# ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELO PARA VÍAS TERCIARIAS CON ADITIVO COMERCIAL Y AGREGADO PROVENIENTE DE LAS CANTERAS CACHIBÍ Y LA ROCA


Presentado por:

**Autores:** Alejandra Gutierrez Castro
Julian David Mena Castrillón

**Director:**
Diego Duque Arango.


Trabajo de grado para optar por el Título de
**Ingeniero Civil**


Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7)
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle

Diciembre 2023

# NOTA DE ACEPTACIÓN:

El presente trabajo fue aprobado por el director del programa académico, los jurados y el director de la investigación.

---

**CARLOS A. MADERA SIERRA, Ph.D.**
Director del Programa Académico de Ingeniería Civil.

---

**DIEGO DUQUE ARANGO**
Director de la investigación.

---

Jurado

---

Jurado

Santiago de Cali, 29 de noviembre de 2024

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mis padres, Jhon Jairo Gutiérrez y Emilse Castro, por brindarme un amor profundo e incondicional, por su apoyo constante en cada etapa de mi vida y por ser mi mayor fuente de inspiración. Gracias por enseñarme con su ejemplo a nunca rendirme y por impulsarme siempre a alcanzar mis sueños.

A mis hermanos, Valentina Gutiérrez y Brian Rincón, quienes han sido mi refugio y protección, por estar a mi lado en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada logro. A cada uno de ustedes, gracias por ser el pilar fundamental que me sostuvo durante este proceso, por sus palabras de amor y por confiar en mí incluso cuando yo dudaba.

A mi pareja, Diego, por su amor, paciencia y compañía incondicional durante este camino. Gracias por ser mi apoyo en los momentos más desafiantes, por creer en mí y motivarme a seguir adelante con determinación.

A todos mis amigos, por su amistad, comprensión y palabras de aliento, ustedes siempre fueron una fuente de energía y ánimo en este proceso. A mis profesores, por su invaluable guía y enseñanzas, por compartir sus conocimientos y por motivarme a crecer profesional y personalmente. A todas las personas que, de alguna manera, hicieron parte de este proceso, les agradezco profundamente. Sus gestos, apoyo y confianza contribuyeron significativamente para que hoy este logro sea una realidad.

*Alejandra Gutiérrez Castro*

Agradezco a mis padres, Luz Amparo Castrillón y Leonardo Mena, y a mis hermanos por su constante soporte e incondicional apoyo, alentándome a seguir adelante y cumplir todas mis metas. Su amor, paciencia y confianza fueron el motor que me impulsó a superar los desafíos de este camino y alcanzar este logro tan significativo.

Agradecemos de manera especial a la ingeniera Luz Mary Quintero por su invaluable apoyo al suministrar el aditivo necesario para llevar a cabo esta investigación. Su orientación, generosidad, compromiso y paciencia fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo de grado, permitiéndonos explorar soluciones innovadoras y contribuir al mejoramiento de las vial del país.

Agradezco a los ingenieros Fredy Cárdenas, de la cantera Cachibí, y Jhon Jader, de la cantera La Roca, por su invaluable generosidad al suministrarnos el material de roca muerta necesario para llevar a cabo esta investigación. Su apoyo fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.

*Julián David Mena Castrillón*

# RESUMEN

En Colombia las vías terciarias juegan un papel crucial para la conectividad de la población rural aportando al desarrollo económico y facilitando el acceso a servicios básicos. Sin embargo existe un problema recurrente donde gran parte de estas vías que son trochas en tierra se encuentran en mal estado debido a la falta de mantenimiento, poca inversión y el uso de materiales de baja calidad. El problema se acentúa más teniendo en cuenta que más del 50 % de la malla vial es una vía terciaria [1].

Ante esta problemática, el aditivo comercial QI-Binder ha surgido en el mercado como una solución innovadora para estabilizar de forma química los suelos existentes mejorando sus prestaciones. En este estudio se evaluó el uso del suelo roca muerta, un material pétreo alternativo de bajo costo estabilizado con cemento y aditivo QI-Binder en base a la investigación de Pérez [2] que destaca la necesidad de reemplazar los suelos arcillosos y/o de baja capacidad de soporte por grava arenosa, material triturado o arena compactándolos para mejorar la capacidad de carga, lo que representa una ventaja económica respecto a los afirmados tradicionales con el potencial de reducir los costos de construcción de pavimentos.

La investigación incluye la caracterización y comportamiento mecánico de la roca muerta proveniente de las canteras Cachibí y La Roca teniendo en cuenta los criterios del articulo 350 del INVIAS el cual define los requisitos normativos que debe cumplir un material granular para ser tratado con cemento para su uso como capa estructural. La caracterización del material se realizó mediante ensayos de determinación de partículas de suelo, limites liquido (LL) y plástico (LP), indice de plasticidad (IP), equivalente de arena y clasificación del suelo mediante los sistemas AASHTO y SUCS. Además se llevaron a cabo los ensayos de compactación modificada para determinar la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad.

Con la caracterización del suelo definida se escogieron diferentes dosificaciones de cemento y aditivo utilizando los porcentajes óptimos de cemento entregados por AASHTO en función de la clasificación del suelo. En este caso ambas roca muerta fueron clasificadas como suelo tipo A-2-6, para este tipo de suelo la norma AASHTO recomienda un porcentaje de cemento entre (5 %-9 %). En este estudio se evaluaron las dosificaciones de cemento 7 % y 9 %. En cuanto al aditivo, el fabricante Química Inteligente SAS recomendó un porcentaje de aditivo entre (0.1 %-0.5 %) del agua de compactación. Se decidió evaluar el comportamiento de las dosificaciones de 0.3 % y 0.5 % de aditivo, considerando que la empresa emplea dosificaciones bajas (0.1 %) para suelos finos y más altas (0.5 %) para suelos arenosos.

En cuanto a los ensayos de capacidad y resistencia del suelo estabilizado, se analizaron las propiedades mecánicas del material tratadas con las diferentes dosificaciones seleccionadas. Para

evaluar el incremento en la capacidad de soporte del material, se llevaron a cabo ensayos de Índice CBR, determinando la mejora en la resistencia frente a la carga en comparación con el suelo natural. Adicionalmente, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión para establecer la capacidad del material de soportar esfuerzos de cargas. También se ejecutaron ensayos de durabilidad, evaluando el comportamiento del material frente a ciclos de humedecimiento y secado, verificando el cumplimiento de los requisitos art 350 relacionados con la pérdida de material de un máximo de 10 % y la integridad estructural en condiciones ambientales adversas.

El material proveniente de la cantera Cachibí mostró un desempeño superior al de la roca muerta de La Roca en todos los parámetros evaluados. En su dosificación con 9 % de cemento y 0.3 % y 0.5 % de aditivo, cumplió satisfactoriamente las pruebas de durabilidad, lo que evidencia su resistencia a condiciones severas. Los ensayos de caracterización indicaron que Cachibí tiene una menor proporción de arcilla y menos finos en comparación con La Roca, lo cual es consecuente con sus mejores propiedades mecánicas. En estado natural, el material de Cachibí presentó un CBR más alto, con un 46 %, frente al 15 % de La Roca. Además, en términos de resistencia a la compresión, el material de Cachibí alcanzó un valor de 3.73 MPa, superando los 2.82 MPa registrados por La Roca, ambos evaluados con la misma dosificación de 9 % de cemento y 0.5 % de aditivo. Estos resultados resaltan la mayor viabilidad técnica del material de Cachibí especialmente porque la prueba de durabilidad es el criterio más importante para usar el método de diseño de pavimentos suelo-cemento de la PCA.

Los espesores de diseño se obtuvieron a través del método de la PCA considerando las condiciones de una subrasante débil con un módulo de reacción k=114.3 PCI. En particular, se diseñó una estructura de pavimento con una capa de suelo-cemento de 6 pulgadas de espesor, complementada con una superficie de rodadura bituminosa de 1 pulgada. El análisis de costo demostró que esta propuesta de pavimento unicapa de suelo-cemento con roca muerta puede llegar a ser hasta un 63.3 % mas económica comparado con un pavimento tradicional como la placa huella.

En conclusión, el uso de materiales estabilizados como la roca muerta de Cachibí representa una alternativa efectiva y sostenible para mejorar las vías terciarias en Colombia, atendiendo la necesidad de reducir costos y garantizar un desempeño estructural adecuado.

# Índice general

**RESUMEN** **4**

**Índice de figuras** **7**

**Índice de tablas** **9**

**1. INTRODUCCIÓN** **11**

**2. PROBLEMA** **12**

2.1. Descripción . . . . . 12

2.2. Planteamiento . . . . . 16

2.3. Objetivos . . . . . 16

2.4. Justificación . . . . . 16

**3. MARCO DE REFERENCIA** **19**

3.0.1. Suelo . . . . . 20

3.0.2. Propiedades del suelo . . . . . 21

3.0.3. Ensayos de laboratorio . . . . . 23

3.0.4. Estabilización de suelos . . . . . 29

3.0.5. Método de la Portland Cement Association (PCA) . . . . . 33

3.1. Antecedentes . . . . . 33

**4. METODOLOGÍA** **37**

4.1. Tipo de estudio . . . . . 37

4.2. Fases . . . . . 38

**5. RESULTADOS Y ANÁLISIS** **53**

5.1. Ensayos de caracterización de los suelos . . . . . 53

5.1.1. Ensayo INV - E - 123 13 determinación tamaño de partículas de los suelos . 53

5.1.2. Ensayos INV E 125 13, INV E 126 13 determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos . . . . . 54

5.1.3. Ensayos INV - E - 133 - 13 Equivalente de arena y agregados finos . . . . . 55

5.1.4. Ensayos INV - E - 180 13 clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras . . . . . 56

5.2. Ensayos geomecánicos del suelo . . . . . 57

5.2.1. Ensayos INV E - 141 - 13 ensayo de compactación del suelo . . . . . 57

5.2.2. Ensayos INV - E -148 -14 CBR de los suelos compactados en el laboratorio y sobre la muestra inalterada . . . . . 59

5.2.3. Ensayos INV - E -612 -13 humedecimiento de mezclas compactadas de suelo-cemento . . . . . 62

5.2.4. Ensayos INV - E -614 -13 Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo cemento . . . . . 68

5.2.5. Espesores óptimos de la capa de rodadura estabilizada con el aditivo. . . . . 71

5.2.6. Análisis de costos y comparación económica del pavimento unicapa suelo-cemento . . . . . 72

**6. CONCLUSIONES** **75**

**7. IMPACTO Y PERSPECTIVAS** **77**

**ANEXOS** **79**

**REFERENCIAS** **107**

# Índice de figuras

2.1. Distribucion de la red vial en colombia (2017) [1] . . . . . 12

2.2. Distribución del manejo de la red terciaria (2017) [1] . . . . . 12

2.3. Distribucion de la red regional por entidad a cargo (2017) . [1] . . . . . 12

2.4. Distribución de la red terciaria en los departamentos de colombia. [1] . . . . . 13

3.5. Clasificación de la subrasante de acuerdo con el INVÍAS, para CBR de menores al 2-5 %, se requiere sustitución del material o mejoramiento del mismo mediante productos como la cal y el cemento para mejorar sus características mecánicas. [22] 20

3.6. Nomenclatura para el Sistema de Clasificación AASHTO. [29] . . . . . 24

3.7. Sistema unificado de clasificación de suelo (basado en el material que pasa por el tamiz núm. 75). [30] . . . . . 25

3.8. Gráca de plasticidad. [30] . . . . . 25

3.9. Curva de distribución de tamaño de partícula: análisis de tamiz y de hidrómetro. [30] 26

3.10. Valores de esfuerzo de muestra patrón para cálculo de CBR. . . . . 28

3.11. Propiedades Índice en suelo natural y suelo polímero (valores promedio). [42] . . . . 34

4.12. Recolección de material en la cantera La Roca y Cachibí . . . . . 38

4.13. Roca muerta en la cantera La Roca y Cachibí . . . . . 39

4.14. Granulométria de los agregados de las canteras Cachibí y La Roca . . . . . 40

4.15. Límite líquido de los agregados de las canteras Cachibí y La Roca . . . . . 40

4.16. Límite plástico para las muestra de suelo. . . . . 41

4.17. Montaje de las probetas para EA . . . . . 42

4.18. Muestra en periodo de humedecimiento . . . . . 42

4.19. Lectura de la arcilla y arena . . . . . 43

4.20. Ensayo de compactación. . . . . 45

4.21. Ciclos de humedecimiento. . . . . 47

4.22. Ciclos de secado. . . . . 48

4.23. Ensayo CBR en laboratorio. . . . . 48

4.24. Factores de Fatiga representativos para pavimentos de tráfico ligero . . . . . 51

4.25. Carta para diseño de espesores para suelo-cemento granular. . . . . 51

4.26. Espesores de Superficie Bituminosa . . . . . 52

5.27. Granulometría para las canteras Cachibí y la Roca . . . . . 53

5.28. Ensayo de compactación modificado aplicado a las distintas dosificaciones de suelo-cemento y aditivo para la cantera Cachibí. . . . . 57

5.29. Ensayo de compactación modificado aplicado a las distintas dosificaciones de suelo-cemento y aditivo para la cantera La Roca. . . . . 57

5.30. CBR del suelo natural la cantera cachibí y La Roca. . . . . 59

5.31. Ensayo CBR para los distintos tipos de dosificación de suelo-cemento y aditivo . . 61

5.32. Perdida acumulada durante los 12 ciclos de durabilidad cantera Cachibi . . . . . 63

5.33. Perdida acumulada durante los 12 ciclos de durabilidad cantera La Roca . . . . . 63

5.34. Absorción durante los 12 ciclos de durabilidad cantera Cachibí . . . . . 65

5.35. Absorción durante los 12 ciclos de durabilidad cantera La Roca . . . . . 66

5.36. Porcentaje del cambio de volumen por cada ciclo en estado seco y húmedo de la RM de Cachibí . . . . . 67

5.37. Porcentaje del cambio de volumen por cada ciclo en estado seco y húmedo de la RM de La Roca . . . . . 67

5.38. Resistencia a la compresión de suelo de la cantera La Roca . . . . . 68

5.39. Resistencia a la compresión de suelo de la cantera Cachibí . . . . . 69

5.40. Diseño de espesores para suelo tipo roca muerta de la cantera cachibí para dosificaciones con 9 % de cemento y aditivo QI-BINDER al 0.3 % y 0.5 % . . . . . 71

# Índice de tablas


4.1. Ensayos de la norma INVIAS para la caracterzación del suelo . . . . . 39

4.2. Ensayos geomecánicos de la norma INVIAS . . . . . 44

4.3. Dosificaciones específicas a evaluar . . . . . 45

4.4. Tasas anuales de crecimiento de tráfico y factores de proyección correspondientes . . 50

5.5. Límites e indice de plasticidad de la roca muerta . . . . . 54

5.6. Equivalente de arena de la roca muerta de Cachibí y La Roca . . . . . 55

5.7. Clasificación de la roca muerta por AASHTO y SUCS . . . . . 56

5.8. valor del CBR para distintas energias de compactación . . . . . 61

5.9. Porcentaje de mejora del aditivo . . . . . 64

5.10. Valores de % de absorción de la norma articulo 350 . . . . . 65

5.11. Resultados resistencia a la compresión para todas las dosificaciones de la cantera La Roca . . . . . 69

5.12. Resultados resistencia a la compresión para todas las dosificaciones de la cantera Cachibi . . . . . 70

5.13. Presupuesto del pavimento suelo-cemento mediante el método de la PCA . . . . . 72

5.14. Datos de la via analizada y cantidades de obra respectivas . . . . . 73

# 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, la insuficiencia de vías de acceso en las zonas rurales se presenta como un obstáculo crítico para el avance económico y afecta de manera directa la calidad de vida de las comunidades locales. Esta carencia de infraestructura vial no solo impide el crecimiento económico, sino que también obstaculiza el acceso a servicios esenciales, como salud y educación, generando una urgente demanda de intervención por parte de los líderes gubernamentales a nivel nacional, regional y municipal. Además, la falta de conectividad también incide en la limitada movilización de bienes y servicios, lo cual restringe las oportunidades de comercio y desarrollo local. En este contexto, la inversión y atención adecuada en la construcción y mejora de vías en las zonas rurales no solo representan una respuesta a la demanda básica de movilidad, sino que constituyen una inversión estratégica para impulsar el progreso socioeconómico en todo el país.

Debido a los altos costos asociados a la construcción de vías de acceso mediante métodos tradiciones, este estudio busca demostrar la viabilidad de mejorar la transitabilidad y fortalecer la capacidad estructural de un suelo estabilizado a través de una alternativa innovadora que explora la implementación de tecnologías para la estabilización de suelos. Se destaca la utilización del aditivo químico QI-BINDER, el cual modifica los suelos cohesivos, otorgándoles resistencia y capacidad de carga.

La implementación de nuevas técnicas presenta una limitación significativa debido a su relativa novedad, lo que conlleva la falta de experiencia práctica en su ejecución y genera incertidumbre sobre la confiabilidad de los resultados obtenidos. Esta carencia de un historial extenso genera desafíos adicionales al plantear interrogantes sobre la aplicabilidad generalizada y la efectividad de estas metodologías para abordar los desafíos específicos de proyectos similares. Se destaca la necesidad de un enfoque cuidadoso en la planificación, ejecución y evaluación, así como la implementación de mecanismos de monitoreo continuo para fortalecer la confianza en la aplicación de estas innovaciones a lo largo del tiempo.

El documento se organiza en cinco secciones divididas de la siguiente manera: en el primer capítulo, se aborda el planteamiento del problema, proporcionando una descripción detallada, estableciendo objetivos y justificando la necesidad de la investigación. Posteriormente, en el segundo capítulo, se presenta el marco de referencia, destacando los estudios previos y las bases conceptuales relacionadas con el tema de investigación. En el tercer capítulo, se aborda el marco metodológico, donde se detalla el nivel y tipo de investigación, las fases de investigación y el producto final esperado. El cuarto capítulo se centra en la planificación del proyecto, presentando el cronograma, las actividades propuestas y los tiempos establecidos, junto con el presupuesto necesario. Finalmente, en el quinto capítulo, se lleva a cabo el análisis y la discusión de los resultados obtenidos, evaluando su congruencia con las hipótesis planteadas en fases anteriores.

# 2. PROBLEMA

## 2.1. Descripción

Colombia cuenta con una red vial nacional de longitud aproximada de 204.855 Km, esta se divide dentro de tres categorías según lo establecido en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras: primaria, secundaria y terciara; su correspondencia se establece en la necesidad operacional de la carretera o de los intereses de la nación [3]. Para las vías primarias se establecen 17.434 km que se encuentran debidamente inventariados, las vías secundarias cuentan con una longitud aproximada de 45.137 km y para las vías terciarias su longitud es de 142.284 km. Las vías terciarias en su gran mayoría dependen de los municipios, como se puede ver en la tabla de distribución de la red regional por entidad a cargo, estos manejan 100.748 km que son aproximadamente el 72 % de la red terciaria completa; sin embargo, sólo se destina el 0.7 % de presupuesto en infraestructura vial [1].

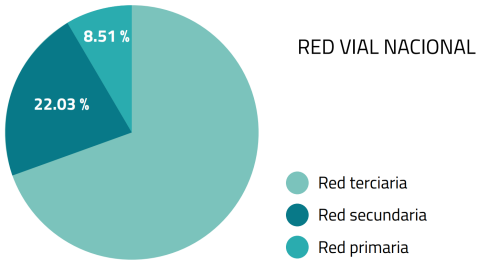



**Figura 2.1:** Distribucion de la red vial en colombia (2017) [1]

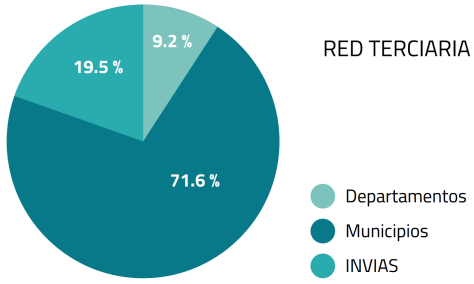



**Figura 2.2:** Distribución del manejo de la red terciaria (2017) [1]

| DISTRIBUCIÓN DE LA RED REGIONAL POR ENTIDAD A CARGO | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Nación | Departamentos | Municipios | TOTAL |
| Red Secundaria (km) | | 45.137 | | 45.137 |
| Red Terciaria (km) | 27.577 | 13.959 | 100.748 | 142.284 |

**Figura 2.3:** Distribucion de la red regional por entidad a cargo (2017) . [1]

Según una estadística creada por INVIAS con respecto al estado de la red terciaria es posible notar que solo el 6 % de la totalidad de la longitud de estas vías se encuentra pavimentada, 33,5 %

se encuentra en buen estado, 38,4 % en estado regular y 28,1 % en mal estado .Estas vías en su mayoría son apenas trochas en tierra con precario afirmado donde hay poco o nulo mantenimiento de las mismas, por lo que es común que en temporada de lluvias sean difícilmente transitables. [4].

En Colombia, la distribución desigual de la red terciaria es un problema ampliamente reconocido, sustentado en las grandes áreas del país que carecen de la infraestructura de transporte mínima necesaria. A nivel nacional, el país posee un índice de 17,8 Km por cada 100 $Km^2$ de territorio en términos de red vial total, un valor cercano al promedio latinoamericano. Sin embargo, en la red terciaria, el indicador nacional disminuye significativamente a 12,8 Km por cada 100 $Km^2$ de territorio, esta cifra varía notablemente de un departamento a otro. Algunos departamentos, como Quindío, Boyacá, Cundinamarca, Risaralda, Huila, Tolima, Atlántico, Caldas, Córdoba, Sucre, Santander, Cauca, Bolívar, Valle, Magdalena y Antioquia, tienen un indicador superior a 20 Km por cada 100 $Km^2$. Otros, como Norte de Santander, Nariño y San Andrés, están en el rango de 12,8 a 20 Km por cada 100 $Km^2$. Mientras que la mayoría de los demás departamentos se encuentran por debajo de 9 Km por cada 100 $Km^2$. Esta disparidad significa que la gestión de las vías terciarias varía significativamente de un municipio a otro, y el país necesita priorizar la inversión en estas carreteras para lograr un equilibrio en el desarrollo nacional [1].

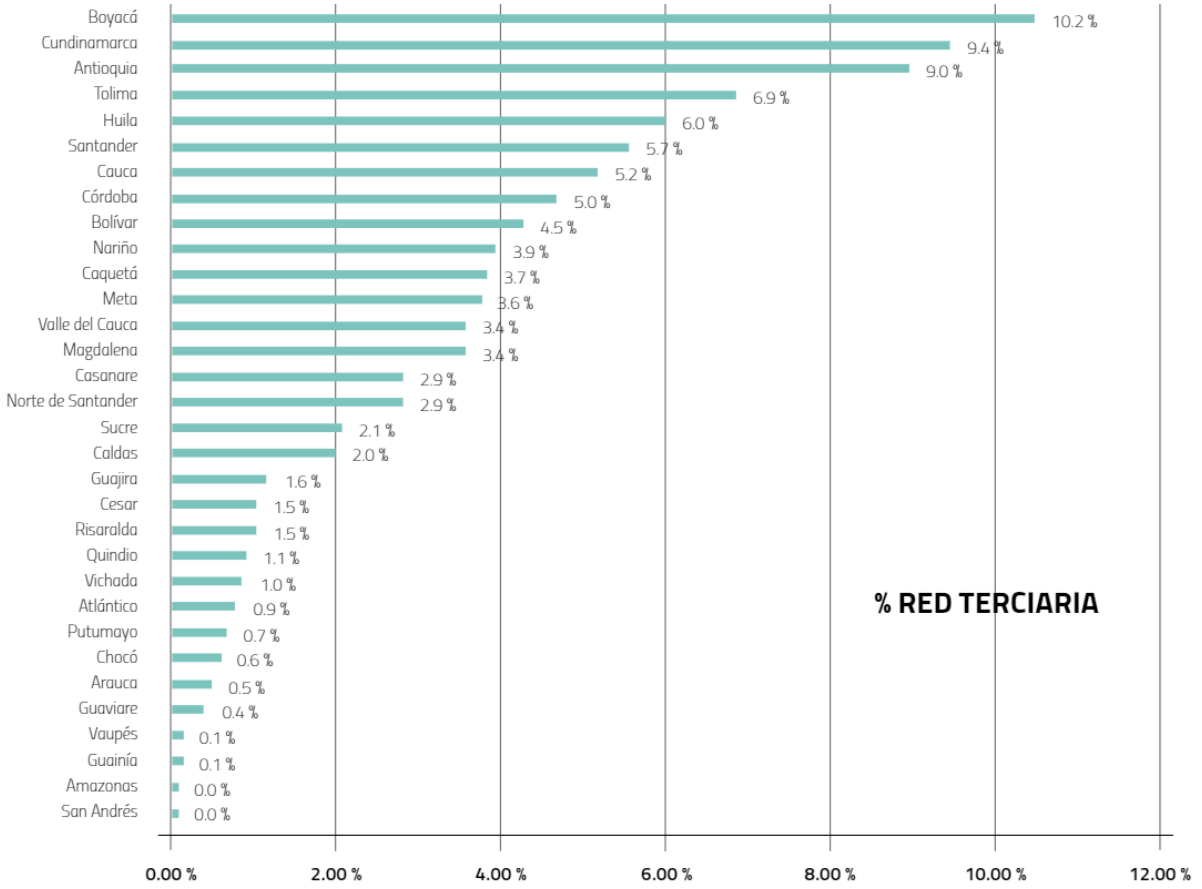



**Figura 2.4:** Distribución de la red terciaria en los departamentos de colombia. [1]

El estado de la red vial terciaria tiene un impacto significativo en la economía, aportando a la generación de hasta 66.881 nuevos empleos entre directos, indirectos e inducidos, esto contando con vías que tenga condiciones adecuadas. Cuando una vía terciaria está en mal estado, los

vehículos deben circular a velocidades más bajas para evitar daños y accidentes, lo que causa a su vez que los vehículos tarden más tiempo en recorrer la misma distancia aumentando el tiempo de viaje y, por lo tanto, los costos operativos, como los salarios de los conductores y los gastos de combustible. Además, se ve reducida su capacidad de carga; la revista portafolio estima que los costes de transporte debido a vías terciarias en mal estado pueden tener un incremento de hasta un 30 %.

