}) presenta un valor de 2,36g/cm^3, donde la humedad equivale al 6,08 %.

De acuerdo con lo expuesto, se observa que los muestreos de roca muerta presentan diferentes humedades óptimas, lo que confirma que ambos poseen propiedades mecánicas distintas, tal como se ha evidenciado en resultados previos.

Estéril

La Figura 4.12 muestra la curva de compactación, donde se presentan los resultados obtenidos del ensayo de compactación del primer muestro de material estéril.

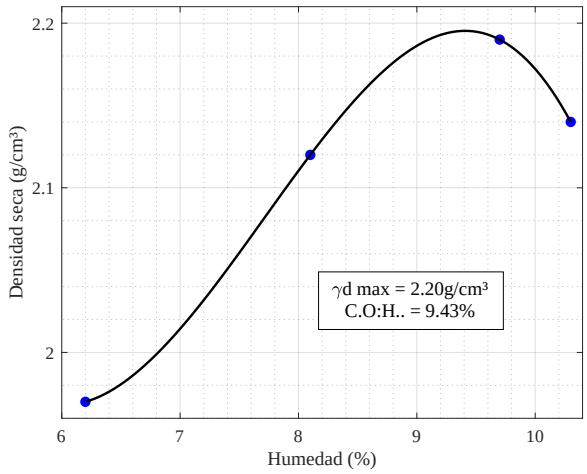


Figura 4.12.: Curva de compactación del estéril (1er muestreo)

Como se aprecia en la Figura 4.12, la densidad seca máxima (γd_{max}) presenta un valor de 2,20g/cm^3, donde la humedad equivale al 9,43 %.

Para el segundo muestreo de material estéril, se presento la siguiente curva de compactación:

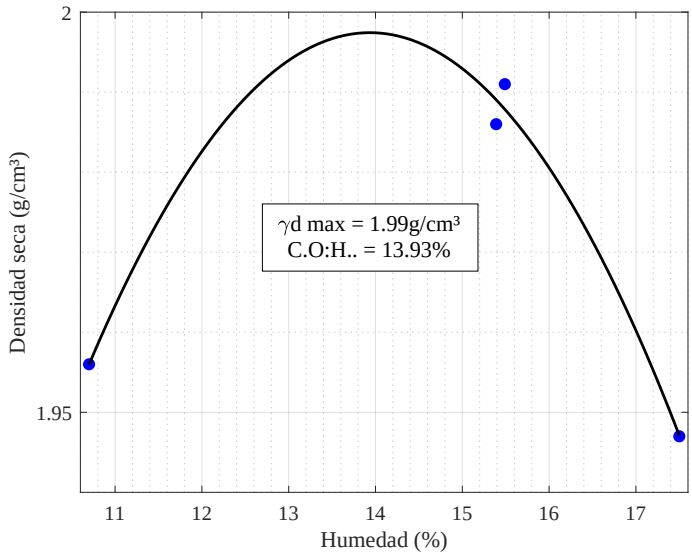


Figura 4.13.: Curva de compactación del estéril (2do muestreo)

En la Figura 4.13, la densidad seca máxima (γd_{max}) presenta un valor de $1{,}99 g/cm^3$, donde la humedad equivale al 13,93 %.

Al igual que en los muestreos de roca muerta, el material estéril presenta densidades secas máximas y humedades óptimas diferentes, lo que confirma que ambos materiales poseen propiedades mecánicas distintas, como se ha demostrado en resultados anteriores.

A continuacion en la Tabla 4.11, se resume los resultados presentados anteriormente:

Tabla 4.11.: Resumen de las propiedades del material granular

	ROCA MUERTA		ESTÉRIL	
Ensayo	**Primer muestreo**	**Segundo muestreo**	**Primer muestreo**	**Segundo muestreo**
Clasificación				
SUCS	Grava mal gradada con finos arcillosos (GP - GC)	Grava bien gradada (GW)	Grava arcillosa (GC)	Grava mal gradada con finos arcillosos (GP - GC)
AASHTO	A-2-4	A-2-6	A-7-6	A-7-6
Límites de consistencia				
Límite líquido (%)	27	37	42	47
Límite plástico (%)	21	22	21	27
Índice de plasticidad (%)	7	15	21	20
Equivalente de arena (%)	-	52	-	45
Compactación				
Densidad seca máxima (gr/cm³)	2,20	2,36	2,20	1,99
Humedad Optima (%)	9,07	6,08	9,43	13,93