La estabilización de los suelos se divide en estabilización química y mecánica, siendo la estabilización química el método mas versátil ya que puede ser aplicado a cualquier tipo de suelo en donde se busca alterar propiedades químicas , esto permite que un suelo inalterado que posea un comportamiento fisico-mecanico deficiente pueda mejorar propiedades como la permeabilidad, cohesión o su resistencia , mitigando de esta manera las deformaciones generadas para el incremento su vida útil. [5]. Además, la estabilización mecánica generalmente implica la compactación de un suelo nativo, que, en la mayoría de los casos, tiene una baja cohesión. Esto requiere la mezcla forzada con un suelo de mayor cohesión y mayor permeabilidad antes de llevar a cabo la compactación, con el fin de mejorar las propiedades del suelo nativo. Es importante destacar que este procedimiento no es aplicable a todos los suelos, especialmente cuando las diferencias en la granulometría entre los suelos son significativas.

Dado que el cemento Portland es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción, incluyendo su aplicación en la estabilización de suelos [5], se ha buscado desarrollar alternativas debido a su estrecha relación con el calentamiento global, que está vinculado a las altas temperaturas empleadas en su fabricación, así como al elevado consumo de energía y recursos naturales [6]. Estos nuevos materiales buscan reducir la huella de carbono mientras mantienen las propiedades aglutinantes del cemento Portland. Su principal ventaja radica en su versatilidad, ya que son adecuados para su uso en prácticamente todos los tipos de suelos. Desde un punto de vista técnico, presentan beneficios como el aumento de la resistencia en etapas tempranas y la mejora de la durabilidad de los suelos tratados. Sin embargo, sólo la industria de producción de cemento Portland contribuye con aproximadamente el 5 al 8 % de las emisiones mundiales totales de dióxido de carbono ($CO^2$) [7]. Por cada tonelada de cemento Portland producida, se emiten entre 0.8 y 1 tonelada de $CO^2$ a la atmósfera, principalmente debido a la descomposición de las materias primas y al uso de combustibles fósiles en el proceso de fabricación [8] .

Adicionalmente, la cal es uno de los materiales mas utilizados dentro de la estabilización de suelos debido a su capacidad de transformar suelos arcillosos en materiales mas granulares, aportando una estructura con menor índice de plasticidad y menor permeabilidad que contribuye considerablemente la resistencia de las capas de suelo estabilizado; sin embargo, al ser un material cementante a base de calcio presenta inconvenientes debido a su limitada eficacia en suelos que poseen niveles elevados de materia orgánica, ya que esto influye negativamente en las reacciones puzolánicas y de hidratación, necesarias para que el suelo tratado alcance la resistencia mecánica requerida [9]. Ante los inconvenientes previamente señalados, se ha decidido buscar nuevas tecnologías que puedan ser aplicadas en este contexto geotécnico, con el propósito principal de abordar los problemas asociados a las emisiones de $CO^2$, reducir la extracción de recursos naturales, ser económicamente sostenibles y mejorar la durabilidad de los suelos.[5].

Para Atarama Mondragón, Edson, el crecimiento social y económico de una población se debe principalmente a sus vías de comunicación ya que a través de ellas se realizan las relaciones comerciales, personales, de comunicación, etc, sin embargo el gasto económico que demanda la construcción de caminos y carreteras, y su posterior mantenimiento, hace que sean proyectos inviables en poblados cuya afluencia vehicular es baja, justamente por ser pueblos en vías de desarrollo [10].

En relación con lo anterior, el costo de planeación, construcción y mantenimiento es muy alto debido al difícil acceso de los materiales por ser áreas rurales, disminuyendo así la posibilidad de crear una red vial terciaria con condiciones óptimas para la comunidad. Adicional a esto, a largo plazo, el funcionamiento de la construcción vial depende de la calidad de los suelos subyacentes, por lo que un mal comportamiento de la estructura con respecto a la inestabilidad de los suelos puede provocar complicaciones significativas en los pavimentos. Es por ello que se ha propuesto mejorar estos suelos por medio de la estabilización con cal, cemento Portland, aditivos, emulsiones, enzimas, geomallas, etc [11].

El estabilizador químico QI-BINDER es un líquido viscoso que contiene dispersión de polímeros sintéticos con reología controlada. Cuando se mezcla con agua, este compuesto puede ser aplicado sobre superficies de caminos que carecen de pavimento. Al hacerlo, tiene la capacidad de infiltrarse en el suelo y crear una capa superficial compacta y firme. Esta acción no solo resulta en la estabilización de la superficie del camino, sino que también fortalece su resistencia y durabilidad ante las condiciones adversas del clima y el intenso tráfico vehicular. Además de estos beneficios, se promueve una mayor seguridad y comodidad para quienes transitan por estas vías. La empresa encargada de distribuir este producto es QI-QUIMICA INTELIGENTE SAS, con sede en Chimitá, Bucaramanga-Colombia. Es reconocida por su especialización en la fabricación de una amplia gama de aditivos destinados a mejorar la infraestructura vial. Su cartera de productos incluye aditivos para la impermeabilización de capas granulares, estabilizadores de suelos y supresores de polvo, con un enfoque en la innovación y la calidad.

Dentro de las propuestas sugeridas a partir del avance de nuevas metodologías se encuentra la estabilización química, esta sugiere el uso de emulsiones enzimáticas, materiales puzolánicos, sales orgánicas e inorgánicas, polímeros y organosilanos según los expuesto en las especificaciones de INVIAS-2022 en la Tabla 237-1 (Tipos de productos químicos no tradicionales). Estos estabilizantes componen una estrategia para el mejoramiento de las propiedades del suelo que sea más rentable y con buenos resultados en comparación con los métodos convencionales de construcción de vías; adecuándose a las condiciones medio ambientales y de tránsito [12].

Existe una oportunidad para el caso de las vías terciarias que son carretera con menor tráfico en comparación con las vías principales. Estas vías son de gran importancia para conectar poblaciones y territorios alejados, por lo que existe una mayor flexibilidad para adaptarse a las condiciones locales en donde un estabilizante puede ser suficiente para la demanda puntual. Por ello, considerando la relación entre el costo, la demanda de tráfico y el impacto ambiental, la elección de un estabilizante alternativo puede ser más ventajosa en vías terciarias en comparación con la emulsión

asfáltica.

Un suelo que puede clasificarse como estable es aquel que tiene una capacidad de resistencia ante los efectos climáticos locales y de trafico, por lo que se espera que no sufra deformaciones considerables o un excesivo desgaste. Sin embargo, existen suelos que dado a su composición granulométrica y contenido óptimo de humedad, tienen naturalmente el grado de resistencia esperado con solo hacer la respectiva compactación para poder ser usado como vía. En este punto la estabilización intenta aumentar la durabilidad de las características del suelo, mejorando algunas propiedades como la erosión, la plasticidad, permeabilidad o índice de expansión.

## 2.2. Planteamiento

- ¿Cómo influye la aplicación de un aditivo comercial, el cemento y los agregados tipo roca muerta provenientes de las canteras Cachibí y La Roca en la capacidad de soporte de la subrasante en vías terciarias?

## 2.3. Objetivos

### Objetivo general

- Evaluar la influencia de un aditivo comercial y de los agregados provenientes de las canteras Cachibí y La Roca en la capacidad de soporte de la subrasante en vías terciarias.

### Objetivos específicos

- Caracterizar las muestras con el fin de reconocer sus propiedades físicas y mecánicas.
- Analizar el incremento en la capacidad de carga del suelo estabilizado mediante el índice CBR para las diferentes dosificaciones.
- Determinar los espesores óptimos de la capa de rodadura estabilizada con el aditivo.
- Estimar los costos asociados a la implementación de la capa de rodadura estabilizada con el aditivo.

## 2.4. Justificación

En comparación con la red primaria y secundaria de carreteras en Colombia, las vías terciarias destacan por su extensión en todo el país, abarcando 142,284 kilómetros de los 204,855 que constituyen la totalidad de la red vial del país, estas carreteras desempeñan un papel crucial ya que

promueven la oferta de servicios públicos esenciales como salud, seguridad y educación; además,facilita la conexión eficiente entre los centros de producción rural y los centros de acopio urbanos representando para el año 2019 el 2 % del Producto Interno Bruto (PIB) [13]. No obstante, debido a su extensión considerable, el estado carece de los recursos y la capacidad operativa necesarios para mantener su condición óptima de servicio. Esto se traduce en inversiones gubernamentales a largo plazo y, en la mayoría de los casos, correcciones y reparaciones, lo que ralentiza el crecimiento económico local debido a la falta de vías adecuadas para el transporte de productos hacia las zonas urbanas [1].

El estado de las vías terciarias en Colombia desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico del país. En el año 2021, el gobierno destinó una inversión considerable de $4,25 billones exclusivamente para el mantenimiento de estas vías, según reportó el diario La República. Este esfuerzo no solo se tradujo en una mejora de la infraestructura vial, sino que también generó un impacto social significativo al crear 65.681 nuevos empleos en diversas comunidades a lo largo del territorio colombiano. Estos datos subrayan la estrecha relación entre la inversión en vías terciarias y el crecimiento económico, destacando el potencial transformador que tiene la mejora de la infraestructura vial en la prosperidad del país.[14].

Generalmente en la patología de las vías sin pavimentar se produce un deterioro considerable en la subrasante, principalmente porque esta capa está compuesta entre otros materiales por finos que tienden a aglutinarse sobre el material más grueso como consecuencia directa de la lluvia y/o humedad de la zona. Esto se suma a la acción del tráfico que pulveriza el material fino, lo que produce que quede suspendido en el aire debido a su baja densidad limitando en ocasiones la visibilidad de los conductores. [15]. Este desgaste progresivo en la rodadura también produce hundimientos, baches y depresiones.

Las vías terciarias de Colombia en su gran mayoría son suelos arcillosos y en general blandos, susceptibles a la humedad, lo que produce que las vías sean mas susceptibles a tener baches o deformaciones, además de que los suelos arcillosos tienden a volverse resbaladizos y fangosos cuando están húmedos, lo que dificulta la tracción de los vehículos y aumenta el riesgo de accidentes. El uso de estabilizantes en la rodadura de vías terciarias con suelos arcillosos y alto contenido de humedad es fundamental para mejorar la calidad de estas carreteras y garantizar la seguridad y accesibilidad de las comunidades rurales. La inversión en la estabilización de subrasante puede traducirse en ahorros a largo plazo y en un mayor desarrollo económico de las regiones afectadas. [15].

Es importante destacar que la construcción de vías terciarias utilizando métodos avanzados como la Placa Huella o el Doble Riego es costosa, se estima que el valor de cada kilómetro de vía puede alcanzar los 500 millones de pesos [16]. Además, la falta de recursos por parte de los diferentes municipios para llevar a cabo actividades de construcción o mantenimiento de vías reduce significativamente la posibilidad de consolidar una óptima red vial terciaria a nivel nacional. Por lo tanto, se hace necesario buscar alternativas que posibiliten la mejora de la calidad y utilidad de estas vías sin requerir inversiones tan elevadas. En la actualidad, con el avance de la tecnología, existen aditivos como la tecnología QI-BINDER, que aprovechan los suelos disponibles en la región y mejoran su capacidad de soporte, esto permite la creación de pavimentos de alta calidad y buena transitabilidad por un periodo de vida determinado a un costo más económico [17]. Además, esta tecnología promueve la reducción de los tiempos de desplazamiento, la posibilidad de que vehículos

de mayor capacidad accedan a ella, un aumento en la disponibilidad de servicios para satisfacer las necesidades de los residentes y, en términos generales, una disminución de los gastos de transporte; esto podría tener un impacto positivo en la calidad de vida de los habitantes rurales, al agilizar la distribución de productos y estimular la economía regional.

Un proyecto de estabilización química de suelos con el aditivo QI-BINDER para vías terciarias en Colombia podría interesar a diversas partes, entre las que se incluyen: en primera instancia, el gobierno nacional y local, las entidades gubernamentales a nivel nacional, departamental y municipal , estos entes son los principales interesados en mejorar la infraestructura vial debido a que estas podrían ayudar a mejorar la conectividad en áreas rurales y remotas, lo que a su vez puede tener un impacto positivo en la economía local y el acceso a servicios básicos. En segunda instancia, el ministerio de transporte, debido a que es el encargado de supervisar y financiar proyectos de infraestructura vial en Colombia, por lo que un proyecto que involucre tecnología avanzada de estabilización de suelos como QI-BINDER a un costo menor con respecto a las metodologías convencionales podría ser de su interés para mejorar la eficiencia y durabilidad de las vías terciarias.

Continuando con lo anterior, en tercera instancia, las empresas de construcción podrían tener disposición al aplicar la tecnología QI-BINDER ya que lograrían que sus proyectos sean mas competitivos y sostenibles; además, los fabricantes y distribuidores del aditivo QI-BINDER podrían promover el uso de su producto en el mercado colombiano y contribuir en proyectos de estabilización. En cuarta instancia,las instituciones de investigación locales podrían estar interesadas en colaborar en proyectos que evalúen y validen la efectividad de este aditivo en las condiciones específicas de Colombia para constituir una metodología mas económica e innovadora.Por ultimo, las comunidades locales, debido a su capacidad para mejorar la accesibilidad a servicios esenciales, impulsar el desarrollo económico local, reducir costos de mantenimiento, aumentar la seguridad vial, elevar la calidad de vida y fomentar la participación comunitaria.

# 3. MARCO DE REFERENCIA

Una vía se diseña para permitir el tránsito de vehículos y proporcionar una sólida capacidad para soportar las cargas con el fin de asegurar su durabilidad. El pavimento, compuesto por múltiples capas de material, desempeña un papel esencial al distribuir eficientemente las cargas del tráfico hacia las capas inferiores y cumplir con requisitos de superficie de rodadura, fricción, geometría y aspecto estético. Desde una perspectiva estructural, el pavimento debe resistir las demandas del tráfico y las condiciones ambientales, incluyendo todas las capas de la carretera, como la carpeta de rodamiento, la base, la subbase y la subrasante. En adición, cada capa del pavimento tiene la doble función de distribuir tensiones y resistir las cargas sin deformaciones permanentes, y en carreteras de bajo tráfico, se emplean una o varias capas granulares cuando no es viable construir un pavimento convencional [18].

Continuando con lo anterior, cada una de estas capas cuenta con un propósito específico. En primer lugar, la subrasante es el suelo bajo del pavimento que sirve como fundación, y su calidad influye en la construcción y eficiencia del mismo [19]; si esta capa es deficiente, se requiere reemplazar el material o agregar una subbase, que es la encargada de controlar los cambios de volumen, transmitir cargas uniformemente a la subrasante y actuar como drenaje. La capa base es esencialmente estructural y absorbe las cargas de los vehículos, distribuyéndolas a la subbase y, finalmente, al terreno de fundación. Por último, la capa granular es utilizada en pavimentos de bajo tráfico para absorber y distribuir las tensiones generadas por el tráfico, evitando deformaciones excesivas, y puede estar compuesta por material propio o de préstamo, con la opción de emplear técnicas de estabilización si es necesario.

Cuando se encuentra un suelo que no cumple con los requisitos mecánicos necesarios para su uso directo, se tienen tres opciones posibles: utilizarlo con aportes mínimos, reemplazarlo por otro material o modificar sus propiedades mediante estabilización. En este contexto, se aborda la alternativa de la estabilización del suelo, la cual se refiere a la mejora de sus características físicas a través de procesos mecánicos y la introducción de sustancias químicas, naturales o sintéticas. El resultado es un suelo sólido y resistente que puede soportar las exigencias del tráfico y las condiciones climáticas adversas, manteniendo su estabilidad y evitando deformaciones o deterioro. En general, es posible estabilizar la mayoría de los suelos, pero cuando esta estabilización requiere la adición de otros suelos o de elementos como cemento, cal o cloruro de sodio, los costos pueden resultar muy altos si el suelo en cuestión no cumple con ciertas condiciones específicas. Algunos usos comunes para la estabilización de suelos incluyen mejorar suelos granulares propensos a daños por heladas y tratar suelos limosos o arcillosos para reducir cambios en su volumen, entre otros.

### 3.0.1. Suelo

T. William Lambe y Robert V. Whitman en el libro *Mécanica de suelos* definen el suelo como un sistema de partículas, ya que al ser observado incluso a simple vista en un puñado de arena de playa, revela su composición de granos independientes. Esta característica es común a todos los suelos, si bien muchas partículas son tan diminutas que se necesitan técnicas microscópicas avanzadas para distinguirlas adecuadamente, a diferencia de los cristales metálicos, las partículas discretas que conforman el suelo no están unidas con la misma fuerza, lo que les permite moverse relativamente con libertad entre sí; a su vez, estas partículas son sólidas, por lo que no poseen la misma facilidad de movimiento que los elementos de un fluido. [20]

Badillo J y R. Rodríguez en el libro *Mécanica de suelos* exponen que es frecuente la idea errónea de que el suelo es simplemente una mezcla aleatoria de partículas orgánicas e inorgánicas, sin ninguna forma de organización. Sin embargo, en realidad, el suelo es un conjunto con una estructura definida y propiedades que cambian de manera vectorial. Por lo general, estas propiedades varían mucho más rápidamente en dirección vertical que en horizontal. La palabra suelo abarca una amplia gama de materiales terrosos, desde rellenos de desechos hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Se excluyen de esta definición las rocas ígneas o metamórficas sólidas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se descomponen o ablandan rápidamente debido a la acción de la intemperie.[21]

#### 3.0.1.1. Subrasante

De acuerdo con el manual de diseño de pavimentos para vías con altos, medios y bajos volúmenes de tránsito del Invías se puede definir como la subrasante como la capa de material natural que cumple la función de soportar las cargas transmitidas por la estructura del pavimento aportando a su estabilización. En este mismo documento se puede clasificar la subrasante de acuerdo con su resistencia otorgada por el CBR ( %). [22]
El Invías identifica los siguientes tipos de subrasante en la siguiente tabla:

| Clase o Tipo | CBR (%) | Módulo resiliente (kg/cm$^2$) |
|---|---|---|
| S1 | < 2 | < 200 |
| S2 | 2 - 5 | 200 – 500 |
| S3 | 5 - 10 | 500 – 1.000 |
| S4 | 20 - 10 | 1.000 – 2.000 |
| S5 | > 20 | > 2.000 |

**Figura 3.5:** Clasificación de la subrasante de acuerdo con el INVÍAS, para CBR de menores al 2-5 %, se requiere sustitución del material o mejoramiento del mismo mediante productos como la cal y el cemento para mejorar sus características mecánicas. [22]

#### 3.0.1.2. Roca muerta

La roca muerta es un tipo de suelo residual formado sobre la roca madre, que no ha sufrido ningún tipo de alteración. Este suelo residual se desarrolla a partir de la descomposición y meteorización de la roca madre, resultando en un material que conserva algunas características de la roca original, pero que ha perdido gran parte de su cohesión y resistencia estructural. La descomposición se debe a procesos naturales como la acción del agua, el viento, las fluctuaciones de temperatura y la actividad biológica, que gradualmente desintegran la roca madre en partículas más finas.

La roca muerta es un suelo residual que presenta una composición y textura heterogéneas, con una mezcla de partículas que varían desde gravas y arenas hasta limos y arcillas. Esta variabilidad en la granulometría influye en sus propiedades mecánicas, como la permeabilidad y la estabilidad volumétrica. La roca muerta puede permitir un buen drenaje en algunos casos, pero en otros puede retener agua, lo que afecta su estabilidad y capacidad de soporte. Además, la presencia de partículas finas y la pérdida de cohesión en comparación con la roca madre original resultan en una menor capacidad de soporte. Su susceptibilidad a cambios volumétricos debido a variaciones en el contenido de humedad, especialmente si contiene altos niveles de arcillas expansivas, puede causar problemas de hinchamiento y contracción, comprometiendo la estabilidad de las estructuras construidas sobre ella.

En la ingeniería civil, la roca muerta se utiliza en diversas aplicaciones, siempre con una adecuada evaluación y tratamiento para mejorar sus propiedades. Puede ser empleada en la construcción de terraplenes y rellenos donde no se requieren altas capacidades de soporte, aunque es esencial realizar una adecuada compactación y estabilización para evitar asentamientos futuros. En proyectos de construcción de caminos y bases de pavimento, la roca muerta puede servir como una subbase adecuada si se compacta correctamente y se estabiliza con productos como la cal, el cemento o aditivos especializados . Además, su uso en el control de erosión y estabilización de taludes ayuda a prevenir deslizamientos de tierra y a mantener la integridad de las pendientes.

### 3.0.2. Propiedades del suelo

#### 3.0.2.1. Relación peso-volumen

El suelo se compone de dos elementos principales: los sólidos del suelo, también conocidos como granos minerales, y los espacios vacíos, lo que lo convierte en un medio poroso. Estos espacios vacíos pueden contener aire o agua. Cada componente del suelo tiene su propio peso y volumen, lo que facilita la deducción de las relaciones entre ellas. En cuanto a las relaciones en volumen, se destacan la relación de vacíos, la porosidad y el grado de saturación. Por otro lado, las relaciones en peso incluyen la humedad, el peso específico de las partículas sólidas, el peso específico del agua, el peso específico seco, el peso específico aparente y el peso específico saturado. [23]

#### 3.0.2.2. Plasticidad

Por un lado,Arthur Casagrande, pionero en la mecánica de suelos, define la plasticidad de los suelos como la capacidad de un suelo para deformarse sin romperse bajo la aplicación de una fuerza. Según Casagrande, esta propiedad es especialmente importante en suelos finos, como arcillas y limos, que pueden experimentar grandes deformaciones cuando se encuentran en condiciones húmedas. La plasticidad se evalúa mediante los límites de Atterberg, que incluyen el límite líquido y el límite plástico. Estos límites determinan los rangos de contenido de agua en los cuales un suelo pasa de un estado sólido a un estado plástico, y finalmente a un estado líquido. La plasticidad es crucial para entender el comportamiento de los suelos en ingeniería, ya que influye en su capacidad de carga y estabilidad.[24]

Por otro lado, Karl Terzaghi, complementa esta definición describiendo la plasticidad como la propiedad que permite a los materiales finos, principalmente arcillosos, sufrir deformaciones significativas sin fracturarse cuando se someten a tensiones. Terzaghi destaca que la plasticidad está estrechamente relacionada con el contenido de agua del suelo y la naturaleza mineralógica de las partículas. Al igual que Casagrande, Terzaghi utiliza los límites de Atterberg para medir la plasticidad, subrayando el límite líquido y el límite plástico como indicadores clave. Según Terzaghi, un suelo con alta plasticidad tendrá un amplio rango de humedad en el que puede permanecer en estado plástico, lo cual es esencial para prever el comportamiento del suelo bajo cargas estructurales y para diseñar soluciones de ingeniería adecuadas que garanticen la estabilidad de las construcciones.[25]

#### 3.0.2.3. Densidad

B. M. Das, en su libro "Principles of Geotechnical Engineering", describe la densidad del suelo como una característica que indica la compactación del suelo y su capacidad para soportar estructuras. Das destaca la importancia de la densidad aparente (bulk density) y la densidad seca (dry density). La densidad aparente considera el peso del suelo con su contenido de humedad natural, mientras que la densidad seca excluye el agua, proporcionando una medida más consistente para comparar diferentes suelos. Das enfatiza que una mayor densidad seca generalmente indica un suelo más estable y menos susceptible a la compresión y asentamiento. [26]

Lambe y Whitman, definen la densidad del suelo como una propiedad fundamental que influye en la resistencia y la deformabilidad del suelo. Según estos autores, la densidad del suelo se puede medir en términos de densidad total, que incluye los espacios porosos llenos de aire o agua, y densidad específica, que se refiere únicamente a la masa de las partículas sólidas del suelo. La densidad específica es esencial para clasificar y comparar suelos, mientras que la densidad total es crucial para analizar el comportamiento del suelo in situ. Lambe y Whitman subrayan que la densidad es un indicador clave de la compacidad y la capacidad de soporte del suelo, afectando directamente el diseño y la construcción de fundaciones y otras estructuras. [27]

### 3.0.3. Ensayos de laboratorio

Clasificación de suelos

La clasificación de suelos sugiere dividir los suelos en grupos con comportamientos semejantes.La relación entre ciertas características y un conjunto específico dentro de un sistema de clasificación generalmente se desarrolla de manera empírica a lo largo de muchos años de experiencia.[20]

La mayoría de los sistemas de clasificación de suelos se basan en pruebas simples para obtener las características necesarias que permitan asignarlos a un grupo específico. Estas características típicamente incluyen la distribución de tamaños de partículas, los límites de Atterberg, el contenido de materia orgánica, entre otros. Estas clasificaciones son herramientas valiosas para los ingenieros, ya que proporcionan indicaciones generales basadas en la experiencia empírica acumulada. Sin embargo, es importante que el ingeniero sea cauteloso al depender exclusivamente de las clasificaciones de suelos para resolver problemas de flujo, asentamiento o estabilidad, ya que esto podría llevar a resultados desfavorables.[20]

El sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), fue desarrollado por Terzaghi y Hogentogler en 1928 y ha experimentado múltiples revisiones desde entonces, este sistema se utiliza principalmente en el ámbito de la ingeniería de carreteras para la construcción de terraplenes, subrasantes, subbases y bases de carreteras. Su conceptualización se basa en los resultados obtenidos en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el límite plástico.[28]

La evaluación de los suelos se realiza dentro de cada grupo mediante un índice de grupo, que se calcula mediante una ecuación empírica. El comportamiento geotécnico de un suelo está inversamente relacionado con su índice de grupo, lo que significa que un suelo con un índice de grupo igual a cero se considera "bueno"para la construcción de carreteras, mientras que un índice de grupo igual a 20 o más indica un material "muy malo"para este propósito.Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares en los cuales un 35 % o menos de las partículas pasan a través del tamiz Nž 200. Por otro lado, aquellos suelos que tienen más del 35 % de partículas que pasan a través del tamiz $N^o$ 200 se clasifican en los grupos de material fino A-4, A-5, A-6 y A7. Estos suelos, principalmente limo y arcilla, tienen características específicas que los diferencian de los materiales granulares.[28]

El índice de grupo está dado por la siguiente ecuación:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

donde:
F = porcentaje pasado por el tamiz núm. 200
LL = límite líquido
PI = índice de plasticidad

**Tabla 1** Nomenclatura para el Sistema de Clasificación AASHTO[2]

| Clasificacion general | materiales granulares (35 % o menos pasa la No 200) | | | | | | | materiales limo arcillos (mas de 35 % pasa la No 200) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A-1 | | A-3 | A-2 | | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 |
| Clasificacion de grupo | A-1a | A-1b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | | | A-7-5* A-7-6** |
| Analisis de cernido: porcentaje que pasa: | | | | | | | | | | | |
| N0. 10 | 50 max | | | | | | | | | | |
| N0. 40 | 30 max | 50 max | 51 min | | | | | | | | |
| N0. 200 | 15 max | 25 max | 50 max | 35 max | 35 max | 35 max | 35 max | 36 min | 36 min | 36 min | 36 min |
| caracteristicas de la fraccion que pasa la N0. 40 | | | | | | | | | | | |
| Limite liquido | | | | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min |
| Indice de plasticidad | 6 max | | NP | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min |
| Indice de grupo | 0 | | 0 | 0 | | 4 max | | 8 max | 12 max | 16 max | 20 max |
| * A – 7 – 5 : IP < wL – 30) **A – 7 – 6 : IP > (wL – 30) | | | | | | | | | | | |

**Figura 3.6:** Nomenclatura para el Sistema de Clasificación AASHTO. [29]

Por otro lado, se encuentra la clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), inicialmente propuesto por Casagrande en 1948 para las operaciones de construcción del aeródromo durante la Segunda Guerra Mundial, en 1952 en colaboración con el U.S. Bureau of Reclamation este sistema fu e revisado. Hoy en día, este sistema, estandarizado como Norma ASTM D-2487, es ampliamente adoptado por ingenieros en donde clasifican los suelos en dos categorías principales: La primera ,incluye los suelos de grano grueso, como la grava y la arena en su estado natural, con menos del 50 % que pasa a través del tamiz núm. 200, identificados por símbolos de grupo que comienzan con $G$ o $S$. Por otro lado, los suelos de grano fino, con más del 50 % que pasa por el tamiz núm. 200, se representan con símbolos de grupo que inician con $M$ para limo inorgánico, $C$ para arcilla inorgánica, $O$ para limos orgánicos y arcillas, y $Pt$ para turba, lodo y otros suelos altamente orgánicos. Además, se emplean símbolos adicionales como $W$ para bien clasificado, $P$ para mal clasificado,$L$ para baja plasticidad (límite líquido menor de 50) y $H$ para alta plasticidad (límite líquido mayor de 50).

| Criterio para la asignación de símbolos de grupo | | | | Símbolos de grupo |
|---|---|---|---|---|
| **Suelos de grano grueso** Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200 | **Gravas** Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4 | Gravas limpias Menos de 5% finos[a] | $C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$ | GW |
| | | | $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$ | GP |
| | | Gravas con finos Más de 12% finos[a,d] | $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) | GM |
| | | | $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) | GC |
| | **Arenas** 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4 | Arenas limpias Menos de 5% finos[b] | $C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$ | SW |
| | | | $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$ | SP |
| | | Arenas con finos Más de 12% finos[b,d] | $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) | SM |
| | | | $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) | SC |
| **Suelos de grano fino** 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200 | **Limos y arcillas** Límite líquido menor que 50 | Inorgánico | $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)[e] | CL |
| | | | $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)[e] | ML |
| | | Orgánico | $\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OL | OL |
| | **Limos y arcillas** Límite líquido 50 o más | Inorgánico | Gráficos *PI* en o por encima de línea "A" (figura 4.2) | CH |
| | | | Gráficos *PI* por debajo de "A" línea (figura 4.2) | MH |
| | | Orgánico | $\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OH | OH |
| Suelos altamente orgánicos | Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico | | | Pt |

[a] Gravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.
[b] Arenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.
[c] $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$
[d] Si $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.
[e] Si $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

**Figura 3.7:** Sistema unificado de clasificación de suelo (basado en el material que pasa por el tamiz núm. 75). [30]

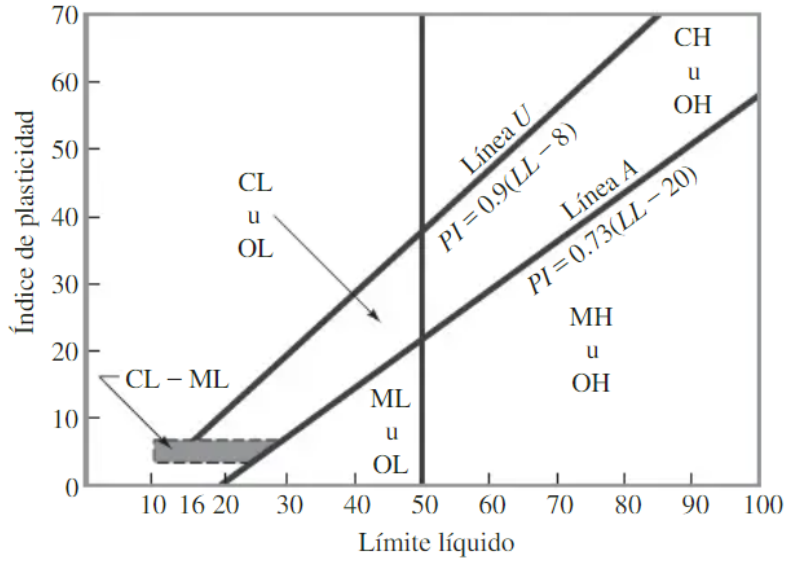



**Figura 3.8:** Gráca de plasticidad. [30]

#### 3.0.3.1. Granulometría

La granulometría se trata de la cuantificación de la distribución de tamaños de partículas presentes en un suelo. Para determinar la distribución de partículas mayores de 75 m (retenidas en el tamiz No. 200), se utiliza el método de tamizado, mientras que la distribución de partículas menores de 75 m se establece mediante un proceso de sedimentación con un hidrómetro. [31]

Después de dispersar la muestra de suelo en agua, se transfiere la lechada resultante a un cilindro para la sedimentación, completando su volumen a 1000 ml con agua destilada. Luego, se agita la lechada volteando el cilindro durante un minuto y se realizan lecturas de sedimentación a intervalos de tiempo específicos: 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos.Para medir la sedimentación con un hidrómetro, se introduce cuidadosamente en la suspensión unos segundos antes de la lectura, y después de cada medición, se registra la temperatura de la suspensión. Después de la última lectura con el hidrómetro, la suspensión se filtra a través de un tamiz de 75 m (No. 200) y se enjuaga con agua potable hasta que el lavado adquiera un tono claro. Posteriormente, el material retenido en el tamiz se recoge en un recipiente apropiado, se seca en un horno y se somete a un análisis por tamizado, utilizando los tamices necesarios según la especificación del material en cuestión.[31]

Así pues, teniendo en cuenta los dos métodos de análisis se logra determinar la curva granulométrica del suelo.

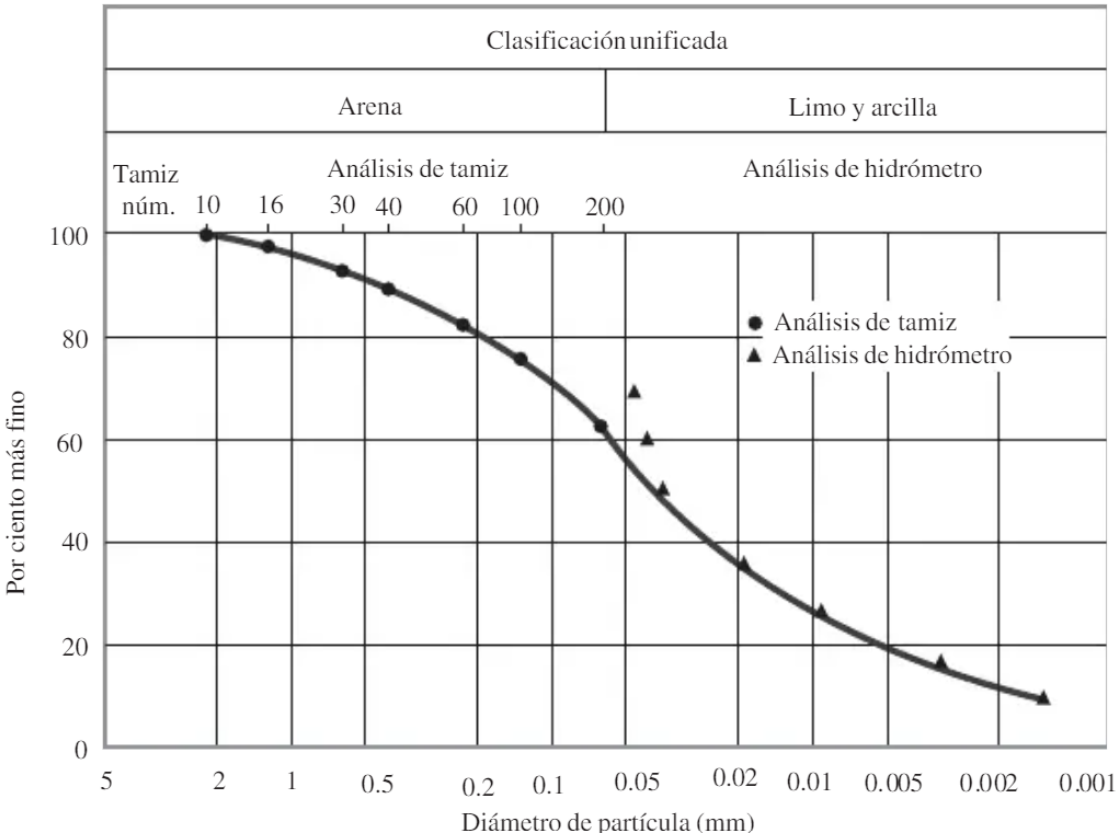



**Figura 3.9:** Curva de distribución de tamaño de partícula: análisis de tamiz y de hidrómetro. [30]

A partir de la curva de distribución de tamaños (curva granulometrica) es posible determinar tres parámetros básicos para realizar la clasificación granulométrica del suelo: Tamaño efectivo, coeficiente de uniformidad y coeficiente de gradación. Se dice que un suelo bien gradado tiene un coeciente de uniformidad mayor que 4 para las gravas, 6 para las arenas y un coeciente de gradación entre 1 y 3 para gravas y arenas. [30]

El coeficiente de uniformidad está dado por la siguiente expresión.

$$Cu = \frac{D60}{D10}$$

El coeficiente de gradación está dado por la relación

$$Cc = \frac{D30^2}{(D60) * (D10)}$$

Donde
Cu = coeciente de uniformidad.
Cc = coeciente de gradación.
D60 = diámetro correspondiente al 60 % más no en la curva de distribución de tamaño de partícula.
D30 = diámetro correspondiente al 30 % más no.
D10 = diámetro correspondiente al 10 % más no.

#### 3.0.3.2. Ensayo de compactación

El procedimiento del ensayo de compactación implica la compactación de una muestra de suelo en un molde cilíndrico bajo condiciones específicas. El suelo se seca y tamiza para eliminar partículas mayores al tamiz No. 4 (4.75 mm), asegurando una muestra homogénea y representativa. Luego, se compacta en tres capas con un martillo de 2.5 kg que cae desde una altura fija de 30.5 cm, simulando las condiciones de campo. Cada capa recibe 25 golpes uniformemente distribuidos para garantizar la uniformidad en la compactación.

La importancia del ensayo radica en su capacidad para proporcionar datos precisos sobre la densidad seca máxima y el contenido de agua óptimo del suelo. Estos parámetros son fundamentales para establecer las condiciones de compactación necesarias para asegurar la estabilidad estructural y la resistencia del suelo frente a cargas aplicadas. La curva de compactación resultante del ensayo muestra la relación entre la densidad seca y el contenido de agua, permitiendo a los ingenieros seleccionar el contenido de agua adecuado para lograr la máxima densidad seca y, por lo tanto, la resistencia óptima del suelo.Además de proporcionar datos cruciales para el diseño y la construcción de estructuras, el ensayo de compactación también ayuda a evaluar la calidad de los materiales del suelo. Los resultados del ensayo permiten a los ingenieros determinar si un suelo es adecuado para

su uso como material de base o subbase en proyectos de infraestructura, o si requiere tratamientos adicionales para mejorar sus propiedades de compactación y resistencia. Esto es fundamental para garantizar la durabilidad y la estabilidad de las obras civiles a lo largo de su vida útil.[26]

#### 3.0.3.3. California Bearing Ratio CBR

La metodología de California Bearing Ratio (CBR) para el diseño de pavimentos tuvo su origen en la División de Carreteras de California, a raíz de investigaciones realizadas entre 1928 y 1929. Estas investigaciones identificaron los principales tipos de fallas en los pavimentos, que incluyen el desplazamiento lateral de la subrasante debido a la absorción de agua por parte del pavimento, los asentamientos diferenciales de los materiales subyacentes y la deformación excesiva de los materiales. Con el propósito de predecir el comportamiento de estos materiales en la construcción de pavimentos, se estableció el ensayo de CBR en 1929. Este ensayo se realizó en una amplia variedad de materiales típicos, como piedra triturada de alta calidad, que se consideraron como muestras patrón. En otras palabras, el promedio de los resultados de estos ensayos se designó como el 100 % del CBR. [32]

El procedimiento para llevar a cabo un ensayo de California Bearing Ratio (CBR) según las normas del INVIAS (2013), específicamente el INV E-148-13, implica la estandarización de todas las variables involucradas. Este ensayo consiste en utilizar una muestra de suelo colocada en un molde de 152.4 mm de diámetro y 177 mm de altura, ya sea tomada directamente del terreno o preparada en el laboratorio, y penetrarla con un pistón circular de 1935 mmš a una velocidad de 1.27 mm/min. Durante la penetración, se registra el esfuerzo requerido para penetrar el suelo a profundidades de 2.54 mm y 5.08 mm, y se aplican sobrecargas que representan la presión equivalente a la que se generaría por todas las capas de pavimento que se construirán sobre el suelo en estudio. Se requiere al menos la utilización de dos sobrecargas. Es importante destacar que, dado que el CBR es un porcentaje de una carga estándar, es posible que en algunos casos el valor reportado supere el 100 %. Normalmente, se calcula el valor de CBR a una penetración de 2.54 mm (0.1") para propósitos de diseño; sin embargo, si la relación a 5.08 mm (0.2") resulta ser mayor, se utiliza este último resultado. A continuación se muestran los valores de esfuerzo obtenidos en la muestra patrón [32].

| Penetración (pg) | Esfuerzo (psi) |
|---|---|
| 0.1 | 1000 |
| 0.2 | 1500 |
| 0.3 | 1900 |
| 0.4 | 2300 |
| 0.5 | 2600 |

**Figura 3.10:** Valores de esfuerzo de muestra patrón para cálculo de CBR.

Los estudios realizados han identificado varios factores del suelo que influyen significativamente en los resultados del ensayo del CBR, entre los cuales se destacan la textura, la densidad y la humedad del suelo, así como el tipo de material ensayado. Por ejemplo, se ha observado que los suelos granulares no experimentan cambios volumétricos significativos durante el periodo de

inmersión, lo que implica que las sobrecargas no son críticas en la ejecución del ensayo para este tipo de suelos. Por otro lado, los suelos arcillosos, que son más susceptibles a los cambios volumétricos en presencia de agua, mostrarán valores de CBR que estarán fuertemente influenciados por la magnitud de las sobrecargas aplicadas durante el ensayo. Esta información resalta la importancia de considerar las características específicas del suelo al interpretar los resultados del ensayo de CBR y sugiere la necesidad de adaptar los procedimientos de ensayo según el tipo de suelo en cuestión.

Los valores CBR ofrecen una medida crucial de la calidad del suelo y su capacidad para soportar cargas. En este sentido, los suelos con valores de CBR cercanos a 0 % se consideran de pobre calidad, lo que sugiere una baja capacidad para resistir cargas y una mayor propensión a la deformación y al fallo bajo cargas de tráfico. Por otro lado, valores de CBR cercanos al 100 % son indicativos de la mejor calidad del suelo, caracterizados por una alta resistencia y capacidad de soporte, lo que implica una menor susceptibilidad a la deformación y al fallo estructural. Estos suelos son altamente deseables para la construcción de pavimentos y estructuras de ingeniería donde se requiere una base sólida y estable para garantizar la durabilidad y seguridad a largo plazo.

### 3.0.4. Estabilización de suelos

Para estabilizar un suelo se requiere de la aplicación de procesos que alteran sus propiedades iniciales, y se logra una mejora en el comportamiento del material desde el punto de vista resistente, incrementando o protegiendo sus características mecánicas, estabilidad de volumen, capacidad de drenaje, entre otras. [33]

En las obras de ingeniería, es crucial evaluar la incidencia de cada componente estructural y su funcionalidad dentro del proyecto. Una de las partes más importantes de la estructura es la que transfiere los esfuerzos al suelo. Por ello, es esencial analizar los parámetros del material sobre el que se apoyará la estructura de la obra civil. Dependiendo de las características del material de soporte, se pueden implementar diferentes sistemas, cuyo costo variará. Si el material no proporciona una estabilidad adecuada, el costo de la solución estructural aumentará; en caso contrario, la solución será menos costosa y a menudo más simple.En ciertos proyectos, se opta por reemplazar o modificar el suelo para mejorar sus propiedades químicas y físicas. La estabilización del suelo implica alterar sus propiedades para obtener un material que cumpla con los requisitos estructurales necesarios. Según el tipo de suelo, se pueden implementar diversos tratamientos para alcanzar las características deseadas. La mayoría de los trabajos de estabilización se realizan en carreteras, donde es fundamental mejorar la capacidad del suelo para disipar las cargas del tráfico vehicular.[34]

La estabilización del suelo puede lograrse a través de diversas técnicas, cuya elección depende de las características iniciales del suelo y de las mejoras requeridas para cumplir con los requisitos del proyecto. Estas técnicas pueden aplicarse directamente en el sitio (in situ) o mediante la creación de rellenos artificiales. El objetivo de estos tratamientos es transformar el suelo en un material con propiedades mecánicas estables y adecuadas para soportar las estructuras planificadas. En proyectos de gran envergadura, como la construcción de puentes, carreteras y edificios altos, la mejora del suelo es crucial para garantizar la durabilidad y seguridad de las estructuras. El análisis geotécnico detallado y las pruebas de laboratorio son pasos esenciales en el proceso de selección

de la técnica de estabilización adecuada. Además, es importante considerar factores ambientales y económicos para elegir el método más sostenible y rentable. [35]

Entre las técnicas más comunes de estabilización in situ se encuentran la adición de agentes estabilizantes como la cal, el cemento y los polímeros. Estos materiales mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, aumentando su capacidad de carga y reduciendo su susceptibilidad a la expansión y contracción. Además, el uso de métodos de compactación, como la compactación dinámica y la compactación por vibración, también puede aumentar significativamente la densidad y la resistencia del suelo.Por otro lado, la construcción de rellenos artificiales implica la sustitución del suelo natural inadecuado por materiales de relleno que ofrecen mejores características de soporte y estabilidad. Estos rellenos pueden incluir gravas, arenas y mezclas especialmente diseñadas para proporcionar una base sólida y estable. [35]

Al abordar el mejoramiento del suelo, es fundamental entender que no se trata de una medida correctiva, sino de una estrategia preventiva para enfrentar condiciones extremas y adversas que puedan afectar la estructura de una obra civil. Es importante reconocer que cada método de mejoramiento es aplicable solo a un grupo limitado de materiales. Desafortunadamente, algunos estratos de suelo muestran una gran variabilidad de materiales en pocos metros de profundidad y en relación con la extensión del área analizada. Esta variabilidad puede limitar la aplicabilidad de los sistemas de estabilización.Para el ingeniero constructor, es esencial considerar varias propiedades clave del suelo, entre las que se incluyen la resistencia mecánica, la durabilidad, la estabilidad volumétrica, la compresibilidad y la permeabilidad. Estas propiedades determinan la idoneidad del suelo para soportar estructuras y asegurar su rendimiento a largo plazo. [36]

#### 3.0.4.1. Estabilización química de suelos

En su investigación, Pérez [2] destaca que, en suelos de fundación con baja capacidad de soporte y presencia de arcilla débil o compresible, es común reemplazar los suelos arcillosos de baja calidad por grava arenosa, piedra triturada y arena, compactándolos para mejorar la capacidad de carga. Hoy en día, además de los aspectos tradicionales como costo, tiempo y calidad en la ejecución de obras, la preocupación por el medio ambiente se ha convertido en un factor clave en la extracción y transporte de material para reemplazar suelos deficientes y en la gestión de vertederos para materiales inapropiados. Por lo tanto, es cada vez más importante aprovechar los materiales disponibles en el área de la obra, independientemente de sus propiedades. Esto requiere un análisis detallado de sus características para tomar las medidas necesarias y garantizar su desempeño satisfactorio a lo largo de la vida útil de la obra, todo ello a un costo razonable, como lo subraya el estudio de Beltrán y Copado [37].

La estabilización química de suelos implica la aplicación de un producto químico conocido como estabilizador, que se debe mezclar a fondo con el suelo y curar de acuerdo con las especificaciones técnicas del producto. Este proceso tiene como objetivo desencadenar una reacción química en el suelo con el estabilizador para alterar sus características y propiedades, mejorando su capacidad de soportar cargas dinámicas durante la construcción y el uso posterior. Los estabilizadores químicos pueden ser diversos, como sales, enzimas, polímeros, productos derivados del petróleo,cal, asfalto y cemento Portland, entre otros. Estos estabilizadores químicos pueden influir en una o varias propiedades del suelo, dependiendo del tipo de estabilizador y las condiciones de aplicación, así

como del tipo de suelo tratado. Se pueden clasificar en tres categorías: primero, aquellos que impermeabilizan los granos del suelo o proporcionan cohesión; segundo, los que crean una unión cementante entre las partículas del suelo para brindar fuerza y durabilidad; y tercero, los destinados a suelos finos, como arcillas, que alteran la interacción entre el agua y las partículas arcillosas, reduciendo la plasticidad, minimizando cambios de volumen, formando uniones cementantes y aumentando la resistencia del suelo.