4.2 Resistencia y durabilidad

4.2.1 Resultados de resistencia a compresión simple

De acuerdo con el Artículo 350 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022 del INVIAS, se recomienda que el contenido de cemento en el diseño de la mezcla no sea inferior al tres por ciento (3 %). Por lo tanto, este porcentaje se establece como el valor mínimo para las dosificaciones de suelo-cemento tanto para la roca muerta como para el material estéril.

Roca muerta

Para el primer muestreo de la roca muerta, se fabricaron las probetas para ser ensayadas a los 7 y 28 días, siguiendo las indicaciones de la norma INV E-614. Las dosificaciones de cemento fueron del 3 %, 5 % y 7 % en relación con el peso seco del material.

Los resultados de los ensayos a compresión simple de la probetas se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 4.12.: Resistencia a compresión roca muerta (1er muestreo) - cemento a 7 días

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
% Cemento	3	5	7
Constante	9.53	9.53	9.53
Lectura	180	287	425
Carga (lb)	1715.40	2735.11	4050.25
f'c (MPa)	0.94	1.50	2.22

Tabla 4.13.: Resistencia a compresión roca muerta (1er muestreo) - cemento a 28 días

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
% Cemento	3	5	7
Constante	9.53	9.53	9053
Lectura	266	350	386
Carga (lb)	2534.98	3335.50	3678.58
f'c (MPa)	1.39	1.83	2.25

Dado que las probetas de suelo-cemento con dosificaciones del 3 %, 5 % y 7 % de cemento no alcanzaron la resistencia mínima a compresión de 2.5 MPa a los 28 días, fue necesario proyectar, con base en los resultados, qué dosificación podría cumplir con el mínimo requerido. Esta proyección se presenta en la Figura 4.14.

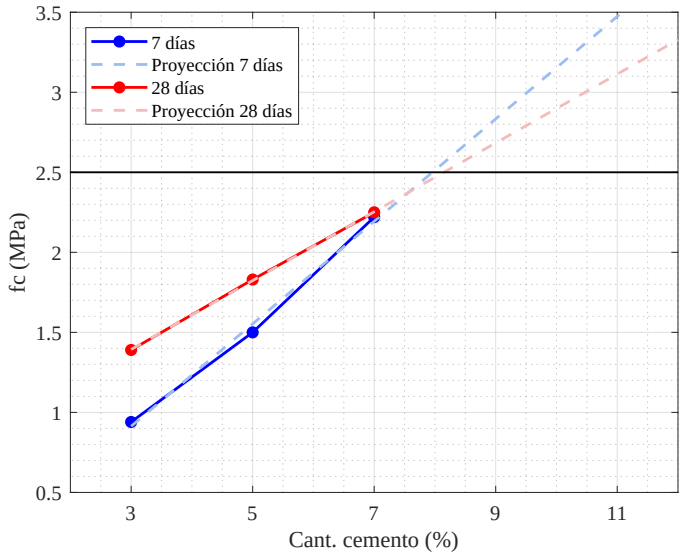


Figura 4.14.: Esfuerzos vs. porcentaje de cemento de roca muerta (1er muestreo)

En la Figura 4.14 se presentan los resultados del ensayo de compresión en función de las dosificaciones de cemento. La línea negra en la figura indica la resistencia mínima que deben alcanzar las probetas a los 28 días, conforme a lo estipulado en el Artículo 350 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022 del INVIAS.

Como se observa, ninguna de las dosificaciones de suelo-cemento alcanzó la resistencia mínima. Sin embargo, las proyecciones sugieren que dicha resistencia podría lograrse si el porcentaje de cemento adicionado respecto al peso seco de la muestra se incrementa al 11 %.