Vásquez destaca que en el proceso de estabilización de suelos, no hay un estabilizador universal que mejore todas las propiedades de los suelos por igual. Existen numerosos agentes estabilizantes que ofrecen mejoras diversas en las características físicas y mecánicas del suelo. Por lo tanto, la elección adecuada del método de estabilización comienza por reducir al mínimo los agentes estabilizadores posibles, teniendo en cuenta las limitaciones de las fuentes de materiales, el clima, el tráfico y los requisitos del diseño del pavimento, así como minimizar el impacto ambiental. Una vez identificados los posibles agentes de estabilización, se procede a diseñar mezclas con ellos en diversas proporciones para determinar los porcentajes óptimos. Esto permite tomar decisiones económicas en su aplicación.[38]

Una de las técnicas para estabilizar suelos en carreteras implica el uso de productos químicos no tóxicos que mejoran significativamente la resistencia, capacidad de carga y resistencia al agua, reduciendo la sensibilidad a los cambios volumétricos durante el ciclo de humedecimiento y secado. En el mercado, varias empresas ofrecen productos estabilizadores como enzimas orgánicas, aceites sulfonados, compuestos inorgánicos y cloruros. Sin embargo, su eficacia en nuestro país no siempre es óptima, lo que puede resultar en soluciones costosas y desperdicio de fondos públicos. Vásquez subraya que la estabilización no solo implica lograr un suelo lo suficientemente resistente para soportar cargas, sino también garantizar su durabilidad con propiedades mejoradas en términos de estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad y compresibilidad. La durabilidad es esencial para el rendimiento a largo plazo de la vía.[38]

En la actualidad, el proceso de estabilización no se limita a suelos de baja calidad, sino que también se aplica a capas granulares compuestas por gravas de calidad tratadas. Estos materiales se producen en plantas especializadas y están sujetos a estrictos controles de calidad antes de su transporte a la obra. Hasta ahora, los principales aditivos utilizados han sido el cemento y la cal, pero estos aumentan los costos de construcción y no controlan adecuadamente la pérdida de humedad en los suelos utilizados como base para edificaciones.

#### 3.0.4.1.1 Estabilización de suelos con adición de cemento

La estabilización de suelos mediante la adición de cemento es un proceso que implica una transformación significativa en las propiedades del suelo. Este método se basa en la introducción de cemento Portland a un suelo previamente pulverizado. El cemento interactúa con las partículas del suelo, generando cambios en sus propiedades moleculares superficiales. Este tratamiento no solo mejora la cohesión entre los granos del suelo, sino que también puede hacer que los granos se adhieran entre sí, resultando en un incremento notable de la resistencia del suelo.El proceso de estabilización comienza con la pulverización del suelo existente para garantizar una mezcla homogénea con el cemento. Una vez que el cemento se agrega al suelo pulverizado, se lleva a cabo la compactación del material. La hidratación del cemento, al mezclarse con el agua presente

en el suelo, induce una reacción química que endurece la mezcla, formando una matriz rígida que mejora las propiedades mecánicas del suelo tratado.Esta técnica de estabilización no solo incrementa la resistencia del suelo a las cargas, sino que también mejora su durabilidad y reduce su susceptibilidad a la expansión y contracción debidas a cambios en el contenido de humedad. Además, el suelo estabilizado con cemento presenta una mayor resistencia a la erosión y una mejor capacidad para soportar las estructuras sobre él, como carreteras, pavimentos y edificaciones. [35]

Además, es importante destacar que una de las principales limitaciones para el uso del cemento como material de estabilización de suelos radica en la dificultad de lograr una mezcla homogénea con ciertos tipos de suelos. Aunque estos suelos pueden tener características físicas óptimas, no siempre presentan las condiciones de trabajabilidad necesarias para una estabilización eficaz. Por ejemplo, las arcillas con una consistencia suave y altos contenidos de humedad natural pueden ser especialmente problemáticas. Estas arcillas tienden a ser pegajosas y difíciles de mezclar uniformemente con el cemento, lo que impide que la mezcla adquiera la consistencia y resistencia deseadas. Asimismo, los suelos granulares limpios, como las arenas sueltas y las gravas sin finos, pueden no retener el cemento de manera efectiva, dificultando la formación de una matriz sólida y estable.[39]

Según Montejo , en la estabilización de suelos con cemento, tanto la composición química del suelo como su granulometría juegan un papel crucial. Para lograr una estabilización económica en proyectos viales, es ideal que el suelo no contenga partículas mayores de 75 mm (3) o un tercio del espesor de la capa tratada. Además, menos del 50 % del suelo debe pasar por el tamiz de 75 ţm (No. 200), y tanto el límite líquido como el índice de plasticidad deben ser inferiores a 40 y 18, respectivamente. La composición química del suelo también es fundamental; el suelo debe tener un bajo contenido de materia orgánica y estar libre de cantidades significativas de sales perjudiciales, como los sulfatos, ya que estos elementos pueden dificultar que el suelo estabilizado con cemento alcance la resistencia y durabilidad deseadas, similar a los desafíos enfrentados en el concreto. El autor también menciona que algunas arcillas altamente plásticas, que no cumplen con los límites mencionados, pueden ser tratadas exitosamente. Este tratamiento previo implica el uso de un 2 o 3 % del mismo cemento o de cal hidratada, lo cual mejora la trabajabilidad del suelo y reduce su plasticidad, permitiendo que la estabilización con cemento sea más efectiva.[40]

#### 3.0.4.1.2 Estabilización con aditivo QI-BINDER

QI-BINDER es un estabilizador químico basado en resinas poliméricas biodegradables en fase acuosa, diseñado para su aplicación en vías sin pavimentar mediante aspersión. Su formulación permite que la solución penetre en el suelo y forme una capa superficial compacta, reduciendo la emisión de material particulado generado por el tráfico y el viento. Su uso disminuye la necesidad de riegos frecuentes con agua, proporcionando una alternativa sostenible para la estabilización de caminos no pavimentados.

Para su aplicación, QI-BINDER se diluye en agua y se distribuye uniformemente sobre la superficie, aprovechando su capacidad humectante para mejorar la compactación y cohesión del suelo. La formación de una capa consolidada reduce la generación de polvo y mejora la estabilidad del camino frente al tránsito y condiciones ambientales adversas. Su almacenamiento debe realizarse en recipientes cerrados y protegidos de contaminantes externos, siguiendo las prácticas estándar para productos químicos.

Este sistema es adecuado para el control de polvo en caminos no pavimentados, incluyendo aquellos en entornos mineros o de alto tránsito, operando con dosis optimizadas para cada condición de suelo. Su formulación favorece la consolidación del material superficial, reduciendo la resistencia al rodamiento y contribuyendo a una mayor eficiencia en el consumo de combustible. Además, minimiza el uso de agua destinada al riego sin generar superficies resbaladizas ni requerir infraestructura adicional.

Según la ficha técnica, QI-BINDER es un líquido viscoso compuesto por biopolímeros (25 %), tensioactivos (10 %) y excipientes (7 %). Sus propiedades químicas incluyen un pH de 7,0 ś 0,5, viscosidad entre 9.000 y 10.000 cP y un peso específico de 1,0 a 1,1. Su solubilidad en agua es del 100 %, lo que facilita su dispersión homogénea en soluciones acuosas. En estado puro, presenta un color gris visón y un punto de ebullición de 100řC.

### 3.0.5. Método de la Portland Cement Association (PCA)

El método de diseño de capas estabilizadas con suelo-cemento, propuesto por la Portland Cement Association (PCA), se fundamenta en una amplia base de datos obtenida a través de múltiples enfoques: investigaciones científicas, desarrollos teóricos, ensayos de pavimentos a escala real y estudios de desempeño de pavimentos en condiciones de servicio. Gracias a un programa de investigación exhaustivo, la PCA logró correlacionar esta información de manera efectiva, desarrollando un procedimiento específico y optimizado para pavimentos de suelo-cemento.

Este método tiene en cuenta factores clave como la resistencia a la compresión y la durabilidad de la mezcla, así como su capacidad para resistir cargas de tráfico típicas de vías rurales y terciarias. También incorpora parámetros de resistencia a la erosión y al desgaste, asegurando que la capa estabilizada pueda soportar tanto la exposición al agua como las condiciones climáticas adversas durante el período de diseño. El enfoque de la PCA se orienta a crear una base de pavimento sólida y duradera, capaz de mantener su estabilidad estructural y funcionalidad a lo largo del tiempo, optimizando así los recursos de construcción y mantenimiento de las vías.

## 3.1. Antecedentes

En el año 2018, E. Serrano Rodríguez y E. Padilla González llevaron a cabo un estudio en la Universidad de La Salle en Bogotá, Colombia, con el propósito de identificar las variaciones en las propiedades mecánicas de materiales de subrasante mediante la adición de materiales poliméricos. La investigación se centró en recopilar las principales investigaciones sobre las modificaciones de las propiedades de subrasante mediante la adición de fibras naturales y sintéticas, con el fin de proporcionar una base teórica para justificar la aplicación de estas adiciones a nivel constructivo. El enfoque metodológico consistió en la recopilación de bibliografía relevante sobre la modificación de subrasante con polímeros y la evaluación del cambio en sus propiedades mecánicas, seguido de la síntesis y discusión de los resultados. Los principales hallazgos indicaron que el 65 % de las investigaciones encontradas se enfocaron en estudios sobre las modificaciones de la resistencia a la compresión, mientras que el 30 % se dirigieron a estudios sobre la respuesta de los esfuerzos de

tracción con fibras poliméricas, y el 5 % restante evaluó propiedades como la fatiga o la resistencia a la tensión axial. Se observó un aumento considerable en la resistencia a la compresión, que variaba según el tipo o material mezclado con el suelo y cemento. [41]

En 2010, J. B. Hernández-Zaragoza, J. Horta Rangel, V. Castaño, A. Coronado y A. Teresa López-Lara llevaron a cabo una investigación en Querétaro, México. La metodología consistió en el análisis de muestras de suelo natural y suelo tratado con poliuretano, un material comúnmente utilizado en la construcción para sellar grietas, con el fin de estabilizar los cambios volumétricos en estos suelos. Los resultados revelaron que el suelo tratado con polímero presentó una reducción considerable en el límite líquido , alcanzando casi un 50 % de disminución con un 4 % de polímero, y una reducción aún mayor del índice plástico. Además, se observó que la mezcla suelo-polímero redujo significativamente la expansión en comparación con el suelo natural, aproximadamente en un 40 % (véase figura 3.11). En términos de resistencia, aunque la compresión simple mostró una ligera disminución en el suelo tratado con polímero, la resistencia seguía siendo suficiente para construcciones ligeras, lo que indica que el suelo modificado conserva su utilidad constructiva. Asimismo, se observó un cambio en la clasificación del suelo, pasando de arcilloso de alta compresibilidad (CH) a limo de baja compresibilidad (ML) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). [42]

| **Material** | ***Límite Líquido, %*** | ***Límite Plástico, %*** | ***Límite de Contracción, %*** | ***Índice Plástico, %*** |
|---|---|---|---|---|
| Suelo natural | 89,7 | 36,0 | 12,5 | 53,7 |
| Suelo-polímero 4% | 49,3 | 28,2 | 17,9 | 21,1 |
| Suelo-polímero 6% | 48,8 | 36,0 | 17,7 | 12,8 |
| Suelo-polímero 8% | 44,0 | 38,8 | 20,7 | 5,2 |
| Suelo-polímero 10% | 45,3 | 37,0 | 19,5 | 8,2 |

**Figura 3.11:** Propiedades Índice en suelo natural y suelo polímero (valores promedio). [42]

Nesterenko D en 2017 investigó una técnica de estabilización de suelos con polímeros, adaptada al contexto peruano, y evaluó parámetros estructurales de suelos de obras viales en Perú. La metodología incluyó caracterización física y mecánica de áridos en estado natural y tratados con poliacrilamida (PAM), realizando ensayos de granulometría, límites de consistencia, clasificación de suelos, relación humedad-densidad y CBR en cinco tipos de suelos. Los resultados mostraron que las muestras tratadas con PAM mejoraron significativamente su capacidad de soporte en comparación con las no tratadas, tanto al 95 % como al 100 % de densidad máxima seca (MDD).El estudio concluyó que el PAM puede ser una solución efectiva para caminos con baja capacidad portante (CBR <30 %), incrementando el CBR en más del 20 % en promedio. Además, las muestras estabilizadas con PAM mostraron un aumento del 2 % en la densidad máxima seca y una reducción del 8 % en el contenido óptimo de humedad, lo que implica ahorro de agua en la construcción. También se observó un incremento promedio del 70 % en el CBR al 95 % MDD y del 58 % al 100 % MDD, especialmente en suelos con un índice plástico (IP)  9, mejorando así la capacidad portante

y la vida útil del pavimento. [43]

Ñahuis Ríos, B. A en 2020 llevó a cabo un estudio para analizar el efecto del uso de polímeros sintéticos en la estabilización de suelos en la subrasante de la Avenida Universitaria en Carabayllo, Lima. La metodología consistió en mejorar el suelo mediante la adición de un estabilizador químico, un polímero sintético tipo plástico (PET), utilizando dosis óptimas de 2 %, 5 % y 7 %. Los resultados del ensayo mostraron que, al añadir 2 % de PET al suelo natural, el valor del CBR al 95 % de densidad máxima seca (MDS) aumentó de 9.20 % a 11.70 %, incrementando en 2.50 %. Sin embargo, al incorporar 5 % de PET, el CBR disminuyó a 6.30 %, y con 7 % de PET se redujo a 4.00 %. Para el CBR al 100 % MDS, el suelo natural tenía un valor de 11.00 %, que aumentó a 14.10 % con 2 % de PET (incremento de 3.10 %), pero disminuyó a 7.50 % con 5 % de PET y a 4.80 % con 7 % de PET. Además, el índice de plasticidad del suelo natural era de 9.00 %. Al incorporar 2 % de PET, el índice de plasticidad disminuyó a 5.00 %, y con 5 % y 7 % de PET, se mantuvo en 5.00 % y 6.00 %, respectivamente. Estos resultados indican que, aunque pequeñas dosis de PET mejoran la capacidad de soporte del suelo, dosis mayores reducen su resistencia y aumentan la plasticidad. [44]

El estudio de Ramos Hinojosa,G.P (2014) en la Universidad Nacional del Centro del Perú se centró en mejorar la baja capacidad portante de las subrasantes en las vías del distrito de Paucará mediante la utilización de polímeros reciclados. El problema identificado fue la inestabilidad volumétrica y la baja capacidad portante de la subrasante arcillosa, con valores de CBR inferiores al 6 %. La metodología empleada incluyó la selección de tramos críticos y la realización de calicatas para analizar el efecto de la adición de polímeros reciclados en diferentes porcentajes. Se observó un incremento promedio del 26 % en el CBR y una disminución de la expansión en un 1.5 %. Aunque el primer tramo alcanzó un CBR de 7.17 % con un incremento del 24.41 % con respecto al suelo sin adición, el segundo solo logró un 4.85 %, lo cual no cumple con los requisitos del MTC. Se optó entonces por la estabilización suelo-cal, alcanzando un CBR de 16.9 %, y con la combinación de cal y polímeros, se logró un CBR de 18.20 %. Las conclusiones destacaron que, mientras los polímeros mejoran la capacidad portante, la cal aborda problemas de plasticidad, y su combinación reduce la formación de etringita, mejorando así la durabilidad del suelo. [45]

En 2018, Cuipal Chavez,B realizó un estudio en la Universidad Nacional del Centro del Perú con el objetivo de evaluar el impacto del uso de polímeros sintéticos en la mejora de suelos arcillosos en la subrasante de la carretera Chachapoyas-Huancas, Amazonas. Se llevaron a cabo tres calicatas a lo largo del tramo estudiado, revelando que los suelos tenían una capacidad de soporte CBR inferior al 6 %, según lo requerido por el MTC (2013). Para la estabilización, se utilizó un polímero sintético en porcentajes del 3 %, 6 % y 9 %, realizando 27 ensayos de CBR. Los resultados indicaron que la densidad máxima seca del suelo disminuía con la adición de polímeros, y que la expansión volumétrica aumentaba entre un 1 % y 2 % para adiciones del 6 % y 9 %. Aunque la capacidad de soporte CBR mejoró ligeramente con un 3 % de polímero, el incremento no fue suficiente para cumplir con los índices permitidos. En conclusión, la adición de polímeros sintéticos mejoraba la resistencia a la deformación pero no alcanzaba los valores mínimos de CBR requeridos. [46]

En 2016, Palomino Terán realizó un estudio en Cajamarca, Perú, con el objetivo de determinar la capacidad portante (CBR) de un suelo arcilloso mediante la incorporación de 2 %, 4 %, y 6 % del estabilizador Maxxseal 100. Se utilizaron doce especímenes de suelo arcilloso con este estabilizador, obteniendo los siguientes resultados: con una muestra patrón, el CBR fue de 5.10 %, incrementándose a 7 % con 2 % de Maxxseal 100, a 9.60 % con 4 % y a 11 % con 6 % para una penetración de 0.1. Para una penetración de 0.2, los valores fueron de 5.40 % con la muestra patrón, 7.30 % con 2 % de Maxxseal 100, 10.10 % con 4 % y 11.70 % con 6 %. La investigación demostró que a mayor porcentaje de Maxxseal 100, mayor es la capacidad portante (CBR) del suelo. Además, se observó una disminución del índice de plasticidad, pasando de un 19 % en el suelo natural a 16 % con 2 % de Maxxseal 100, a 13 % con 4 % y a 10 % con 6 %, confirmando la hipótesis de que la incorporación de este estabilizador mejora significativamente las propiedades mecánicas del suelo arcilloso.[47]

En su estudio de 2020, Contoguris Poma y Pasmiño Shahuano investigaron la estabilización de suelos finos utilizando el polímero Polycom en subrasantes. El objetivo principal era evaluar cómo este polímero afecta las propiedades de los suelos, particularmente en tipos de suelo A-7-6. Los resultados mostraron que al añadir Polycom en dosificaciones de 0.10, 0.20 y 0.30 kg/m3, se observó una mejora significativa en las características físicas del suelo. Con cada incremento en la dosificación del polímero, se redujo el límite líquido y la plasticidad de los suelos cohesivos, mientras que la Capacidad de Soporte (CBR) aumentó notablemente: hasta un 44.00 % en la calicata 1, un 39.10 % en la calicata 2 y un 38.00 % en la calicata 3 utilizando la mayor dosificación. Los ensayos de laboratorio confirmaron que el polímero Polycom mejora tanto las propiedades físicas como mecánicas de suelos limo arcillosos, lo que lo convierte en un material adecuado para la construcción de estructuras de pavimento. En conclusión, el uso del polímero Polycom es eficaz para la estabilización de suelos finos, mejorando sustancialmente sus características físicas y mecánicas.[48]

# 4. METODOLOGÍA

## 4.1. Tipo de estudio

La investigación se cataloga como predictiva y explicativa. Se centra en el análisis predictivo de la estabilización de suelos mediante métodos no tradicionales, tomando como referencia estudios previos realizados en Perú y Colombia. En Perú, se han abordado estas técnicas en trabajos de grado, mientras que en Colombia, el artículo A237 del INVIAS proporciona una descripción detallada. Además, la compañia Quimica Inteligente S.A.S que ofrece el aditivo QI-BINDER, una empresa con operaciones en la ciudad de Bucaramanga, añade un contexto práctico a la investigación.

El enfoque predictivo de la investigación busca anticipar el comportamiento y los resultados de la estabilización del suelo en base a la experiencia previa en distintas regiones y los resultados del estabilizante QI-BINDER. Se busca identificar patrones, tendencias y posibles escenarios futuros relacionados con la estabilización de suelos no tradicionales en diferentes contextos geográficos y climáticos.
La parte explicativa del estudio se basa en la capacidad de predecir diversas variables cruciales a través de la revisión de autores pertinentes y sus contribuciones. Entre estos, se destacan aquellos que han abordado la estabilización de suelos, permitiendo la extrapolación de conocimientos a través de la identificación de patrones y relaciones. Algunas de las variables que se pueden predecir mediante el enfoque explicativo incluyen:

- Datos del ensayo CBR, a través de la comprensión de cómo factores específicos afectan la resistencia del suelo.
- Contenido de humedad del suelo, considerando la relación entre las condiciones climáticas, el tipo de suelo y la eficacia de los métodos de estabilización.
- Tipo y cantidad del material estabilizante, mediante la evaluación de trabajos anteriores que detallan la influencia de diferentes agentes estabilizantes.
- Espesor de la capa estabilizada, al comprender cómo variables como la resistencia del suelo y el tipo de material afectan la determinación del espesor necesario.
- Costos y mantenimiento, a través del análisis de estudios anteriores que abordan aspectos económicos relacionados con la estabilización de suelos.

## 4.2. Fases

Para asegurar la correcta ejecución del proyecto, se decidió estructurar la metodología en cuatro fases alineadas con el objetivo de evaluar la influencia de un aditivo comercial y de los agregados provenientes de las canteras Cachibí y La Roca en la capacidad de soporte de la subrasante en vías terciarias. Cada fase del estudio fue diseñada para abordar aspectos fundamentales, abarcando desde la caracterización detallada de los materiales hasta la elaboración del presupuesto para la dosificación óptima del aditivo.

**Fase 1. Caracterizar el suelo extraído de las plantas de agregados Cachibí y La Roca con ensayos de laboratorio.**

Para la caracterización del material existente, el proceso de muestreo consistió en la extracción de agregados de las canteras Cachibí y La Roca. El material extraído se almacenó en sacos, debidamente etiquetados y protegidos para evitar contaminaciones o alteraciones, y luego fue transportado al laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle.



**Figura 4.12:** Recolección de material en la cantera La Roca y Cachibí

En las plantas de agregados Cachibí y La Roca se está generando roca muerta, un tipo de suelo residual que se forma sobre la roca madre como consecuencia del proceso de meteorización, el cual involucra tanto factores físicos como químicos. La roca muerta presenta características físicas y mecánicas muy distintas a las de la roca sólida, con una menor cohesión y resistencia, lo que limita su uso en aplicaciones estructurales. No obstante, puede tener potencial en ciertos proyectos de ingeniería, como rellenos o estabilización de taludes, siempre y cuando se realicen estudios previos para evaluar su idoneidad.

Después de la extracción del material, es necesario identificar sus propiedades a través de un análisis detallado. La siguiente tabla presenta los ensayos necesarios para la caracterización del suelo, de acuerdo con los procedimientos establecidos por la normativa INVIAS. Estos ensayos son fundamentales para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, lo que permite evaluar su idoneidad para proyectos de infraestructura vial. Cada ensayo proporciona información clave para asegurar que el suelo cumpla con los requisitos técnicos necesarios para garantizar la estabilidad y durabilidad de las estructuras.





**Figura 4.13:** Roca muerta en la cantera La Roca y Cachibí

**Tabla 4.1:** Ensayos de la norma INVIAS para la caracterzación del suelo

| Norma | Nombre del ensayo |
|---|---|
| INV E 123 13 | Determinación del tamaño de partículas de los suelos |
| INV E 125 13 | Determinación del límite líquido de los suelos |
| INV E 126 13 | Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos |
| INV E 133 13 | Equivalente de arena y agregados finos |
| INV E 180 13 | Clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (AASHTO) |

- **Determinación del tamaño de partículas de los suelos**

A cada una de las muestras de suelo se le realizó un análisis granulométrico para determinar la distribución de tamaños de partículas. El proceso comenzó con la obtención de una muestra representativas mediante el método de cuarteo. Esta muestra fue secada en un horno a 110$^o$C durante un periodo suficiente para eliminar toda la humedad, lo cual es crucial para asegurar la precisión del análisis. Posteriormente, el suelo fue lavado a través del tamiz $N.^o$ 200 para eliminar las partículas finas de arcilla y limo, mejorando así la separación de los componentes más gruesos.

Una vez completado el lavado y nuevamente llevado al horno, se procedió al tamizado manual utilizando una serie de tamices de diferentes tamaños. Los tamices se agitaron de manera uniforme, con movimientos laterales y circulares, asegurando una adecuada separación de las partículas. Después de la agitación, se registró el peso retenido en cada tamiz, lo cual fue clave para calcular la distribución porcentual de las partículas en función de su tamaño. Con estos datos, se generó la curva granulométrica de cada muestra, lo que permitió un análisis exhaustivo de las características del suelo en relación con la distribución de tamaños de partículas.





**Figura 4.14:** Granulométria de los agregados de las canteras Cachibí y La Roca

- **Determinación del límite líquido de los suelos**

Se determinó el límite líquido de cada una de las muestras, para ello, se seleccionó una muestra de 300 (g) del material que pasó a través del tamiz $N.^o$ 40. Esta muestra fue mezclada homogéneamente con agua en un recipiente, asegurando una distribución uniforme de la humedad. El suelo húmedo se colocó en la cápsula de Casagrande, alisando cuidadosamente la superficie hasta alcanzar una altura uniforme de 1 cm, utilizando una espátula para evitar la formación de burbujas de aire que podrían afectar la precisión del ensayo.

Luego, con el acanalador, se realizó un corte en la masa de suelo siguiendo el eje de simetría de la cápsula, dividiéndolo en dos mitades. A continuación, se giró la manivela del dispositivo Casagrande de manera uniforme a una velocidad constante de 2 revoluciones por segundo, hasta que el surco se cerró en su parte inferior. Se registró el número de golpes necesarios para cerrar el surco, asegurándose de que este número fuera inferior a 35 golpes, que es el umbral para el límite líquido. El proceso se repitió dos veces más, ajustando la cantidad de agua para obtener un número de golpes entre 15 y 35.

En cada repetición, se tomó una pequeña muestra del suelo de la zona donde se cerró el surco y se pesó en una balanza de precisión. Luego, estas muestras fueron secadas en un horno durante 24 horas a $110^oC$ para determinar su contenido de humedad. Todos los datos obtenidos se registraron y tabularon para construir la curva de Humedad vs. Número de golpes, lo que permitió calcular con precisión el límite líquido de cada muestra y evaluar su comportamiento plástico, un parámetro clave en la clasificación y diseño de suelos para este tipo de proyectos.