Las siguientes probetas se fabricaron utilizando el material del segundo muestreo, con una dosificación de cemento del 11 % respecto al peso seco del material. Los resultados de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas del segundo muestreo evidencian un comportamiento diferente al de la roca muerta del primer muestreo, mostrando una menor resistencia. Esto se confirmó al realizar las probetas con la dosificación de cemento del 11 %, ya que los resultados no coincidieron con lo proyectado, los resultados se muestran en las siguientes Tablas:

Tabla 4.14.: Resistencia a compresión roca muerta (2do muestreo) - cemento a 7 días

	Muestra 1	Muestra 2
% Cemento	11	11
Constante	9.53	9.53
Lectura	210	315
Carga (lb)	2001.30	3001.95
f'c (MPa)	1.10	1.65

Tabla 4.15.: Resistencia a compresión roca muerta (2do muestreo) - cemento a 28 días

	Muestra 1	Muestra 2
% Cemento	11	11
Constante	9.53	9.53
Lectura	270	300
Carga (lb)	2573.10	2859.00
f'c (MPa)	1.41	1.70

De acuerdo con los resultados de las Tablas 4.14 y 4.15, se evidenció que el material de roca muerta del segundo muestreo presenta características mecánicas distintas en comparación con el del primer muestreo dada su baja resistencia. Por esta razón, para mejorar la resistencia y durabilidad, se decidió añadir el aditivo Terrasil a la mezcla de suelo-cemento, en una dosificación equivalente al 0.04 % y 0.09 % del peso seco del material, con el fin de evaluar su desempeño mecánico. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4.16.: Resistencia a compresión roca muerta (2do muestreo) - cemento - aditivo a 7 días

	Muestra 1	Muestra 2
% Cemento	11	11
% Aditivo	0.04	0.09
Constante	9.53	9.53
Lectura	280	430
Carga (lb)	2668.40	4097.90
f'c (MPa)	1.46	2.25

Tabla 4.17.: Resistencia a compresión roca muerta (2do muestreo) - cemento - aditivo a 28 días

	Muestra 1	Muestra 2
% Cemento	11	11
% Aditivo	0.04	0.09
Constante	9.53	9.53
Lectura	490	550
Carga (lb)	4669.70	5241.50
f'c (MPa)	2.56	2.88

De acuerdo con los resultados de las Tablas 4.16 y 4.17, el aditivo añadido aumento la resistencia a tal punto de superar el minimo requerido a los 28 días (2.5 MPa).

En la siguiente tabla se compilan los resultados de la resistencia a compresión obtenidos de los ensayos:

Tabla 4.18.: Resumen de los resultados de la resistencia a la compresión de probetas con roca muerta

	Primer muestreo			**Segundo muestreo**			
Dosificación	**3% cemento**	**5% cemento**	**7 % cemento**	**11% cemento**	**11% cemento**	**11% cemento 0.04% aditivo**	**11% cemento 0.09% aditivo**
f'c a 7 días (Mpa)	0.94	1.50	2.22	1.10	1.65	1.46	2.25
f'c a 28 días (Mpa)	1.39	1.83	2.25	1.41	1.70	2.56	2.88

Estéril

Al igual que a las probetas de roca muerta - cemento, se fabricaron las de material esteril - cemento para ser ensayadas a los 7 y 28 días, siguiendo las indicaciones de la norma INV E-614 y las dosificaciones de cemento fueron del 3 %, 5 % y 7 % en relación con el peso seco del material.

Los resultados de los ensayos a compresión simple de la probetas se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 4.19.: Resistencia a compresión material estéril (1er muestreo) - cemento a 7 días

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
% Cemento	3	5	7
Constante	9.53	9.53	9.53
Lectura	52	156	318
Carga (lb)	495.56	1486.68	3030.54
f'c (MPa)	0.27	0.82	1.66

Tabla 4.20.: Resistencia a compresión material estéril (1er muestreo) - cemento a 28 días

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
% Cemento	3	5	7
Constante	9.53	9.53	9053
Lectura	132	188	305
Carga (lb)	1257.96	1791.64	2906.65
f'c (MPa)	0.69	0.98	1.70

Dadas las propiedades mecánicas del material estéril del primer muestreo en comparación con la roca muerta del mismo muestreo, era previsible que los resultados del ensayo de resistencia a compresión no alcanzaran el límite mínimo requerido. Por ello, fue necesario proyectar, basándose en los resultados, la dosificación adecuada para cumplir con dicho mínimo. Esta proyección se muestra en la Figura 4.15.

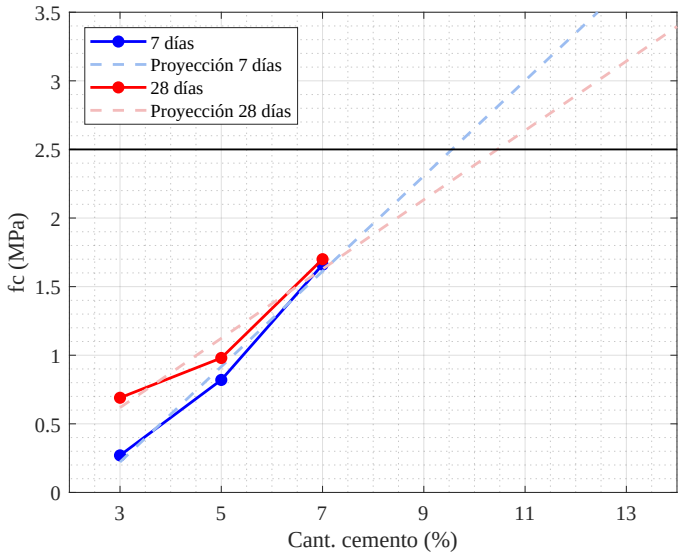


Figura 4.15.: Esfuerzos vs. porcentaje de cemento de estéril (1er muestreo)

Como se observa, ninguna de las dosificaciones de suelo-cemento alcanzó la resistencia mínima. Sin embargo, las proyecciones sugieren que dicha resistencia podría lograrse si el porcentaje de cemento adicionado respecto al peso seco de la muestra se incrementa al 13 %.

Las siguientes probetas se fabricaron utilizando el material del segundo muestreo, con una dosificación de cemento del 13 % respecto al peso seco del material. Los resultados de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas del segundo muestreo evidencian un comportamiento diferente al del estéril del primer muestreo, mostrando una menor resistencia. Esto se confirmó al realizar las probetas con la dosificación de cemento del 13 %, ya que los resultados no coincidieron con lo proyectado, los resultados se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 4.21.: Resistencia a compresión material estéril (2do muestreo) - cemento a 7 días

	Muestra 1	Muestra 2
% Cemento	13	13
Constante	9.53	9.53
Lectura	157	180
Carga (lb)	1496.21	1715.40
f'c (MPa)	0.82	0.94

Tabla 4.22.: Resistencia a compresión material estéril (2do muestreo) - cemento a 28 días

	Muestra 1	Muestra 2
% Cemento	13	13
Constante	9.53	9.53
Lectura	165	215
Carga (lb)	1572.45	2048.95
f'c (MPa)	0.86	1.12

Según los resultados de las Tablas 4.21 y 4.22, se evidencia que las propiedes del material estéril del primer y segundo muestreo no son similares, reflejandose es los resultados anteriores. Por esta razón, para mejorar la resistencia y durabilidad, se decidió añadir el aditivo Terrasil a la mezcla de suelo-cemento, en una dosificación equivalente al 0.05 % y 0.10 % del peso seco del material, con el fin de evaluar su desempeño mecánico. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4.23.: Resistencia a compresión material estéril (2do muestreo) - cemento - aditivo a 7 días

	Muestra 1	Muestra 2
% Cemento	13	13
% Aditivo	0.05	0.10
Constante	9.53	9.53
Lectura	155	360
Carga (lb)	1477.15	3430.80
f'c (MPa)	0.81	1.88

Tabla 4.24.: Resistencia a compresión material estéril (2do muestreo) - cemento - aditivo a 28 días

	Muestra 1	Muestra 2
% Cemento	13	13
% Aditivo	0.05	0.10
Constante	9.53	9.53
Lectura	165	580
Carga (lb)	1572.45	5527.40
f'c (MPa)	0.86	3.03

De acuerdo con los resultados de las Tablas 4.16 y 4.17, el aditivo añadido aumento la resistencia a tal punto de superar el minimo requerido a los 28 días (2.5 MPa) al adicionarle una dosificación del aditivo equivalente al 0.10 % del peso seco del material.