**Figura 4.15:** Límite líquido de los agregados de las canteras Cachibí y La Roca

- **Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos**

Se determinó el límite plástico de las muestras de suelo utilizando una parte de la pasta preparada previamente. Esta pasta debía tener una consistencia plástica, similar a la de la plastilina, lo que indica que el suelo está en su estado plástico adecuado para el ensayo. A continuación, se moldearon pequeños rollos cilíndricos de aproximadamente 3 mm de diámetro, haciéndolos rodar sobre una superficie lisa de vidrio para garantizar uniformidad en su forma y tamaño.

Una vez formados los rollos, se dividieron en dos porciones y se pesaron cuidadosamente en una balanza de precisión, usando recipientes para su manejo. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en un horno y secadas durante 24 horas a una temperatura de 110$^o$C, con el fin de eliminar completamente la humedad. Al finalizar el secado, las muestras fueron nuevamente pesadas para determinar su masa en estado seco. Con estos datos, se calculó el contenido de humedad de cada muestra. El promedio de los valores obtenidos se utilizó para determinar el límite plástico del suelo. Después de determinar tanto el límite líquido como el límite plástico mediante sus respectivos ensayos, se procedió a calcular el Índice Plástico (IP), que es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. El IP es un parámetro crucial para clasificar los suelos según su plasticidad, lo que ayuda a evaluar su comportamiento ante deformaciones.



**Figura 4.16:** Límite plástico para las muestra de suelo.

- **Equivalente de arena de suelos y agregados finos**

El ensayo de equivalente de arena (EA) se llevó a cabo conforme a los procedimientos establecidos para materiales granulares en la norma INV-133-13, aplicados en muestras de roca muerta provenientes de las canteras estudiadas donde se pesaron 3 oz (85 g) de roca muerta previamente secada al horno a 110$^o$C y tamizada para eliminar partículas mayores a los límites establecidos en la norma, estos especímenes fueron divididos en dos partes iguales y colocados en dos probetas de 15 de altura.



**Figura 4.17:** Montaje de las probetas para EA

Primero se debe realizar un periodo de humedecimiento donde se preparó una solución compuesta por formaldehído, siguiendo las proporciones establecidas por la normativa, asegurando su completa homogeneidad antes de su aplicación. Posteriormente, esta solución se vertió cuidadosamente en las probetas con ayuda de un irrigador, hasta cubrir por completo la muestra de roca muerta. Este proceso, tiene una duración aproximada de 10 minutos, permitiendo la adecuada impregnación del material en la solución.



**Figura 4.18:** Muestra en periodo de humedecimiento

Terminado el periodo de humedecimeinto, se llenan las probetas hasta 15 pulgadas y se cierran con un tapón plástico, deben ser agitadas manualmente en ciclos de 90 repeticiones aproximadamente unos 30 segundos, aplicando un movimiento uniforme para permitir que las partículas finas se dispersen completamente en la solución. Una vez completada la agitación, las probetas fueron dejadas en el periodo de sedimentación durante 20 minutos en posición vertical, permitiendo que las partículas sedimenten de forma natural en la solución.



**Figura 4.19:** Lectura de la arcilla y arena

Al finalizar el periodo de sedimentación se anota la lectura de la arcilla que es el nivel de la parte superior en suspensión, luego se introduce el dispositivo de lectura y se deja caer hasta que por su propio peso se detenga, cuando esto ocurra, el dispositivo está sobre el nivel de la arena y se toma la lectura de la arena. Con estos dos parámetros ya se puede calcular el equivalente de arena (EA) de la siguiente forma:

$$EA = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100 \tag{4.1}$$

Si el resultado es un número decimal este se debe ser redondeado al número entero superior, por ejemplo si se obtiene un EA=49.1 deber ser redondeado a un EA=50.

- **Clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (AASHTO y SUCS)**

Para realizar la clasificación de los suelos según los métodos SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), fue imprescindible completar los ensayos de granulometría, límite líquido, límite plástico y el cálculo del índice de plasticidad. Estos ensayos proporcionan la información básica necesaria para evaluar las propiedades del suelo en términos de tamaño de partículas, contenido de finos y comportamiento plástico.

Con los resultados del análisis granulométrico, se procedió a interpretar los datos conforme a los criterios establecidos por la normativa ASTM. Este análisis permitió determinar la proporción de grava, arena, limo y arcilla en cada muestra, lo cual es fundamental para la clasificación inicial del suelo. A partir de esta información, se compararon los resultados con las tablas y gráficos normativos que especifican los requisitos mínimos y rangos aceptables para cada clasificación de suelo, tanto en el sistema SUCS como en el AASHTO. El sistema SUCS clasifica los suelos principalmente en función de la granulometría y las propiedades plásticas, lo que permite identificar suelos como bien graduados (GW), mal graduados (GP), arcillosos (CL, CH) o limosos (ML, MH). Por otro lado, el método AASHTO, utilizado principalmente para aplicaciones en infraestructura vial, se enfoca en la capacidad de los suelos para ser utilizados en bases, subbases y pavimentos. Esta

clasificación, basada en la cantidad de finos y el comportamiento plástico, otorga una calificación numérica (A-1 a A-8) que permite evaluar su idoneidad para carreteras.

Ambos métodos son complementarios y permiten una visión más completa de las propiedades y comportamientos de los suelos en diferentes condiciones. Con los ensayos concluidos y los resultados interpretados, fue posible clasificar cada muestra de suelo de manera precisa.

**Fase 2. Determinar el índice CBR para las diferentes dosificaciones de aditivo QI-BINDER** .

Una vez caracterizadas las muestras de suelo, se procede a realizar los ensayos de durabilidad de acuerdo con lo estipulado en el artículo 350.2.2 del Manual de Diseño de Carreteras de INVÍAS. Estos ensayos son esenciales para evaluar la resistencia del suelo, garantizando que cumpla con los estándares requeridos para su uso en capas de bases y subbases de pavimentos. Además, permiten validar la idoneidad del material frente a las condiciones de carga y las exigencias del tránsito vehicular. A continuación, se presenta un desglose detallado de los ensayos de durabilidad requeridos según la normativa vigente:

**Tabla 4.2:** Ensayos geomecánicos de la norma INVIAS

| Norma | Nombre del ensayo |
|---|---|
| INV E - 141 - 13 | Relaciones humedad-peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) |
| INV E - 148 - 14 | CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre la muestra inalterada |
| INV E - 612 - 13 | Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento |
| INV - E - 614 | Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo cemento:<br>·Resistencia a la compresión a los 7 días<br>·Resistencia a la compresión a los 28 días para capas de rodadura minima.<br>·Comportamiento de la resistencia con incremento en el contenido de cemento y edad |

- **Definir la dosificación del aditivo liquido por proporción de cemento:**

La determinación de la dosificación adecuada del aditivo implicó una evaluación detallada del tipo de suelo presente extraído de la cantera Cachibí y La Roca, la cual se basó en los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio previamente mencionados. Posteriormente, dado que las recomendaciones proporcionadas por QI-BINDER en su guía específica establecen rangos para la cantidad de aditivo líquido a utilizar entre el 0.1 % y el 0.5 %, se diseñó un proceso de dosificación combinada con cemento. Se realizaron las pruebas de laboratorio aplicando concentraciones

de aditivo del 0.3 % y 0.5 % en el agua de compactación del suelo, asegurando una correcta homogeneización antes de la aplicación en el terreno. Simultáneamente, se adicionará cemento en proporciones del 7 % y 9 % con respecto a la cantidad de sólidos en cada muestra.

**Tabla 4.3:** Dosificaciones específicas a evaluar

| **Dosificaciones específicas** |
|---|
| Aditivo líquido al 0.3 % y cemento al 7 %. |
| Aditivo líquido al 0.3 % y cemento al 9 %. |
| Aditivo líquido al 0.5 % y cemento al 7 %. |
| Aditivo líquido al 0.5 % y cemento al 9 %. |

- **Ensayo de compactación**

En este estudio se llevó a cabo el ensayo de compactación utilizando una muestra de suelo que pasó previamente por el tamiz $N.^o$ 4 (con una apertura de 4.75 mm) para asegurar que el material empleado fuese lo suficientemente fino y representativo del suelo en campo. El proceso de compactación consistió en dividir el suelo en tres capas dentro de un molde cilíndrico estándar, aplicando 25 golpes en cada capa con un martillo de 24.5 N (5.5 lbf), desde una altura de 305 mm (12). La energía de compactación total generada durante el ensayo fue de 600 kN-m/mş, que es característica de este ensayo y permite simular las condiciones de compactación típicas en campo.Para estudiar el efecto de la humedad en la densidad del suelo, se añadieron cantidades crecientes de agua a las muestras: 100, 150, 200 y 250 gramos. Posteriormente, cada muestra fue compactada, y se determinó el peso de las mismas. Este procedimiento es esencial para observar cómo la cantidad de agua influye en el proceso de compactación. A medida que se incrementa el contenido de agua, la compactabilidad del suelo mejora hasta alcanzar un punto de humedad óptima. Superado este umbral, el exceso de agua provoca una reducción en la densidad seca del suelo debido a la saturación de los vacíos, lo que disminuye la eficiencia en el proceso de compactación.



**Figura 4.20:** Ensayo de compactación.

Después del proceso de compactación, se extrajo una pequeña porción de cada muestra para determinar su contenido de humedad mediante secado en horno a 110$^o$C, un método que garantiza

un cálculo preciso del porcentaje de agua presente en el suelo al momento de la compactación. Estos datos se emplearon para trazar la curva de compactación, que muestra gráficamente la relación entre el peso unitario seco del suelo y su contenido de humedad. El vértice de esta curva proporciona dos parámetros clave: la humedad óptima, que corresponde al contenido de agua necesario para que el suelo alcance su máxima densidad, y el peso unitario seco máximo, que define la densidad máxima que el suelo puede lograr bajo las condiciones controladas del ensayo.Estos parámetros son fundamentales para optimizar la compactación en campo, ya que permiten ajustar el contenido de agua de manera que se obtenga la mayor densidad posible, mejorando así la estabilidad y capacidad de carga del suelo.

- **Resistencia a la compresión de cilindros**

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión que según la norma INV 614 tiene como objetivo evaluar el comportamiento de suelos estabilizados con cemento. En este procedimiento se utilizó cilindros moldeados como especímenes de ensayo, con un diámetro de 101.6 mm (4") y una altura de 116.4 mm (4.584"), lo que da una relación altura/diámetro de 1.15. Para el ensayo, se preparó una muestra de suelo proveniente de las canteras Cachibi y La Roca, tratada con cemento en proporciones del 7 % y 9 % respecto al contenido total de masa seca, y con aditivo en proporciones de 0,3 % y 0,5 % del contenido óptimo de humedad. El suelo se mezcló completamente para garantizar una distribución uniforme del cemento, el aditivo y la humedad, asegurando así la homogeneidad de la mezcla. Luego, el material se compactó en moldes cilíndricos siguiendo las indicaciones normativas sobre la energía de compactación.

Tras la compactación, las muestras se curaron bajo condiciones controladas durante un tiempo especificado. Al final del período de curado húmedo, los especímenes se sumergen en agua durante 4 horas para asegurar una hidratación adecuada. Las pruebas de resistencia se realizaron a los 7 días y a los 28 días. A los 7 días, una serie de muestras se sometieron a una carga axial en una máquina de compresión. Durante este ensayo, se aplicó una carga progresiva hasta que la muestra falló, y se registró la carga máxima soportada para calcular la resistencia en megapascal (MPa).

Este ensayo se repitió a los 28 días, siendo este el valor de resistencia más representativo, especialmente en el caso de capas de rodadura, donde se exige cumplir con una resistencia mínima para garantizar que el pavimento soporte las cargas de tráfico a largo plazo. Esta resistencia final a los 28 días asegura que el suelo estabilizado tenga la capacidad necesaria para resistir las tensiones y deformaciones esperadas durante su vida útil. La resistencia unitaria a la compresión del espécimen se determinó mediante el cálculo de la carga máxima soportada durante el ensayo, dividiendo este valor por el área de la sección transversal del cilindro.

- **Humedecimiento y secado de mezclas compactadas**

En este proceso experimental, se añadió la cantidad requerida de cemento al suelo de las canteras Cachibi y La Roca, mezclándolo de manera completa hasta obtener un color uniforme. Posteriormente, para cada una de las dosificaciones mencionadas previamente, se incorporó la cantidad suficiente de agua potable junto con el aditivo, con el fin de alcanzar el contenido óptimo de humedad necesario para la compactación, asegurando así una mezcla homogénea.

Se formó un espécimen compactando inmediatamente la mezcla suelo-cemento en un molde con collar ajustado y nivelando su superficie. Se tomó una muestra representativa de al menos 100 (g), designada como el espécimen 1, que se utilizó para obtener datos relacionados con los cambios de humedad y volumen durante el ensayo. Luego, se formó un segundo espécimen, del cual se determinó el porcentaje de humedad y el peso unitario seco, para evaluar las pérdidas de suelo-cemento a lo largo del ensayo. Se midieron el diámetro y la altura promedio del espécimen 1 para calcular su volumen. Ambos especímenes se colocaron en dispositivos adecuados dentro de una cámara húmeda, donde permanecieron protegidos de la exposición directa al agua libre durante un período de 7 días. Al final de este período, se registraron la masa y las dimensiones del espécimen 1 para obtener datos sobre su contenido de humedad y volumen.

Posteriormente, los especímenes fueron sumergidos en agua potable a temperatura ambiente durante 5 horas. Tras la inmersión, se retiraron del baño de agua y se volvieron a registrar la masa y las medidas del espécimen 1 para evaluar los cambios en volumen y humedad. Finalmente, ambos especímenes fueron colocados en un horno durante 42 horas, tras lo cual se determinó y anotó la masa y las dimensiones del espécimen 1.



**Figura 4.21:** Ciclos de humedecimiento.

El espécimen 2, destinado a evaluar la pérdida de suelo-cemento, se somete a dos pasadas firmes con un cepillo de cerdas de alambre sobre toda su superficie. El cepillo se mantiene con su eje longitudinal paralelo al eje del espécimen, aplicando entre 18 y 20 pasadas verticales para cubrir dos veces los lados y cuatro pasadas sobre cada extremo. Este procedimiento, que incluye ciclos de humedecimiento y secado durante 48 horas, se repite hasta completar 12 ciclos. Al final de estos ciclos, se secan ambos especímenes y se pesan para determinar su masa seca. Los datos obtenidos permiten calcular los cambios de volumen y humedad del espécimen 1, así como las pérdidas de suelo-cemento en el espécimen 2 después de los 12 ciclos de ensayo. Cabe destacar que este ensayo se realiza para las dosificaciones de suelo-aditivo-cemento descritas en la figura 4.16 correspondiente, aplicables tanto a la cantera Cachibi como a la cantera La Roca.





**Figura 4.22:** Ciclos de secado.

- **CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre la muestra inalterada**

El ensayo de CBR (California Bearing Ratio) se realizó siguiendo los lineamientos de la norma INV 148, con el objetivo de evaluar la capacidad de soporte del suelo en condiciones controladas de laboratorio. Este procedimiento permite comparar la resistencia de una muestra de suelo con la de una muestra estándar de grava bien gradada, expresando el resultado en un valor porcentual que refleja la calidad del material para su uso en pavimentos. Para la preparación de las muestras, se utilizaron tres moldes cilíndricos, compactados con diferentes cantidades de golpes: 56, 26 y 12 golpes por capa, respectivamente. Cada muestra fue compactada en cinco capas, empleando un pisón de 2.5 kg, de acuerdo con los requerimientos de la norma para simular adecuadamente las condiciones que tendría el suelo tras su instalación en campo.

Tras la compactación, las muestras fueron sometidas a saturación por inmersión en agua durante 96 horas, con el fin de evaluar su comportamiento en condiciones de alta humedad, lo cual es fundamental para su desempeño en situaciones de saturación. Una vez preparada la muestra, se llevó a cabo el ensayo de penetración mediante un pistón circular que se introdujo en la superficie del suelo a una velocidad constante de 1.25 mm/min. Durante este proceso, se midieron los esfuerzos requeridos para que el pistón penetrara a profundidades de 2.54 mm (0.1) y 5.08 mm (0.2). Estas mediciones permitieron determinar la resistencia del suelo ante la deformación bajo cargas aplicadas.





**Figura 4.23:** Ensayo CBR en laboratorio.

El valor de CBR se calculó como la relación porcentual entre el esfuerzo medido en la muestra de suelo y el esfuerzo necesario para penetrar la misma profundidad en una muestra patrón de grava bien gradada. Esta muestra patrón tiene esfuerzos estándar predefinidos, que van de 1000 psi para una penetración de 2.54 mm (0.1 pulgadas) a 1500 psi para una penetración de 5.08 mm (0.2 pulgadas). Durante el cálculo del CBR, los esfuerzos medidos en el suelo deben compararse con estos valores patrón, lo que implica dividir los esfuerzos registrados por 1000 psi o 1500 psi, dependiendo de la profundidad de penetración evaluada. El resultado se expresa como un porcentaje, donde un valor de CBR más alto indica una mayor capacidad de soporte del suelo en comparación con la muestra de referencia.

Para el caso de estudio, se realizó el ensayo de CBR (California Bearing Ratio) para las muestras de suelo natural provenientes de las canteras Cachibí y La Roca. A partir de los resultados obtenidos, se seleccionó el suelo con el mayor porcentaje de CBR como base para analizar su comportamiento bajo diferentes dosificaciones de cemento y aditivo estabilizante. Aunque el artículo 350 de la norma INVÍAS no exige la realización del ensayo CBR para materiales a estabilizar, en esta investigación se decidió incluirlo con el objetivo de evaluar el desempeño inicial de cada material frente a este índice, identificando el potencial de soporte de cada suelo en estado natural y cómo este se ve influenciado por la estabilización química.

**Fase 3. Determinación de los espesores óptimos de la capa de rodadura estabilizada con el aditivo.**

Uno de los principales objetivos de la estabilización de suelos es fortalecer materiales débiles para que puedan ser utilizados como relleno en capas estructurales de obras viales. Al obtener un material más resistente, se busca reducir el espesor necesario de las capas estructurales, optimizando así el diseño y los recursos en la construcción del pavimento. Para la obtención de los datos de transitabilidad y las características del suelo de la subrasante, se tomó como referencia la investigación realizada por Hernández Antonio,J en el año 2023. Este estudio analiza el tramo comprendido entre el kilómetro K+000 y el kilómetro K 0+540, que abarca desde la vereda La Playa hasta el corregimiento de Frías, en el departamento del Tolima. Dicha vía, clasificada como terciaria (Vt), tiene un nivel de tránsito designado como To.

El diseño del espesor de la capa suelo-cemento con adición del aditivo QI-BINDER se llevará a cabo utilizando el método propuesto por la Portland Cement Association (PCA), este procedimiento considera diversos factores clave que influyen en la durabilidad y el desempeño del pavimento a lo largo del tiempo. El primero de estos factores es la resistencia del suelo, medida mediante el módulo de reacción k, este parámetro es esencial para evaluar la capacidad de soporte del suelo y garantizar que el pavimento pueda soportar las cargas aplicadas durante su vida útil. Además, se seleccionará un periodo de diseño de 20 años, el cual es convencionalmente adoptado en el método PCA para asegurar que el pavimento resista las cargas y condiciones climáticas esperadas durante dicho tiempo. En cuanto al tráfico, se analizarán el volumen y la distribución de pesos por eje, incluyendo tanto los ejes simples como tándem de camiones convencionales, para determinar el Tránsito Promedio Diario (TPD) y los porcentajes de camiones. A partir de estos datos, se proyectará el tráfico al futuro y se calculará el factor de fatiga, que es un parámetro fundamental para ajustar el espesor de la capa de base suelo-cemento.

Dado el tipo de tráfico vehicular en la zona, el número de vehículos comerciales (NVC) fue

limitado a un máximo de 15 vehículos diarios en el carril de diseño, con un Tránsito Promedio Diario (TPD) de 35 vehículos. Además, se estableció un periodo de diseño de 20 años y una tasa de crecimiento anual del 2 %. Dado que la tasa anual de crecimiento del tráfico es del 2 %, el factor de proyección para un periodo de diseño de 20 años es 1.2. Este incremento es moderado, ya que se trata de caminos rurales con tráfico limitado, lo cual sugiere que la demanda vehicular no tendrá un crecimiento significativo[49]

**Tabla 4.4:** Tasas anuales de crecimiento de tráfico y factores de proyección correspondientes

| **Tasa anual de crecimiento de tráfico ( %)** | **Factor de proyección para un periodo de diseño de 20 años** |
|---|---|
| 1 | 1.1 |
| $1\ \frac{1}{2}$ | 1.1 |
| 2 | 1.2 |
| $2\frac{1}{2}$ | 1.3 |
| 3 | 1.4 |
| $3\ \frac{1}{2}$ | 1.5 |
| 4 | 1.6 |
| $4\ \frac{1}{2}$ | 1.7 |
| 5 | 1.7 |
| $5\ \frac{1}{2}$ | 1.8 |
| 6 | 1.9 |

Según el estudio, para el diseño estructural de la vía los valores del módulo de reacción (k) se calcularán en función de correlaciones obtenidas con los valores de Capacidad de Soporte de California (CBR) determinados para las diferentes capas estructurales. Específicamente, el aporte estructural de la capa situada inmediatamente sobre la subrasante se evaluará considerando el incremento proyectado en el módulo de reacción de la subrasante. Esta evaluación se llevará a cabo empleando la ecuación:

$$k_{\text{subrasante}} = 2.55 + 52.5 \log(\text{CBR}), \quad \text{para CBR} \leq 10\,\% \tag{4.2}$$

De este modo, para un valor de CBR de 3.5 %, se obtiene un módulo de reacción (k) de 31 MPa/m para la subrasante, equivalente a 114.3 PCI. La importancia de este módulo de reacción radica en su capacidad para evaluar el desempeño estructural de la subrasante, permitiendo adaptar el diseño de la vía según las propiedades específicas del suelo y el volumen de tránsito proyectado para el periodo de diseño. Con respecto al factor de fatiga, en muchos casos no se dispone de datos sobre la distribución de cargas por eje para pavimentos con tráfico ligero, como calles residenciales o caminos secundarios. En ausencia de estos datos, se pueden utilizar los valores indicados en la Figura 4.22, los cuales son reconocidos por ofrecer espesores de diseño bastante razonables al satisfacer los requisitos de fatiga para pavimentos de suelo-cemento. Dado que el caso de estudio presenta un Tránsito Promedio Diario (TPD) de 35 vehículos, se seleccionará un factor de fatiga de 5, que corresponde al límite inferior para calles puramente residenciales con el valor de TPD

más bajo.

| Facilidad | TPD | Total de camiones* (%) Aprox. | Camiones pesados** (%) Aprox. | Factor de Fatiga*** |
|---|---|---|---|---|
| Calles puramente residencial…….. | 300 a 700 | 8 | 3 | 5 a 12 |
| Calles colectoras residenciales…. | 700 a 4,000 | 8 | 3 | 12 a 20 |
| Caminos secundarios…… | Hasta 2,000+ | 14 a 20 | 5 a 8 | 12 a 30 |

**Figura 4.24:** Factores de Fatiga representativos para pavimentos de tráfico ligero [50]

- **Ensayo normal de compactación**

Utilizando la metodología de la PCA, se determinará el espesor de la capa de suelo-cemento mediante la figura 4.21 para suelos-cemento granulares, y se realizará una lectura aproximada en décimas de pulgada con base en el factor de fatiga y el valor de k.

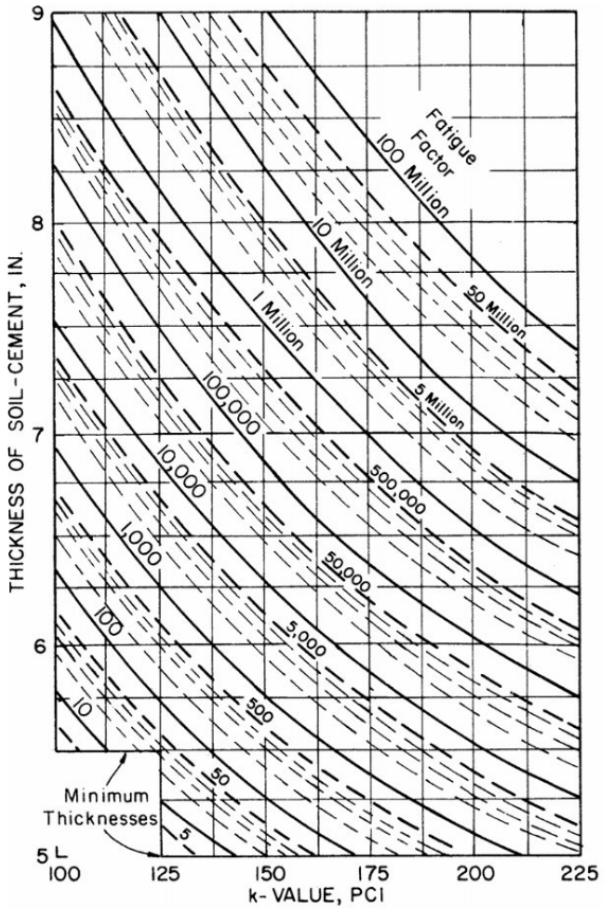



**Figura 4.25:** Carta para diseño de espesores para suelo-cemento granular. [50]

Una vez determinado el espesor de la capa estabilizada, es necesario calcular el espesor de la capa superficial bituminosa. Según las recomendaciones de la PCA, se debe redondear este espesor al valor superior más cercano de media pulgada. A continuación, se presentan los valores recomendados para cada espesor de suelo-cemento, basados en las pautas del diseño estructural.

| Espesor de Suelo-Cemento (pulg.) | Espesor de Superficie Bituminosa Recomendado (pulg.) | Espesor Mínimo de Superficie Bituminosa (pulg.) | |
|---|---|---|---|
| | | Área sin congelamiento | Área con congelamiento |
| 5 – 6 | ¾ – 1 ½ | SBST* | DBST* |
| 7 | 1 ½ – 2 | DBST | 1** |
| 8 | 1 ½ – 2 ½ | 1 | 1 ½ |
| 9 | 2 - 3 | 2 | 2 |

* SBST, Tratamiento superficial bituminoso simple; DBST, Tratamiento superficial bituminoso doble.