En la siguiente tabla se compilan los resultados de la resistencia a compresión obtenidos de los ensayos:

Tabla 4.25.: Resumen de los resultados de la resistencia a la compresión de probetas con estéril

	Primer muestreo			**Segundo muestreo**			
Dosificación	**3% cemento**	**5% cemento**	**7 % cemento**	**13% cemento**	**13% cemento**	**13% cemento 0.05% aditivo**	**13% cemento 0.10% aditivo**
f'c a 7 días (Mpa)	0.27	0.82	1.66	0.82	0.94	0.81	1.88
f'c a 28 días (Mpa)	0.69	0.98	1.70	0.86	1.12	0.86	3.03

4.2.2 Resultados de durabilidad

De acuerdo con el Artículo 350 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022 del INVIAS, se llevó a cabo el ensayo de durabilidad (INV E-612) para evaluar las pérdidas, los cambios de humedad y los cambios de volumen (expansión y contracción) generados por los ciclos repetidos de humedecimiento y secado en especímenes endurecidos de suelo-cemento.

El ensayo se realizó para cada dosificación de suelo-cemento y suelo-cemento-aditivo, pero la mayoría de las probetas se destruyeron por completo antes de completar los 12 ciclos de humedecimiento y secado. Solo la probeta de roca muerta con una dosificación del 11 % de cemento respecto al peso seco del material y un 0.09 % de aditivo Terrasil respecto al peso seco del material fue capaz de soportar todos los ciclos. Los resultados se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 4.26.: Cambio de volumen y humedad

Ciclo	**Cambio de volumen (%)**		**Absorción (%)**	**Humedad (%)**
	Humedo	**Seco**		
1	0.00	0.36	11.75	3.83
2	0.01	0.97	10.47	4.14
3	0.05	1.03	10.41	4.38
4	0.10	1.26	11.18	5.48
5	0.20	1.14	10.71	6.01
6	0.20	1.24	9.90	6.27
7	0.39	1.26	9.51	6.61
8	0.59	1.65	10.67	7.66
9	-	-	10.06	8.03
10	-	-	9.72	8.87
11	-	-	9.59	9.55
12	-	-	9.04	9.87

Tabla 4.27.: Perdida de suelo - cemento

Porcentaje de perdida	
Peso muestra humeda (g)	1977.50
Porcentaje de humedad (%)	7.40
Peso muestra seca (g)	1841.25
Agua retenida (%)	2.50
Peso muestra final ciclo 12 (g)	570.00
Peso muestra final corregida (g)	556.10
Perdida (%)	69.80

Según la Tabla 4.26, fue posible medir los cambios de volumen hasta el ciclo 8, ya que la probeta perdía material en las zonas de medición, lo que generaba imprecisiones. Además, se observa que a medida que avanzaban los ciclos de ensayo, la humedad de la probeta aumentaba, coincidiendo con el desprendimiento del material.

Los datos de la segunda probeta se presentan en la Tabla 4.27. Después de someterla a los 12 ciclos de humedecimiento, secado y cepillado, se registró una pérdida de material del 69.80 %, lo cual excede el porcentaje máximo permitido por el Artículo 350 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022 del INVIAS (10 %) para suelos clasificados como A-2-6 según el sistema AASHTO.

4.2.3 Análisis económico

De acuerdo con la dosificación que mostró mejores resultados en términos de resistencia y durabilidad, se realiza el siguiente análisis económico con el objetivo de evaluar la viabilidad financiera de implementar esta alternativa como pavimento unicapa. Esta opción está propuesta para mejorar la red de vías terciarias en Colombia. El estudio compara dicha alternativa con las soluciones tradicionales de pavimento flexible y pavimento rígido.