** Donde se emplee quitanieves se recomienda un mínimo de 1 ½ pulgada.

**Figura 4.26:** Espesores de Superficie Bituminosa

Es importante destacar que la determinación de los espesores se realizará únicamente para aquellas muestras que cumplan satisfactoriamente con los límites establecidos por la normativa en las pruebas de resistencia a la compresión, así como en los ensayos de ciclos de humedecimiento y secado.

**Fase 4. Estimar los costos asociados a la implementación de la capa de rodadura estabilizada con el aditivo QI BINDER**

- **Evaluar los beneficios a largo plazo como reducción de mantenimiento y vida útil extendida.**

Se desarrollará un análisis de precios unitarios conforme a la resolución 4151.010.21.1.0033 de abril 8 de 2024 de la Alcaldía de Santiago de Cali, por medio de la cual se definen los precios unitarios para el mantenimiento y construcción de pavimentos de la malla vial en la zona urbana y rural vigentes para el año 2024 con el propósito de comparar las propuestas tradicionales de transitabilidad como la placa huella respecto al pavimento suelo-cemento conformado por roca muerta estabilizada con cemento y aditivo QI-BINDER. En el análisis se incluirán las obras preliminares necesarias para la ejecución de los trabajos, como el replanteo y localización, la reconformación de la vía, las excavaciones y el transporte de materiales. Asimismo, se considerarán los insumos y materiales básicos, tales como agua, aditivo QI-BINDER, cemento, roca muerta, y mezcla asfáltica. Además, se incluirá la maquinaria requerida, como compactadores, camiones cisterna y motoniveladoras, considerando su intervención en las etapas de preparación, estabilización y compactación de la vía. Este enfoque permitirá obtener una visión integral de los costos asociados a cada propuesta, evaluando la eficiencia técnica y económica de las alternativas.

# 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

## 5.1. Ensayos de caracterización de los suelos

Las propiedades del suelo y la roca muerta en ambas canteras se determinaron mediante los ensayos descritos en la Tabla 4.1.

### 5.1.1. Ensayo INV - E - 123 13 determinación tamaño de partículas de los suelos

A continuación se presenta la curva granulométrica para cada canteras:

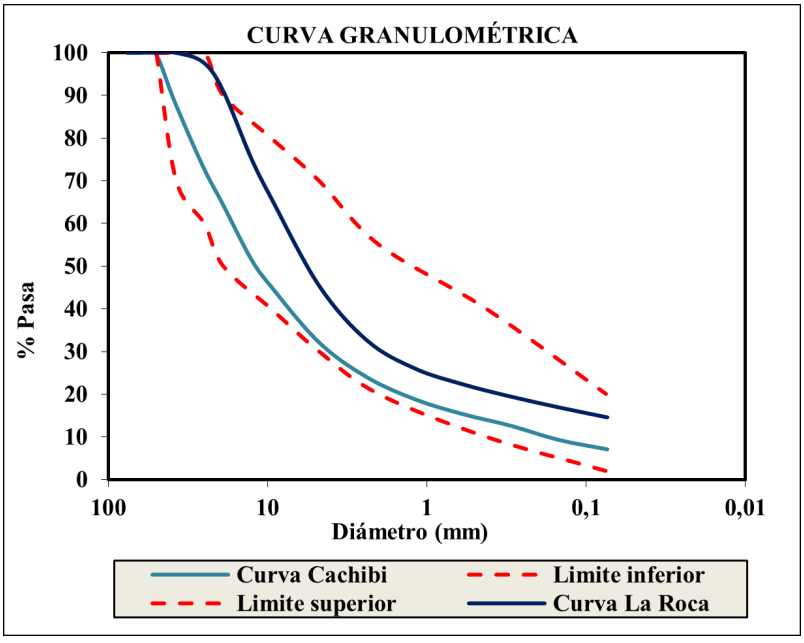



**Figura 5.27:** Granulometría para las canteras Cachibí y la Roca

La gráfica compara las curvas granulométricas de los suelos roca muerta de las canteras Cachibí y La Roca con los límites granulométricos establecidos por la norma INVÍAS 350 para materiales que serán tratados con cemento. En este contexto, el límite inferior representa la fracción más

gruesa permitida para el material, mientras que el límite superior corresponde a la fracción más fina aceptable.

El suelo de Cachibí, con un 7.1 % de finos que pasan por el tamiz 200, se acerca más al límite inferior, lo que indica que es un material predominantemente grueso y arenoso. Por otro lado, el suelo de La Roca, con un 14.5 % de finos, está más cercano al límite superior, reflejando una mayor cantidad de partículas finas, como limos y arcillas. Este contraste sugiere que el material de Cachibí podría tener mejor drenaje y menor demanda de agua al ser tratado con cemento, mientras que el material de La Roca, al ser más fino, podría requerir mayor cantidad de agua debido a su posible retención de agua. Ambas granulometrías cumplen con los requisitos normativos, pero las diferencias en su composición afectan su comportamiento al mezclarse con cemento.

### 5.1.2. Ensayos INV E 125 13, INV E 126 13 determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los límites líquido (LL) y plástico (LP), así como el índice de plasticidad (IP), tanto de la cantera Cachibi como de la roca.

**Tabla 5.5:** Límites e indice de plasticidad de la roca muerta

| | **Cachibí** | **La Roca** |
|---|---|---|
| LL ( %) | 35 | 37 |
| LP ( %) | 21 | 26 |
| IP ( %) | 14 | 11 |

De los resultados obtenidos, se observa que el suelo roca muerta de Cachibí presenta un límite líquido (LL) de 35 %, que es inferior al de La Roca, con un LL de 37 %. Esto indica que el suelo de La Roca es más susceptible a la humedad, lo que significa que necesita un mayor contenido de agua para alcanzar su punto óptimo de compactación en comparación con el suelo de Cachibí. Este comportamiento sugiere que, en condiciones de alta humedad, el material de La Roca podría ser más propenso a cambios volumétricos y posibles problemas de estabilidad. Esta tendencia también es consistente con los valores de límite plástico (LP), donde el suelo de Cachibí tiene un valor de LP de 21 %, mientras que La Roca alcanza un LP de 26 %. Esto implica que el material de Cachibí necesita menos agua para pasar a un estado plástico, lo que podría hacerlo menos susceptible a la humedad y más fácil de compactar en condiciones de obra. Por otro lado, el índice de plasticidad (IP) de Cachibí es de 14 %, siendo un 3 % superior al IP de La Roca, que es de 11 %. Este valor superior en el IP de Cachibí indica que este suelo tiene una mayor capacidad para deformarse sin romperse, mostrando así una mayor plasticidad en comparación con el material de La Roca. Aunque La Roca tiene un IP más bajo, lo que sugiere que es un suelo menos plástico y, por ende, menos susceptible a deformaciones en su estado húmedo, la combinación de un LL alto con un LP elevado indica que requiere una mayor cantidad de agua para alcanzar la cohesión necesaria para su compactación y estabilidad.

Según el artículo 350 de la normativa, que regula el uso de materiales granulares tratados con cemento como capa estructural, se establece que, para vías de tráfico nivel NT1 (vía terciaria clase-1), el límite líquido (LL) debe ser como máximo de 30 % y el índice de plasticidad (IP) no debe superar el 12 %. Sin embargo, los resultados obtenidos para el suelo roca muerta de Cachibí y La Roca exceden estos límites, ya que, aunque el índice de plasticidad de La Roca cumple con el valor permitido, su límite líquido está por encima del límite normativo, al igual que ambos parámetros del suelo de Cachibí. Dado este incumplimiento, el artículo 350 sugiere realizar un tratamiento previo con cal en casos donde se excedan los valores de LL y/o IP, seguido de un tratamiento con cemento, siempre que la fase experimental confirme que el material tratado presenta un comportamiento adecuado según los requerimientos estructurales.[51]

### 5.1.3. Ensayos INV - E - 133 - 13 Equivalente de arena y agregados finos

A continuación, se presentan los valores del ensayo de equivalente de arena (EA) realizados en la roca muerta de las canteras Cachibí y La Roca:

**Tabla 5.6:** Equivalente de arena de la roca muerta de Cachibí y La Roca

| **Lectura de prueba (in)** | | **EA (%)=(Arena/Arcilla)*100** | |
|---|---|---|---|
| **RM La Roca** | | | |
| Arena | Arcilla | EA (%) | Redondeado |
| 2.1 | 8.6 | 24.42 | 25 |
| 2.1 | 9.3 | 22.58 | 23 |
| | **Promedio (EA)** | | **24** |
| **RM Cachibí** | | | |
| Arena | Arcilla | EA (%) | Redondeado |
| 3.6 | 7.3 | 49.32 | 50 |
| 3.5 | 7.2 | 48.61 | 49 |
| | **Promedio (EA)** | | **50** |

El ensayo de equivalente de arena (EA) según la norma INV-E- 133 mide la proporción de partículas finas en relación con el contenido de arena, evaluando así la calidad de los materiales para pavimentos. Para la cantera La Roca, los resultados muestran un promedio de EA de 23.50 % (redondeado a 24 %), superando el límite mínimo de 15 % requerido para materiales de clase 1 con nivel de tránsito NT1. Aunque cumple con los estándares, los valores individuales de 24.42 % y 22.58 % indican cierta variabilidad en la proporción de arena y arcilla, lo que sugiere un material adecuado pero con un mayor contenido de finos en comparación con otros materiales más limpios.

En contraste, la cantera Cachibí presenta un promedio mayor de 49.5 % de EA (redondeado a 50 %), lo que indica un material con una alta proporción de arena y menor contenido de arcilla. Los

resultados consistentes (49.32 % y 48.61 %) destacan la calidad uniforme del material, haciéndolo ideal para aplicaciones que requieren mayor estabilidad y durabilidad en capas granulares. Ambos materiales superan el umbral mínimo del 15 %, pero el material de Cachibí es más adecuado para proyectos con mayores exigencias debido a su mayor limpieza y menor contenido de finos.

### 5.1.4. Ensayos INV - E - 180 13 clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras

La norma INV - E - 180 se basa en el sistema unificado de clasificación (SUCS), que se basa en la distribución del tamaño de partículas y los límites de Atterberg. Para el caso de la roca muerta de Cachibí se tiene un valor de LL=34.75 %, LP=20.76 % y pasa tamiz 200 de 7.1 % lo que indica un material predominantemente granular con un nivel bajo de finos; La Roca tiene un valor de LL=37.3 %, LP=26 % y pasa tamiz 200 de 14.5 % lo que indica una proporción mayor de finos comparado con Cachibí.

Para el clasificación AASHTO se tiene en cuenta que los suelos con menos del 35 % son granulares (grupos A-1, A-2, A-3) donde entran ambos suelos roca muerta. Los suelos A-2 tienen una plasticidad moderada si su IP está entre 10-15 por lo que ambos materiales entran a clasificarse como A-2-6 suelos granulares con finos plásticos. Para la clasificación SUCS ambos materiales pasa 200 tienen un valor menor al 50 % por lo que es un suelo grueso, si mas del 50 % queda retenido en el tamiz No 4 se clasifica el suelo como arena, en caso contrario se clasifica como grava, por ultimo se debe tener en cuenta que un suelo con un IP entre 10 % y 20 % clasifica como un suelo de plasticidad media que son suelos arcillosos o limosos con mayor proporción de partículas finas.

**Tabla 5.7:** Clasificación de la roca muerta por AASHTO y SUCS

| **Parámetro** | **RM Cachibí** | **RM La Roca** |
|---|---|---|
| Porcentaje pasa No. 4 | 32.10 % | 45.40 % |
| Porcentaje pasa No. 200 | 7.10 % | 14.50 % |
| Límite líquido (LL) | 34.75 % | 37.30 % |
| Índice plástico (IP) | 13.99 % | 11.30 % |
| **SUCS** | SC (Arena arcillosa) | SC (Arena arcillosa) |
| **AASHTO** | A-2-6 (Arena) | A-2-6 (Arena) |

## 5.2. Ensayos geomecánicos del suelo

### 5.2.1. Ensayos INV E - 141 - 13 ensayo de compactación del suelo

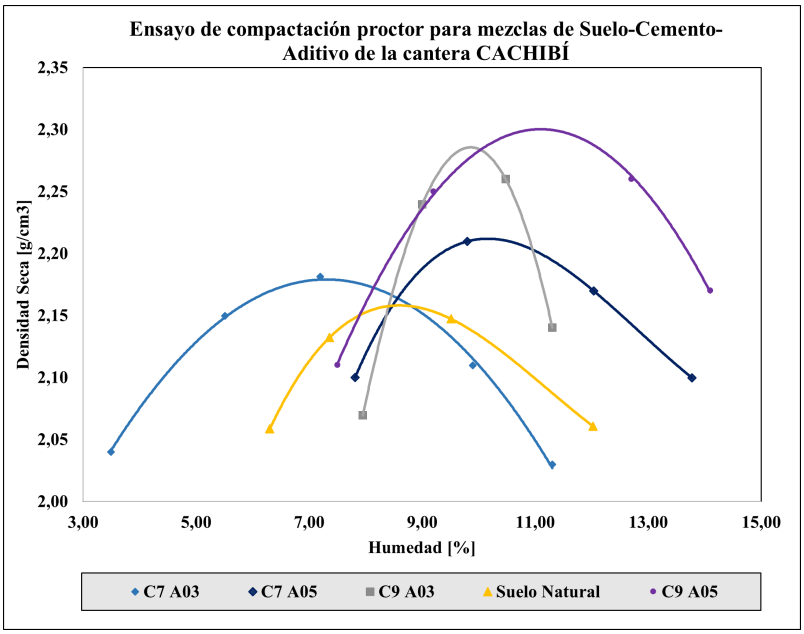



**Figura 5.28:** Ensayo de compactación modificado aplicado a las distintas dosificaciones de suelo-cemento y aditivo para la cantera Cachibí.

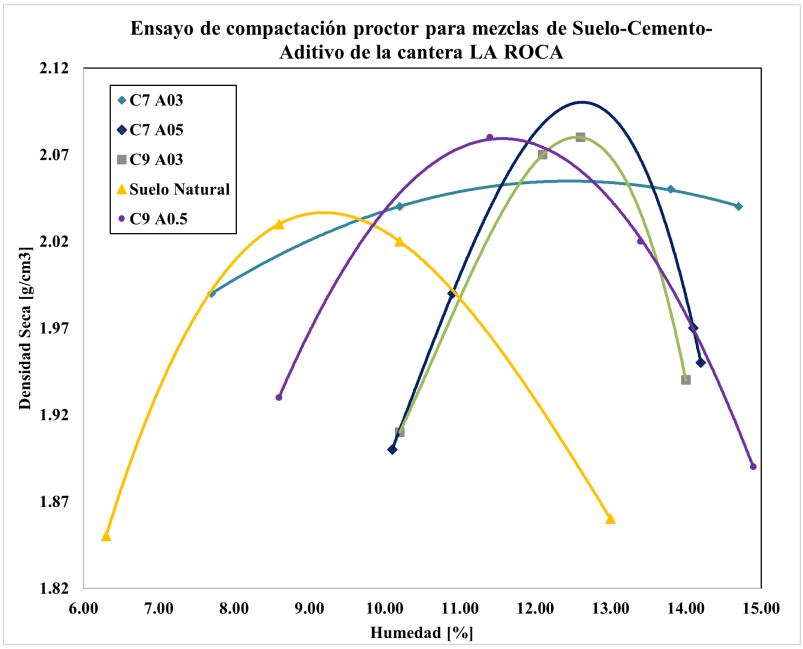



**Figura 5.29:** Ensayo de compactación modificado aplicado a las distintas dosificaciones de suelo-cemento y aditivo para la cantera La Roca.

En el análisis de la gráfica de compactación para mezclas de suelo-cemento con aditivo QI-BINDER para la cantera Cachibí y La Roca, se esperaba que el aumento en el contenido de cemento generara un desplazamiento de la curva hacia menores humedades óptimas y mayores densidades secas máximas, debido a la reducción en la cantidad de agua necesaria para la compactación y el aumento de la rigidez del material. Sin embargo, en los resultados obtenidos no se cumple completamente esta tendencia.

Los resultados del ensayo de compactación en la cantera La Roca evidencian una mejora significativa en las propiedades del suelo al estabilizarlo con mezclas de cemento y aditivo. El suelo natural presentó una densidad seca máxima de aproximadamente $2.04\,\mathrm{g/cm^3}$ y una humedad óptima de 9.2 %, valores inferiores a los obtenidos con las mezclas estabilizadas. Al incorporar un 7 % de cemento y 0.3 % de aditivo, la densidad seca aumentó a $2.05\,\mathrm{g/cm^3}$ y la humedad óptima se elevó al 12.7 %, lo que refleja un incremento en la cohesión y en la capacidad de compactación del material. Con un mayor contenido de aditivo (0.5 %), la densidad aumentó levemente a $2.06\,\mathrm{g/cm^3}$, mientras que la humedad óptima disminuyó ligeramente al 12.5 %, mostrando que el aditivo reduce el agua requerida para una compactación óptima. Al incrementar el cemento al 9 % y mantener el aditivo en 0.3 %, se alcanzó la mayor densidad seca ($2.08\,\mathrm{g/cm^3}$) con una humedad óptima de 12.1 %, lo que confirma el efecto predominante del cemento en mejorar la compactación. Sin embargo, al aumentar el aditivo a 0.5 %, la densidad permaneció constante en $2.08\,\mathrm{g/cm^3}$, pero la humedad óptima disminuyó aún más a 11.7 %, indicando que el aditivo tiene un impacto más marcado en la humedad que en la densidad.

En la cantera Cachibí, el suelo se caracteriza por una humedad óptima inicial del 8.6 % y una densidad seca máxima de $2.16\,\mathrm{g/cm^3}$, lo que facilita la compactación en comparación con La Roca. Con una mezcla de 7 % de cemento y 0.3 % de aditivo, la humedad óptima disminuye y la densidad mejora ligeramente, permitiendo una compactación más eficiente con menos agua. Al incrementar el aditivo al 0.5 %, se observa una mejora en la retención de agua junto con un aumento moderado en la densidad, mostrando la efectividad del aditivo. Cuando se eleva el contenido de cemento al 9 %, combinado con 0.3 % de aditivo, la densidad alcanza niveles significativamente superiores, confirmando el impacto positivo del cemento en la compactación. Finalmente, al combinar 9 % de cemento con 0.5 % de aditivo, se obtienen los valores más altos de densidad ( $2.30\,\mathrm{g/cm^3}$), aunque con una mayor humedad óptima, destacando cómo ambos componentes actúan en conjunto para optimizar las propiedades del suelo tratado.

Se identifican diferencias notables en la interacción entre los estabilizantes y las características intrínsecas de cada suelo. En la cantera Cachibí, el aumento en el contenido de aditivo (0.5 %) genera un desplazamiento de la curva hacia humedades óptimas más altas, lo que puede explicarse por una mayor retención de agua. Este porcentaje relativamente alto de aditivo podría estar formando más enlaces con las partículas del suelo, creando una estructura que retiene la humedad y dificulta su expulsión durante la compactación. En contraste, en la cantera La Roca, esta misma dosificación no muestra un aumento tan pronunciado en la humedad óptima, lo que sugiere diferencias en la composición mineralógica, granulometría o plasticidad inicial de los suelos, afectando la capacidad del aditivo para interactuar con las partículas del suelo y, por lo tanto, la retención de agua. Así, La Roca requiere mayores valores en todas las combinaciones debido a su mayor límite plástico y capacidad de retención de agua, mientras que Cachibí muestra una menor sensibilidad a la incorporación de agua, con valores consistentemente inferiores, lo que facilita procesos de compactación más eficientes.

En ambas canteras se observa una tendencia clara de incremento en la densidad seca máxima conforme aumenta el contenido de cemento y aditivo, lo que refleja el éxito de la estabilización en mejorar las propiedades mecánicas del suelo. Este comportamiento se debe a la sinergia entre el cemento y el aditivo: el cemento forma una matriz endurecida que aporta rigidez y resistencia, mientras que el aditivo mejora la cohesión y facilita la disposición eficiente de las partículas, optimizando el proceso de compactación. Sin embargo, se destaca que los valores de densidad seca máxima obtenidos en la cantera Cachibi son superiores a los de la cantera La Roca. Esto podría atribuirse a diferencias en las características iniciales de los suelos de ambas canteras, como la granulometría o la plasticidad, que influyen en la interacción con los estabilizantes. En ambos casos, el uso combinado de cemento y aditivo no solo incrementa la densidad, sino que también resulta en un suelo estabilizado más resistente, con mayor capacidad de soporte y menor deformación bajo cargas

Otra consideración es la posible reacción del aditivo con el cemento en diferentes dosificaciones. Si el QI-BINDER interactúa de forma química o física con el cemento, puede modificar la velocidad y la forma en que el agua es absorbida o expulsada durante la compactación. Por ejemplo, el aditivo podría estar retardando o acelerando la hidratación del cemento, alterando el proceso de endurecimiento y la estructura de la mezcla compactada. Esto explicaría por qué las humedades óptimas y densidades no siguen una tendencia uniforme, ya que el equilibrio entre el cemento y el aditivo afecta las propiedades de cada combinación de manera única.

### 5.2.2. Ensayos INV - E -148 -14 CBR de los suelos compactados en el laboratorio y sobre la muestra inalterada

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el ensayo CBR para el suelo natural roca muerta de las canteras Cachibí y La Roca.

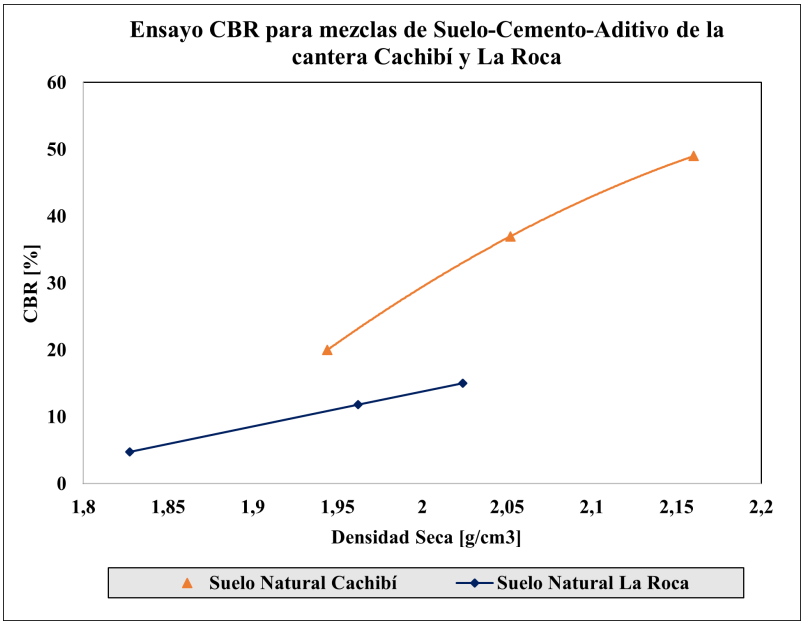



**Figura 5.30:** CBR del suelo natural la cantera cachibí y La Roca.

El ensayo CBR para las canteras Cachibí y La Roca muestra diferencias significativas en el comportamiento mecánico de sus respectivos suelos naturales. Los resultados evidencian que el suelo de la cantera Cachibí presenta mayores valores de CBR a lo largo de toda la curva en comparación con el suelo de La Roca. Esto sugiere que el suelo de Cachibí tiene una capacidad de soporte superior, probablemente debido a sus características intrínsecas, como mayor densidad inicial, granulometría más favorable o menor plasticidad. Además, el incremento del CBR con la densidad seca es más pronunciado en el caso de Cachibí, alcanzando valores superiores al 50 % a densidades cercanas a 2.15 $g/cm^3$, lo que destaca una mejor respuesta frente a compactación. Por otro lado, el suelo de La Roca muestra un comportamiento más limitado, con valores de CBR que no superan el 15 %, incluso en densidades más altas, lo que indica una menor capacidad portante bajo cargas. Este análisis pone de manifiesto que el suelo de Cachibí es intrínsecamente más adecuado para aplicaciones que requieren alta resistencia, mientras que el suelo de La Roca necesitaría mayor estabilización o tratamiento para alcanzar niveles similares de desempeño.