Para el análisis, se tomó en cuenta que la vía donde se implementarán estas pavimentaciones tendrá una longitud de un (1) kilómetro y un ancho de 3.60 metros. Los espesores de cada capa se determinan según el tipo de pavimentación.

En la Tabla 4.28 se presenta el presupuesto para la construcción de un pavimento flexible, que incluye una capa de subbase granular de 0.35 metros de espesor, una capa de base granular de 0.30 metros de espesor, y una carpeta asfáltica de 4 pulgadas de

espesor. Dado que la vía se encuentra en una zona rural, se ha considerado un costo por el acarreo del material a 30 kilómetros fuera de la ciudad.

Tabla 4.28.: Presupuesto pavimento flexible

Material	Unidad	Cantidad	Precio	Precio final
Localización y replanteo vías no urbanas	ML	1000,0	$ 2.645,00	$ 2.645.000,00
conformación, compactación subrasante CBR=95	M2	3600,0	$ 5.476,00	$ 19.713.600,00
Subbase compactada seleccionado canto rodado (sin transporte)	M3	1575,0	$ 70.000,00	$ 110.250.000,00
Acarreo material pétreo	M3-KM	47250,0	$ 1.603,00	$ 75.741.750,00
Base compactada material triturado granular (sin transporte)	M3	1350,0	$ 122.433,00	$ 165.284.550,00
Acarreo material pétreo	M3-KM	40500,0	$ 1.603,00	$ 64.921.500,00
Imprimación	M2	3600,0	$ 3.427,00	$ 12.337.200,00
Transporte de equipo hasta 30km	GLOBAL	1,0	$ 736.200,00	$ 736.200,00
Carpeta asfáltica	M3	365,8	$ 1.062.725,00	$ 388.702.296,00
			TOTAL COSTOS DIRECTOS:	$ 837.687.096,00

En la Tabla 4.29 se presenta el presupuesto para la construcción de un pavimento rígido, que incluye una capa de base granular de 0.25 metros de espesor, y una losa de concreto de 0.15 metros de espesor. Al igual que para el pavimento flexible, se consideró un costo por el acarreo del material a 30 kilómetros fuera de la ciudad.

Tabla 4.29.: Presupuesto pavimento rígido

Material	Unidad	Cantidad	Precio	Precio final
Localización y replanteo vías no urbanas	ML	1000,0	$ 2.645,00	$ 2.645.000,00
conformación, compactación subrasante CBR=95	M2	3600,0	$ 5.476,00	$ 19.713.600,00
Base compactada material triturado granular (sin transporte)	M3	1125,0	$ 122.433,00	$ 137.737.125,00
Acarreo material pétreo	M3-KM	33750,0	$ 1.603,00	$ 54.101.250,00
Pavimento en concreto MR=36, incluye junta	M3	540,0	$ 565.884,00	$ 305.577.360,00
Sello juntas para losa existente	ML	2000,0	$ 5.863,00	$ 11.726.000,00
			TOTAL COSTOS DIRECTOS:	$ 517.129.335,00

Los precios de las actividades descritas en las Tablas 4.28 y 4.29, fueron sacados del Decreto No. 1.22-1441 del 14 de agosto de 2024, el cual establece el Listado de Precios Unitarios de Referencia para la contratación de obras civiles del Departamento del Valle del Cauca.

Para elaborar el presupuesto de la alternativa de pavimento unicapa, se consideró la dosificación óptima obtenida para la probeta de roca muerta, que incluye un 11 % de cemento en relación con el peso seco del material y un 0.09 % de aditivo Terrasil, también basado en el peso seco del material. El precio del bulto de cemento de 50 kilogramos se estableció según cotizaciones actuales del mercado, mientras que el costo del aditivo Terrasil en presentación de 20 litros fue proporcionado por el proveedor. El presupuesto detallado se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4.30.: Presupuesto pavimento unicapa

Material	**Unidad**	**Cantidad**	**Precio**	**Precio final**
Localización y replanteo vías no urbanas	ML	1000,0	$ 2.645,00	$ 2.645.000,00
Conformación, compactación subrasante CBR=95	M2	3600,0	$ 5.476,00	$ 19.713.600,00
Relleno compactación material sin trasporte (roca muerta)	M3	900,0	$ 69.643,00	$ 62.678.700,00
Acarreo material pétreo	M3-KM	33750,0	$ 1.603,00	$ 54.101.250,00
Cemento	BULTO	4673,0	$ 31.000,00	$ 144.863.000,00
Aditivo Terrasil	CANECA	92,0	$ 1.248.525,00	$ 114.864.300,00
Compactación	M2	3600,0	$ 5.476,00	$ 19.713.600,00
		TOTAL COSTOS DIRECTOS:		$ 418.579.450,00

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizaron ensayos para evaluar las propiedades naturales, la resistencia a la compresión y la durabilidad de materiales granulares, específicamente roca muerta y estéril, provenientes de la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, estabilizados con diversas proporciones de cemento y aditivo. A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Según la Tabla 4.11, que compila las propiedades naturales de los materiales evaluados, el primer muestreo de roca muerta presentó las mejores características, con un límite líquido y un índice de plasticidad inferiores a los demás materiales y dentro del rango permitido por el Artículo 350 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022 del INVIAS. Esta mejor calidad también se reflejó en la resistencia a la compresión, ya que el primer muestreo de roca muerta, sin aditivo, alcanzó mayores niveles de resistencia con menores porcentajes de cemento en comparación con los otros materiales (ver Tabla 4.18).

El material granular estéril mostró propiedades naturales significativamente deficientes, con altos límites líquidos e índices de plasticidad en ambos muestreos (ver Tabla 4.11). Según la clasificación de la AASHTO, su comportamiento es considerado regular o pobre, lo que lo descarta como una opción adecuada para un pavimento unicapa.

La mejor dosificación en términos de resistencia a la compresión y durabilidad fue la del segundo muestreo de roca muerta, con un 11 % de cemento y un 0.09 % de aditivo, ambos en función del peso seco del material. A los 7 días, la resistencia a la compresión alcanzó los 2.25 MPa, y a los 28 días, 2.88 MPa (ver Tabla 4.18), cumpliendo con lo esperado y superando los requisitos mínimos establecidos por el Artículo 350. Aunque esta mezcla soportó los 12 ciclos de la prueba de durabilidad, la pérdida de masa fue del 69.80 %, excediendo el límite permitido del 14 % (ver Tabla 4.27). Dicho lo anterior, si se implementa el pavimento unicapa con esta dosicación, el mantenimiento a la capa de rodadura deberia de realizar de manera frecuente, generando un costo indirecto elevado.

En cuanto al estéril, la dosificación del segundo muestreo con un 13 % de cemento y un 0.10 % de aditivo alcanzó la mayor resistencia a los 28 días, con 3.03 MPa (ver Tabla

4.25). Sin embargo, esta mezcla no superó la prueba de durabilidad, desintegrándose antes de completar los 12 ciclos.

El análisis económico indica que la alternativa de pavimento unicapa con cemento y aditivo es la opción más económica para las vías terciarias en Colombia. Si se implementa con materiales granulares que cumplan con los requisitos del Artículo 350, podría resultar una solución viable. Además, con un material adecuado, sería posible reducir las proporciones de cemento y aditivos, lo que optimizaría los costos de la obra.

Es importante destacar que, aunque los materiales de roca muerta y estéril no cumplen con las especificaciones necesarias para ser empleados como material granular en la construcción de un pavimento unicapa, podrían ser utilizados como material granular en capas estructurales en el desarrollo de pavimentos convencionales.

Bibliografía

Afrin, H. (2017). A review on different types soil stabilization techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, *3*(2), 19–24.

Asi, I. M. (2001). Stabilization of sebkha soil using foamed asphalt. *Journal of materials in civil engineering*, *13*(5), 325–331.

Bowers, B. F., Daniels, J. L., Lei, S., y DeBlasis, N. J. (2013). Additives for soil-cement stabilization. En *Pavement and geotechnical engineering for transportation* (pp. 68–75).

Chávez Pajuelo, R. A. (2018). Estudio comparativo empleando el aditivo proes y consolid para la estabilización de suelos en caminos vecinales, 2018.

DANE. (2022). *Pobreza monetaria y grupos de ingreso en Colombia, RESULTADOS 2021* (Inf. Téc.). Autor.

Das, B. M., y González, S. R. C. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.

Departamento Nacional de Planeación. (2021). Mejoramiento de vías terciarias, Vías de tercer orden [Manual de software informático].

Findeter. (2023). *Inversión en vías secundarias y terciarias en colombia.* Descargado de `https://www.findeter.gov.co/blog/estructurar-y-financiar-el-desarrollo/inversion-en-vias-secundarias-y-terciarias-en-colombia`

García-Toro, J. R. (2019). Estudio de la técnica de suelo-cemento para la estabilización de vías terciarias en colombia que posean un alto contenido de caolín.

Gautam, S., Hoyos, L. R., He, S., Prabakar, S., y Yu, X. (2020). Chemical treatment of a highly expansive clay using a liquid ionic soil stabilizer. *Geotechnical and Geological Engineering*, *38*, 4981–4993.

González, J. I. (2014). *El índice de ruralidad.* Descargado de https://www.larepublica.co/analisis/jorge-ivan-gonzalez-506394/el-indice-de-ruralidad-2173246

INVÍAS. (2016). *Clasificación de las carreteras.*

Katz, L. E., Rauch, A. F., Liljestrand, H. M., Harmon, J. S., Shaw, K. S., y Albers, H. (2001). Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer. *Transportation Research Record*, *1757*(1), 50–57.

Little, D. N., Thompson, M. R., Terrell, R. L., Epps, J. A., y Barenberg, E. J. (1987). *Soil stabilization for roadways and airfields* (Inf. Téc.). LITTLE (DALLAS N) AND ASSOCIATES BRYAN TX.

Mgangira, M. B. (2009). Evaluation of the effects of enzyme-based liquid chemical stabilizers on subgrade soils. *SATC 2009*.

Mintransporte. (2022). *Ministro de transporte explicó proyectos clave de infraestructura que mejorarán la competitividad, la conectividad y la logística nacional.* Descargado de https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/11249/ministro-de-transporte-explico-proyectos-clave-de-infraestructura-que-mejoraran-la-competitividad-la-conectividad-y-la-logistica-nacional/

Montejo, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras (segunda). *Universidad Católica de Colombia.*

Montejo Fonseca, A., y cols. (2006). Ingeniería de pavimentos.

Narvaez, L. (2017). VÍAS TERCIARIAS: MOTOR DEL DESARROLLO ECONÓMICO RURAL. *Revista de Ingeniería*, *1*(45), 80–87. Descargado de https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rdi/article/view/7433 doi: 10.16924/revinge.45.11

Negi, A. S., Faizan, M., Siddharth, D. P., y Singh, R. (2013). Soil stabilization using lime. *International journal of innovative research in science, engineering and technology*, *2*(2), 448–453.

Onyejekwe, S., y Ghataora, G. S. (2015). Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: Sulphonated oil and a polymer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *74*, 651–665.

Quintero, K., y Ramírez, M. C. (2023). *Entre trochas y carreteras: caminar por las vías terciarias colombianas.* Descargado de https://www.elespectador.com/economia/estado-de-las-carreteras-en-colombia-las-vias-terciarias-que-frenan-el-desarrollo/

Reyes, G. (2022). *La infraestructura de transporte para la paz* (Inf. Téc.). Mintransporte.

Villar, L., y Ramirez, J. (2014). *Infraestructura regional y pobreza rural* (Inf. Téc.). FEDESARROLLO. Descargado de https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/234/WP_2014_No_61.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Zambrano Bravo, T. V., y Zambrano Meza, M. I. (2023). Estabilización de suelo con cal y cemento para el mejoramiento de subrasante. *REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINARIA ARBITRADA YACHASUN-ISSN: 2697-3456*, *7*(13), 112–124.