El ensayo CBR no es comúnmente aplicado en mezclas de suelo-cemento; sin embargo, en esta investigación se incluyó con el objetivo de cuantificar el incremento en la capacidad de soporte del material ante diferentes dosificaciones de cemento y aditivo, lo que permite evaluar de manera más precisa el impacto de la estabilización en la resistencia de suelo estudiado.

El Artículo 350 de Invías exige pruebas de resistencia a la compresión para suelos estabilizados químicamente. Estas pruebas evalúan el material en masa, es decir, analizan sus propiedades como un bloque sólido y homogéneo sin considerar su interacción con cargas externas en condiciones reales de servicio.

Por ejemplo, la resistencia a la compresión mide la capacidad de un cilindro o cubo de suelo-cemento para soportar carga antes de fallar, sin simular directamente las cargas vehiculares.

En contraste, el CBR evalúa la resistencia del material bajo carga confinada, es decir, simula la presión ejercida por las ruedas de los vehículos sobre el suelo, permitiendo analizar su capacidad de soporte en condiciones reales de servicio. Por ello, el CBR complementa las pruebas mencionadas, aportando información clave sobre el comportamiento del suelo estabilizado en escenarios prácticos y reforzando su aplicabilidad en el diseño de pavimentos.

Según el Artículo 351 del INVIAS, uno de los requisitos para suelos utilizados como base estabilizada con cemento es que el CBR del suelo natural sea superior al 60 % (tabla 351-2). En este caso, ninguno de los materiales cumple con este requisito en su estado natural, ya que el material de Cachibí alcanza un 46 %, y el de La Roca, un 15 %, además, los índices de plasticidad (IP) de ambos materiales, 13.99 % para Cachibí y 11.3 % para La Roca, evidencian un comportamiento plástico, lo que también los excluye como candidatos viables para ser usados como base estabilizada con cemento según la normativa.

En los ensayos de CBR realizados para las diferentes mezclas de suelo-cemento con aditivos

para la cantera Cachibí, los resultados muestran una clara mejora en la capacidad de soporte al aumentar la dosificación de cemento y aditivo. A continuación, se presentan los valores de CBR de suelo-cemento obtenidos para el suelo natural roca muerta y las mezclas tratadas de la cantera Cachibi:

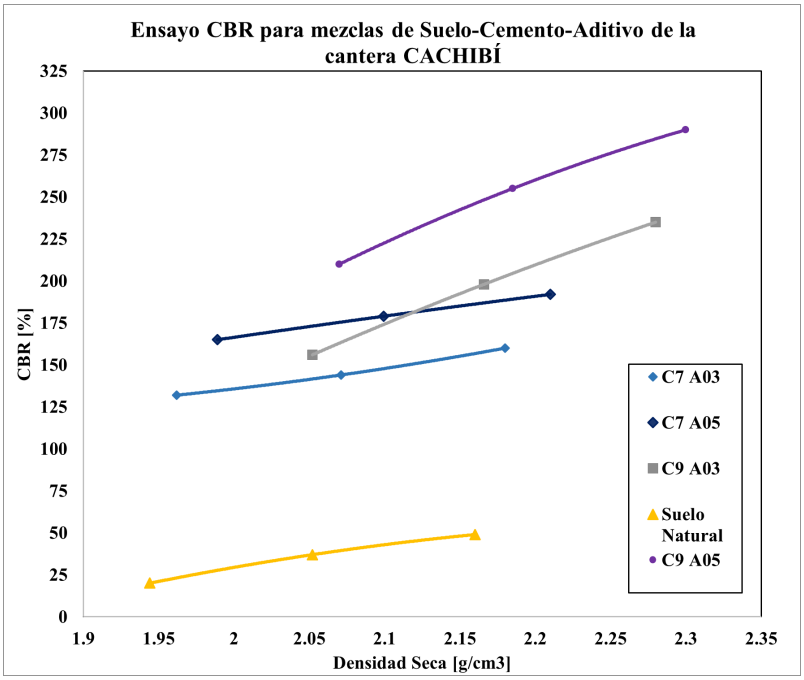



**Figura 5.31:** Ensayo CBR para los distintos tipos de dosificación de suelo-cemento y aditivo

**Tabla 5.8:** valor del CBR para distintas energias de compactación

| Mezcla | CBR al 100 % comp | CBR al 95 % comp | CBR al 90 % comp |
|---|---|---|---|
| Suelo natural | 46 | 33 | 20 |
| C=7 % A=0.3 % | 156 | 144 | 132 |
| C=7 % A=0.5 % | 192 | 177 | 163 |
| C=9 % A=0.3 % | 235 | 200 | 156 |
| C=9 % A=0.5 % | 285 | 250 | 225 |

Los ensayos de CBR realizados para las diferentes mezclas de suelo-cemento con aditivo muestran una mejora significativa en la capacidad de soporte al aumentar la dosificación de cemento y aditivos. Inicialmente, el suelo natural sin ninguna estabilización presentó los valores de CBR más bajos, con un valor máximo de 46 % al 100 % de la densidad seca máxima de compactación. Al reducir la densidad al 95 % y al 90 %, los valores de CBR disminuyeron a 33 % y 20 % respectivamente, lo que evidencia la limitada capacidad de soporte de un suelo sin tratamiento.

Al incorporar cemento y aditivos, las mezclas mejoraron notablemente su capacidad de carga. Las mezclas C=7 % A=0.3 % y C=7 % A=0.5 %, alcanzaron valores de CBR significativamente

más altos en comparación con el suelo natural. En particular, la mezcla C=7 % A=0.3 % registró un CBR de 156 % al 100 % de densidad, mientras que al 95 % y 90 % de compactación sus valores fueron de 144 % y 132 %. La mezcla C=7 % A=0.5 %, al tener una mayor cantidad de aditivo, mostró aún mejores resultados con un CBR de 192 % al 100 % de compactación, disminuyendo a 177 % y 163 % al 95 % y 90 % de densidad respectivamente. Esta tendencia indica que un incremento en el aditivo contribuye a un suelo más cohesivo y resistente, mejorando su capacidad de soportar esfuerzos mecánicos.

Por otro lado, las mezclas con una mayor proporción de cemento, como C=9 % A=0.3 % y C=9 % A=0.5 %, demostraron un desempeño aún superior. La mezcla C=9 % A=0.3 % alcanzó un CBR de 235 % al 100 % de compactación, reduciéndose a 200 % al 95 % de densidad, y manteniendo un alto valor de 156 % al 90 %. La mezcla C=9 % A=0.5 %, registró los valores de CBR más altos con 285 % al 100 % de densidad. A medida que la densidad disminuyó al 95 % y 90 %, los valores de CBR fueron de 250 % y 225 % respectivamente. Este comportamiento refleja una notable mejora en la rigidez y capacidad de carga del suelo gracias a la mayor dosificación de cemento, que actúa como un agente estabilizante más efectivo.

La tendencia general observada en los resultados demuestra que a medida que aumenta la densidad seca, también lo hace la capacidad de soporte del suelo tratado. Una mayor densidad seca significa una estructura más compacta, con menores vacíos entre partículas, lo cual incrementa la cohesión interna y la resistencia a la penetración. Esto es particularmente importante en las mezclas tratadas con cemento y aditivos, donde la compactación optimiza la distribución de los estabilizantes, formando una matriz más rígida y duradera. Por tanto, los altos valores de CBR observados en las mezclas con mayores dosificaciones de cemento y aditivo confirman la eficacia de estos tratamientos para mejorar la resistencia del suelo.

### 5.2.3. Ensayos INV - E -612 -13 humedecimiento de mezclas compactadas de suelo- cemento

Se realizaron las pruebas de humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo cemento con las diferentes dosificaciones de cemento y aditivo como se aprecia en el siguiente gráfico:

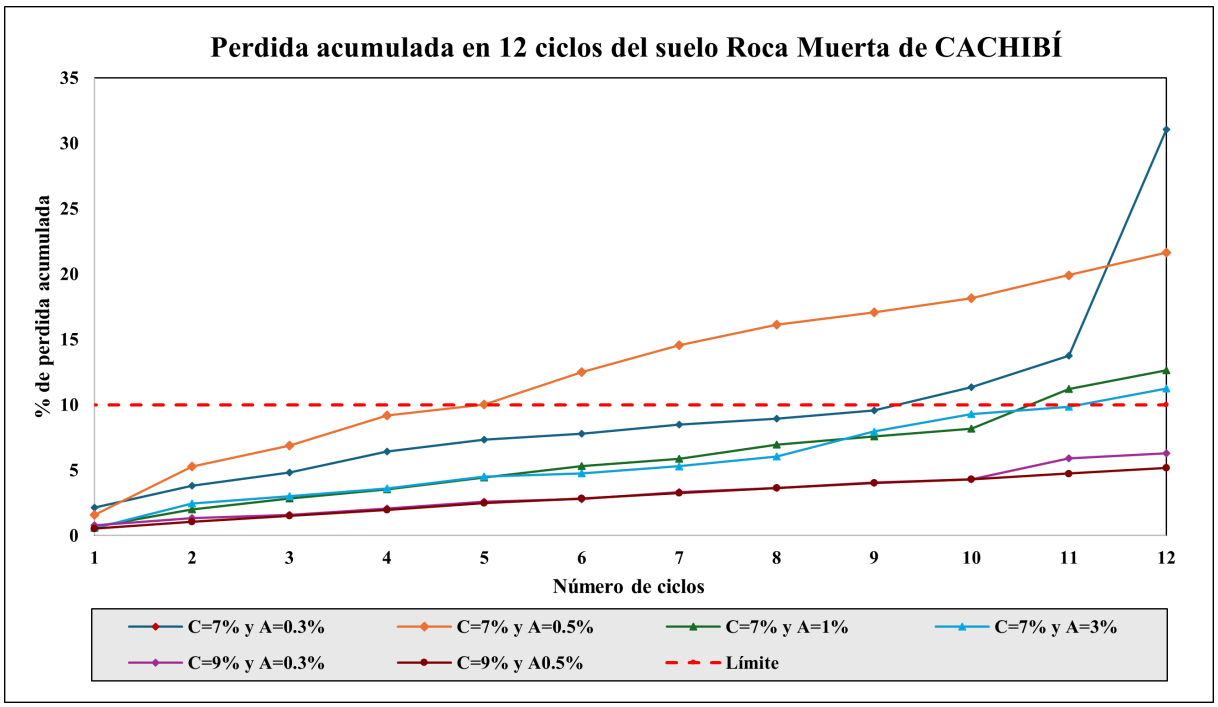



**Figura 5.32:** Perdida acumulada durante los 12 ciclos de durabilidad cantera Cachibi

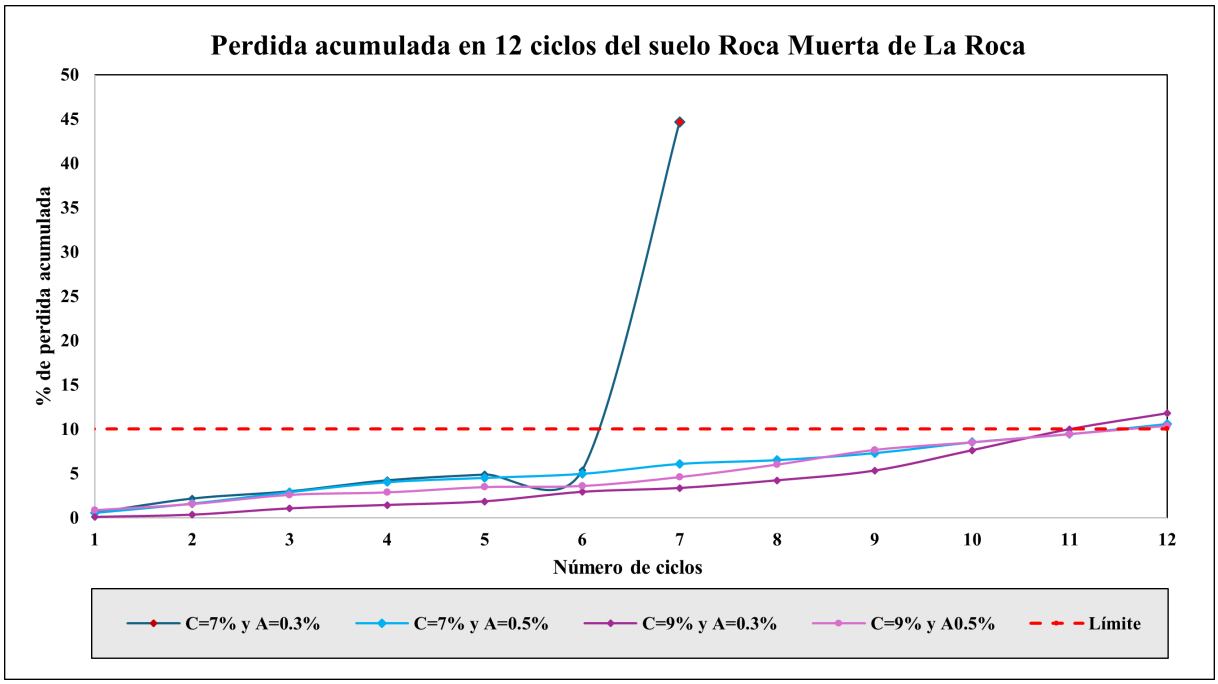



**Figura 5.33:** Perdida acumulada durante los 12 ciclos de durabilidad cantera La Roca

**Tabla 5.9:** Porcentaje de mejora del aditivo

| **Dosifiación (cemento 7 %)** | **Perdida acumulada al ciclo 12** | **Mejora en comparación con A=0.3 %** | **Mejora en comparación con la dosifiación anterior** |
|---|---|---|---|
| C=7 % y A=0.3 % | 31.07 % | - | - |
| C=7 % y A=0.5 % | 21.64 % | 30.30 % | 30.30 % |
| C=7 % y A=1 % | 12.66 % | 59.20 % | 41.50 % |
| C=7 % y A=3 % | 11.24 % | 63.80 % | 11.20 % |

La Roca es una cantera más reciente con 25 años de antigüedad comparada con Cachibí que tiene 45 años de antiguedad, el material de la roca posiblemente es más superficiel y por consiguiente más meteorizado comparado a la montaña de Cachibí que está más cercana a la roca madre.

El aditivo QI Binder demostró un efecto progresivo en la reducción de la pérdida acumulada, especialmente en los primeros incrementos de dosificación (del 0.3 % al 1 %). Por ejemplo, en la combinación de C = 7 % y A = 0.3 %, la pérdida acumulada es alta, pero al aumentar el aditivo al 3 %, la pérdida acumulada se reduce a un 11.24 %, lo que representa una mejora del 63.8 % respecto a la combinación con A = 0.3 % y una mejora adicional del 11.2 % respecto a la combinación con A = 1 %. Estos resultados indican que el aditivo QI Binder tiene un impacto positivo en la durabilidad de la mezcla, siendo especialmente eficaz en mayores concentraciones cuando el contenido de cemento es limitado. Sin embargo, aunque mejora la resistencia, aún no es suficiente para cumplir con el límite del 10 %, lo que reafirma la importancia del contenido de cemento para asegurar la estabilidad de la mezcla.

Para las mezclas con un contenido de cemento del 9 %, ambas dosificaciones de aditivo (0.3 % y 0.5 %) cumplieron con el límite de pérdida acumulada del 10 % a lo largo de los 12 ciclos. Esto indica que un contenido bajo de aditivo es suficiente para asegurar la durabilidad cuando se utiliza un 9 % de cemento. Sin embargo, al incrementar el aditivo de 0.3 % a 0.5 %, se observó una reducción adicional en la pérdida acumulada, logrando una mejora del 17.5 % respecto a la dosificación con A = 0.3 %. Este comportamiento sugiere que, en el caso de un contenido de cemento mayor, una baja cantidad de aditivo resulta eficaz para cumplir con el requisito de durabilidad, y un pequeño incremento en el aditivo puede proporcionar beneficios adicionales en la resistencia sin necesidad de una dosificación excesiva.

En general, los resultados indican que el aditivo QI Binder tiene un efecto positivo en la reducción del porcentaje de pérdida acumulada, especialmente en los primeros incrementos de concentración. Para la combinación de cemento al 7 %, es necesario un aumento significativo del aditivo para mejorar la durabilidad, pero aún así no se logra cumplir totalmente con el límite normativo. Por otro lado, con cemento al 9 %, una pequeña cantidad de aditivo (0.3 %) es suficiente para cumplir el requisito de durabilidad, y un aumento moderado a 0.5 % mejora aún más la resistencia de la mezcla. Esto sugiere que la cantidad de cemento es un factor determinante en la estabilidad del suelo tratado y que el aditivo es eficaz en dosis bajas cuando se usa una mayor proporción de cemento.

En el caso de las probetas en las que se analiza el porcentaje de absorción y la variación en el porcentaje de volumen, es necesario determinar la corrección del suelo seco en función del agua retenida por el cemento, siguiendo lo indicado en el artículo 350, que sugiere utilizar dicha corrección según la clasificación del material del suelo.

**Tabla 5.10:** Valores de % de absorción de la norma articulo 350

| Corrección del suelo seco por agua retenida por el cemento | |
|---|---|
| Clasificación del suelo | Valor ( %) |
| A-1; A-3 | 1.5 |
| A-2 | 2.5 |
| A-4; A-5 | 3 |
| A-6; A-7 | 3.5 |

El material debe alcanzar un equilibrio en su capacidad de absorción después de los primeros ciclos, lo cual es favorable para su durabilidad, ya que una absorción constante indica que el material no está experimentando deterioro a nivel de poros. La siguiente gráfica muestra el porcentaje de absorción durante los 12 ciclos:

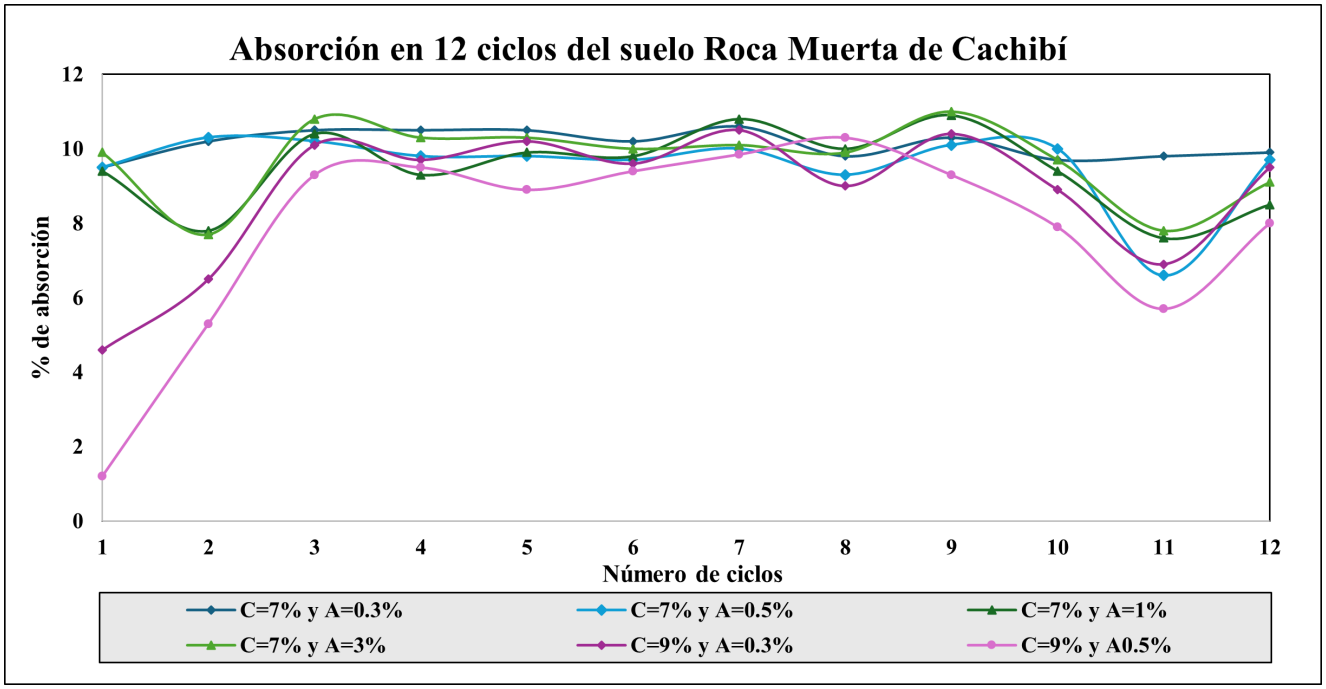



**Figura 5.34:** Absorción durante los 12 ciclos de durabilidad cantera Cachibí

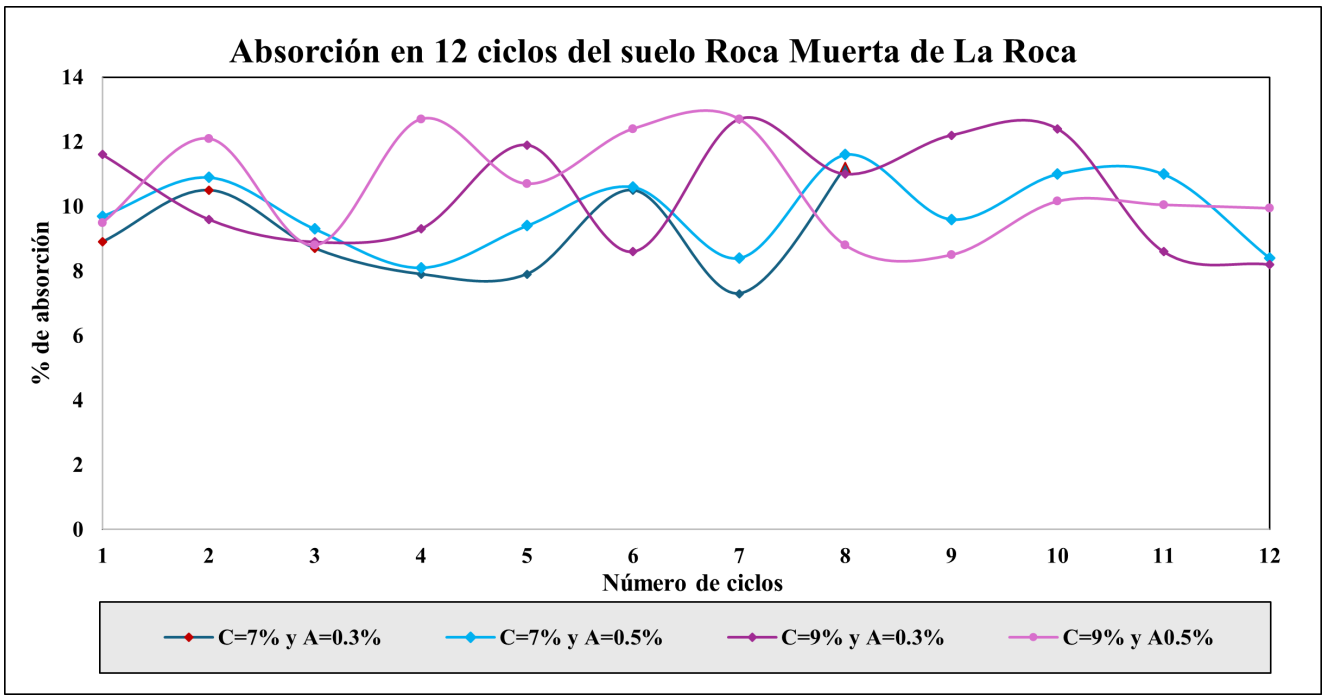



**Figura 5.35:** Absorción durante los 12 ciclos de durabilidad cantera La Roca

La gráfica presentada analiza la absorción de agua en 12 ciclos de humedecimiento y secado para diferentes dosificaciones de cemento y aditivo en el suelo de las cantera Cachibí y La Roca. Se observa que las dosificaciones con menor contenido de cemento y aditivo, como 7 % de cemento y 0.3 % de aditivo, tienen valores iniciales de absorción más elevados y una mayor variabilidad a lo largo de los ciclos. Esto evidencia una menor efectividad en la estabilización del suelo frente al agua, lo que puede aumentar la susceptibilidad a la degradación por humedad. Por otro lado, al incrementar el contenido de aditivo a 3 % en combinación con 7 % de cemento, se logra cierta estabilidad en los valores de absorción, aunque sin alcanzar niveles óptimos, lo que sugiere que el aditivo tiene un efecto positivo pero limitado sin el soporte de un mayor contenido de cemento. Ademas, se aprecia que la dosificación de 9 % de cemento y 0.5 % de aditivo tiene mayor efectividad en términos de resistencia a la absorción de agua; esta dosificación registró el valor más bajo de la absorción inicial de 1.2 % en el ciclo 1, manteniendo valores bajos y estables incluso en los últimos ciclos lo que implica menor susceptibilidad a la degradación por humedad en el tiempo. A continuación, se muestran los datos del porcentaje de cambio de volumen para las probetas secas y húmedas en cada ciclo de durabilidad:

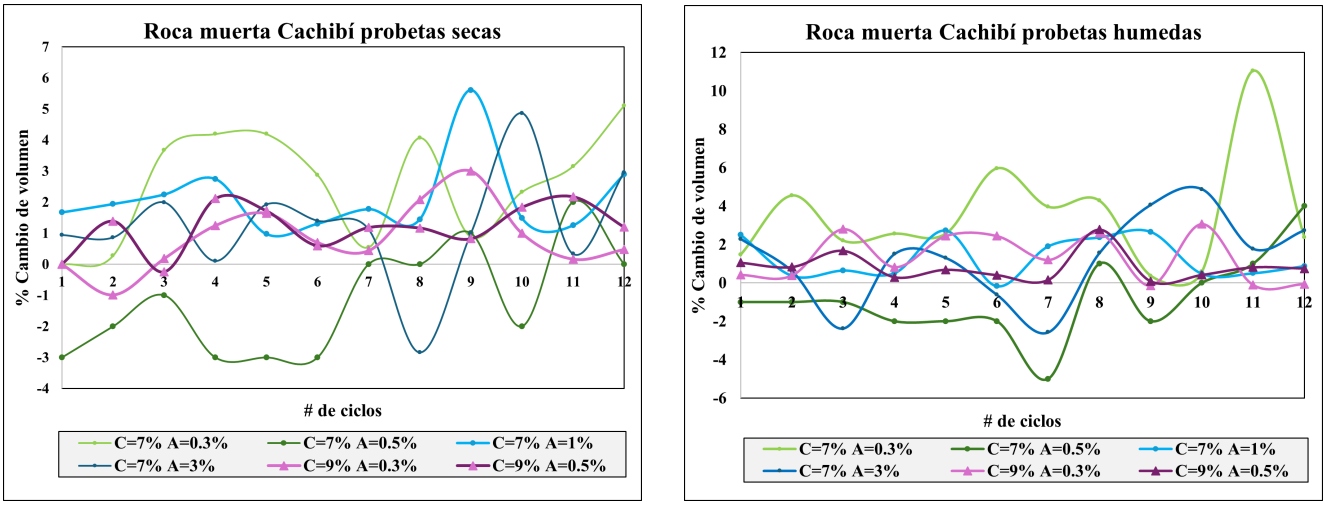



**Figura 5.36:** Porcentaje del cambio de volumen por cada ciclo en estado seco y húmedo de la RM de Cachibí

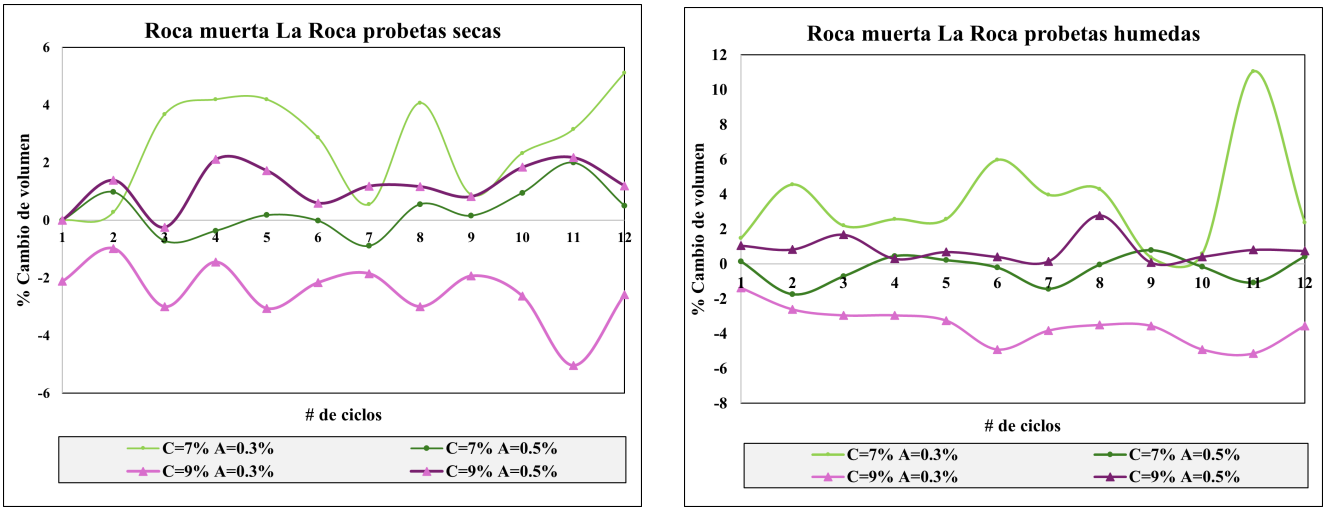



**Figura 5.37:** Porcentaje del cambio de volumen por cada ciclo en estado seco y húmedo de la RM de La Roca

La gráfica presenta los porcentajes de cambio de volumen de las probetas secas y húmedas durante los 12 ciclos de durabilidad para diferentes dosificaciones de cemento y aditivo. En el caso de las probetas secas, se observa que la combinación de 9 % de cemento y 0.5 % de aditivo (C=9 %, A=0.5 %) es la más estable, con variaciones de volumen que oscilan entre 0 % y 2 %. En contraste, otras dosificaciones, como 7 % de cemento y 0.3 % de aditivo (C=7 %, A=0.3 %), muestran mayores fluctuaciones, alcanzando un máximo de cambio del 5 % en el ciclo 12. Este comportamiento evidencia que un mayor contenido de cemento combinado con una proporción adecuada de aditivo contribuye significativamente a la estabilidad volumétrica en estado seco. En condiciones húmedas, los cambios de volumen son generalmente positivos y de mayor magnitud en comparación con las probetas secas, alcanzando un máximo del 11 % en la dosificación C=7 %, A=0.3 %. Sin embargo, al igual que en las probetas secas, la dosificación C=9 %, A=0.5 % presenta la menor variación, con un rango de 0 % a 3 %, lo que la convierte en la más estable frente a la

humedad. Esto refleja que esta combinación no solo minimiza las variaciones volumétricas, sino que también incrementa la resistencia del material frente a los ciclos de humedecimiento y secado.

En este ensayo, la combinación C=9 % y A=0.5 % se destaca como la más favorable en términos de durabilidad. Esta configuración minimiza los cambios de volumen en ambos estados, muestra menor variabilidad en la absorción y presenta el menor porcentaje de pérdida de material, características deseables para materiales utilizados en pavimentos expuestos a variaciones de humedad causadas por factores ambientales. Además, esta dosificación es la menos propensa a sufrir daños por cargas repetidas.

### 5.2.4. Ensayos INV - E -614 -13 Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo cemento

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión de la roca muerta proveniente de las canteras La Roca y Cachibí.

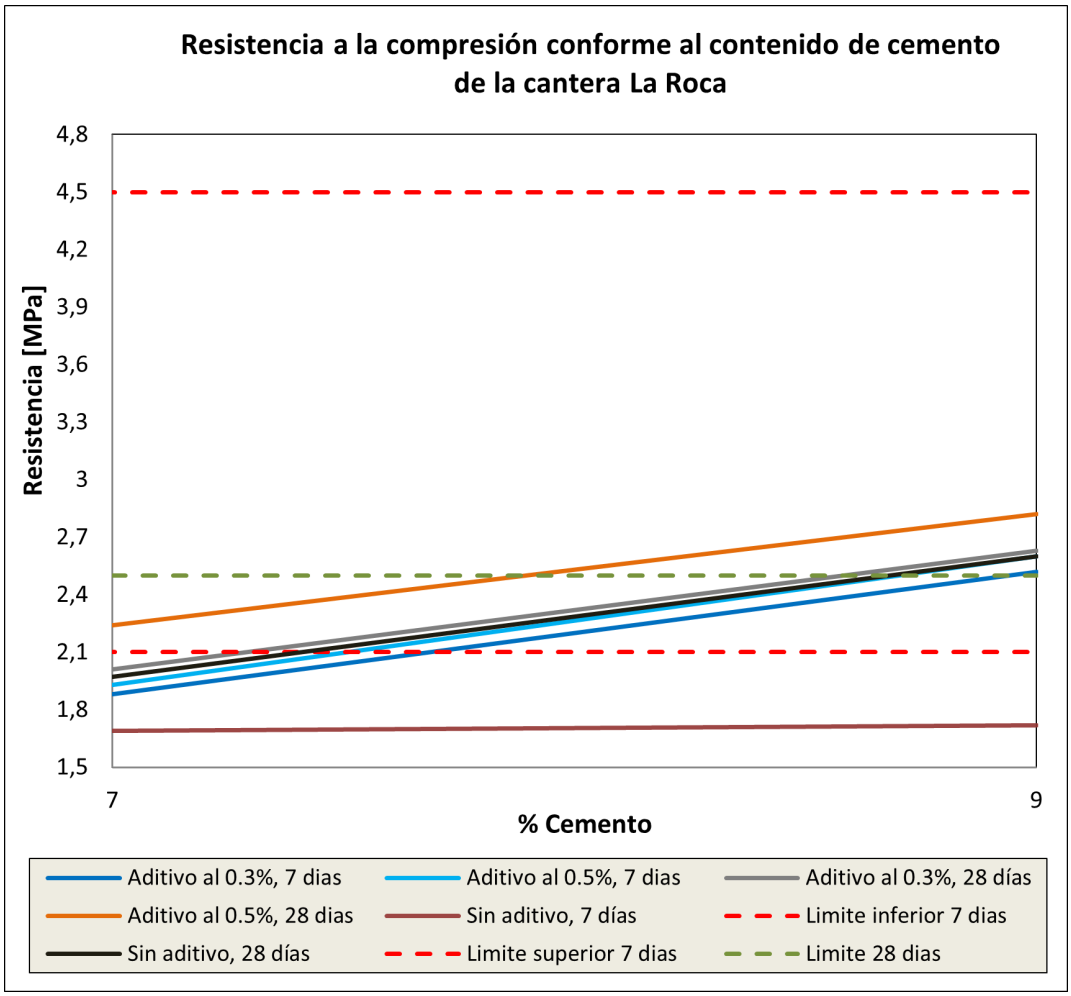



**Figura 5.38:** Resistencia a la compresión de suelo de la cantera La Roca

**Tabla 5.11:** Resultados resistencia a la compresión para todas las dosificaciones de la cantera La Roca

| Resultados resistencia a la compresión para todas las dosificaciones de la cantera La Roca | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Probeta** | **Sin aditivo** | | **Sin aditivo** | | **Aditivo 0.3 %** | | **Aditivo 0.5 %** | | **Aditivo 0.3 %** | | **Aditivo 0.5 %** | |
| **Porcentaje de cemento** | 9 % | | 7 % | | 7 % | | 7 % | | 9 % | | 9 % | |
| **Edad [Días]** | 7 | 28 | 7 | 28 | 7 | 28 | 7 | 28 | 7 | 28 | 7 | 28 |
| **Rotura lectura [Kg]** | 1443.8 | 1599.4 | 1448.1 | 1513 | 1564.8 | 1716.1 | 1659.9 | 1876.1 | 2096.5 | 2247.8 | 2213.2 | 2360.2 |
| **Resistencia [Mpa]** | **1.72** | **1.92** | **1.69** | **1.77** | **1.88** | **2.01** | **1.93** | **2.24** | **2.52** | **2.63** | **2.60** | **2.82** |

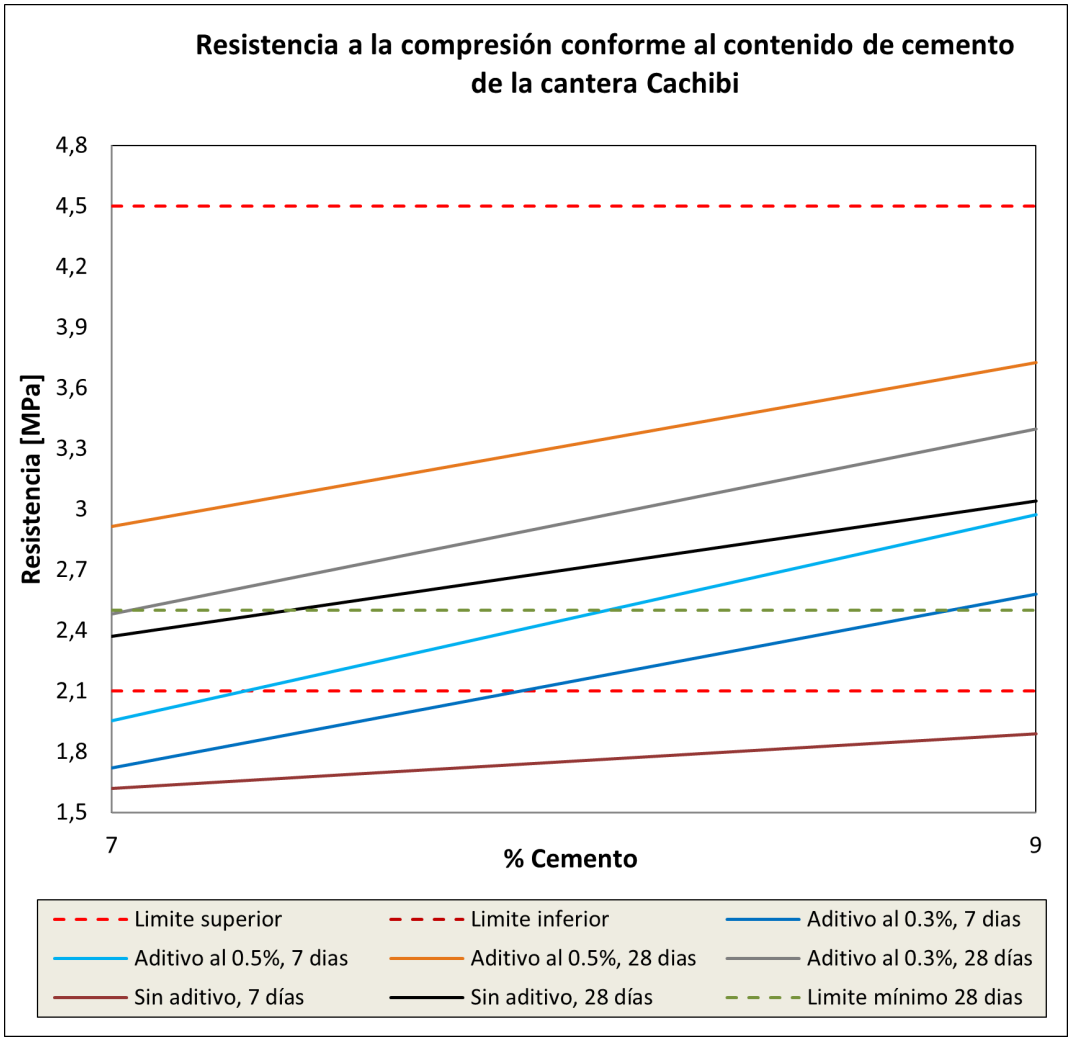



**Figura 5.39:** Resistencia a la compresión de suelo de la cantera Cachibí

**Tabla 5.12:** Resultados resistencia a la compresión para todas las dosificaciones de la cantera Cachibi

| Resultados resistencia a la compresión para todas las dosificaciones de la cantera Cachibi | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Probeta** | **Sin aditivo** | | **Sin aditivo** | | **Aditivo 0.3 %** | | **Aditivo 0.5 %** | | **Aditivo 0.3 %** | | **Aditivo 0.5 %** | |
| **Porcentaje de cemento** | 9 % | | 7 % | | 7 % | | 7 % | | 9 % | | 9 % | |
| **Edad [Días]** | 7 | 28 | 7 | 28 | 7 | 28 | 7 | 28 | 7 | 28 | 7 | 28 |
| **Rotura lectura [Kg]** | 1383.3 | 1988.5 | 1586.4 | 2593.6 | 1469.7 | 2074.9 | 1638.3 | 2485.6 | 2204.6 | 2831.4 | 2485.6 | 3168.6 |
| **Resistencia [Mpa]** | **1.62** | **2.37** | **1.89** | **3.04** | **1.72** | **2.48** | **1.95** | **2.91** | **2.58** | **3.40** | **2.97** | **3.73** |

En la cantera La Roca, las mezclas sin aditivo presentan un desempeño limitado frente a los límites establecidos según el artículo 350 de la norma INVIAS. Con 7 % de cemento sin aditivo, no se cumple el límite a 7 días ni el límite a 28 días, lo que indica que esta combinación no es adecuada para las condiciones evaluadas. En contraste, con 9 % de cemento sin aditivo, aunque no se alcanza el límite a 7 días, sí se cumple el límite a 28 días, evidenciando una mejora relativa a largo plazo con un mayor contenido de cemento. Al incorporar aditivos, las mezclas muestran un mejor desempeño. Con 7 % de cemento y aditivos al 0.3 % o al 0.5 %, no se logran cumplir los límites a 7 ni a 28 días, lo que sugiere que esta proporción de cemento sigue siendo insuficiente incluso con el refuerzo del aditivo. Sin embargo, las combinaciones con 9 % de cemento y cualquiera de las dos dosificaciones del aditivo (0.3 % o 0.5 %) cumplen tanto el límite superior a 7 días como el límite mínimo a 28 días, demostrando que esta proporción de cemento junto con aditivos es necesaria para garantizar un desempeño adecuado.

En la cantera Cachibí, las mezclas sin aditivo presentan un comportamiento similar al observado en La Roca. Con 7 % de cemento sin aditivo, no se cumple ninguno de los límites establecidos, mientras que con 9 % de cemento sin aditivo tampoco se alcanza el límite superior a 7 días, aunque sí se cumple el límite mínimo a 28 días, lo que confirma que un mayor contenido de cemento mejora el desempeño a largo plazo, pero sigue siendo insuficiente a corto plazo en ausencia de aditivos. Con el uso de aditivos, las mezclas confirman la misma tendencia. Las combinaciones con 7 % de cemento y aditivos al 0.3 % o al 0.5 % no cumplen los límites a 7 ni a 28 días, mientras que con 9 % de cemento y aditivos al 0.3 % o al 0.5 % se logra cumplir tanto el límite superior a 7 días como el límite mínimo a 28 días.

Al comparar los resultados, se evidencia que los materiales de la cantera Cachibí tienen una mejor respuesta a la estabilización, alcanzando mayores valores de resistencia en general. Esto es particularmente notable en las mezclas con 9 % de cemento y aditivos, donde los resultados de Cachibí son consistentemente más altos que los de La Roca. Esta diferencia sugiere que el material base de Cachibí tiene una mayor capacidad para desarrollar resistencia bajo las condiciones de estabilización empleadas.

### 5.2.5. Espesores óptimos de la capa de rodadura estabilizada con el aditivo.

Según las figuras 4.26 y 4.27, se determinaron los espesores recomendados para la capa estabilizada con suelo roca muerta proveniente de la cantera Cachibí, cemento y el aditivo QI Binder. Para este análisis, se utilizó un factor de fatiga de 5 y un módulo de reacción de 114.3 PCI, considerando que únicamente las dosificaciones con cemento al 9 % y aditivo al 0.3 % y 0.5 % cumplieron satisfactoriamente las pruebas de humedecimiento y secado, así como las pruebas de resistencia a la compresión, según los límites establecidos en el artículo 350 de la norma INVIAS.

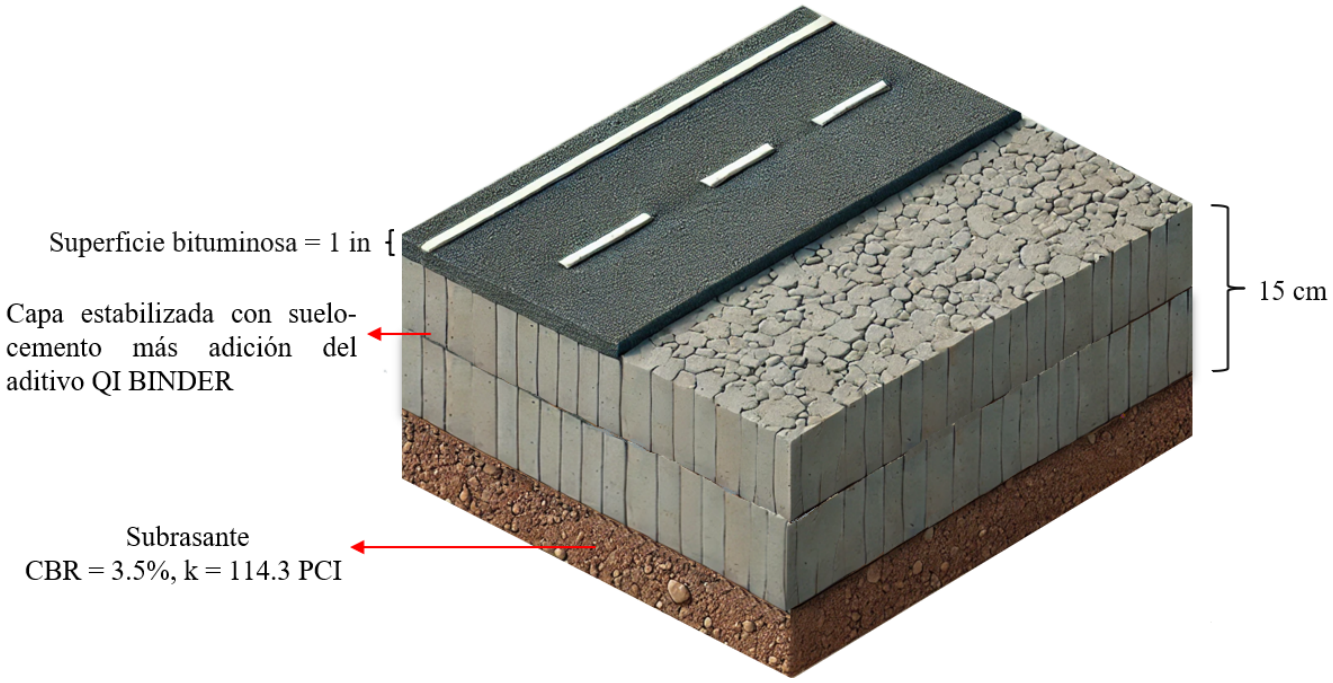



**Figura 5.40:** Diseño de espesores para suelo tipo roca muerta de la cantera cachibí para dosificaciones con 9 % de cemento y aditivo QI-BINDER al 0.3 % y 0.5 %

La PCA (Portland Cement Association) señala que una capa bituminosa de 1 pulgada cumple la función de protección y durabilidad, aportando impermeabilización y resistencia al desgaste superficial, sin embargo esta capa que es menor a 3 pulgadas no contribuye significativamente a la capacidad estructural del pavimento. Para espesores de capa bituminosa superiores a 3 pulgadas es lógico asumir que al tratarse de superficies más gruesas deben contribuir en algo con la capacidad estructural y se debe hacer una estimación estructural que proporciona los apéndices de la PCA. En consecuencia, el cálculo del espesor estructural debe realizarse considerando únicamente el suelo-cemento. En este caso, el espesor requerido, determinado mediante los ábacos del método de la PCA, fue de 5.5 pulgadas, el cual se redondeó a 6 pulgadas (15 cm), siguiendo la recomendación de la PCA de redondear a 1/2 pulgada superior para garantizar un rendimiento adecuado.

### 5.2.6. Análisis de costos y comparación económica del pavimento unicapa suelo-cemento

El diseño de pavimento suelo-cemento unicapa de 15 cm propuesto se basa en el método de la PCA, reconocido internacionalmente por su aplicación en pavimentos eficientes y económicos desde 1935. De acuerdo con la PCA más de 140,000 km de pavimentos suelo-cemento han sido construidos en Norteamérica, demostrando su buen desempeño en caminos terciarios, calles residenciales y pistas de aterrizaje de tráfico ligero. Este pavimento ha probado ser satisfactorio para estas condiciones y permite la optimización del diseño estructural a partir de espesores ajustados a las cargas de tráfico. A continuación se presenta los costos del pavimento teniendo en cuenta el estudio de transitabilidad de una vía terciaria:

**Tabla 5.13:** Presupuesto del pavimento suelo-cemento mediante el método de la PCA

| **Proceso constructivo** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **No.** | **Descripción** | **Und** | **Cantidad** | **Precio unitario 2024** | **Valor total** |
| **1. Obras preliminares** | | | | | |
| 1.1 | Localización y Replanteo | m2 | 4080 | $ 2,842.00 | $ 11,595,360.00 |
| 1.2 | Reconformación de vía | m2 | 4080 | $ 3,073.00 | $ 12,537,840.00 |
| 1.3 | Excavaciones varias sin calificar | m3 | 816 | $ 43,731.00 | $ 35,684,496.00 |
| 1.4 | Transporte de material de mejoramiento RM | m3*Km | 11056.5 | $ 3,393.00 | $ 37,514,704.50 |
| 1.5 | Transporte de Cemento (dist max 250 km) | Tn*Km | 1880.82 | $ 439.60 | $ 826,808.47 |
| 1.6 | Transporte de aditivo QI-Binder | Kg*Km | 6.520176 | $ 439.60 | $ 2,866.27 |
| 1.7 | Manejo de aguas | Glb | 1 | $ 5,000,000.00 | $ 5,000,000.00 |
| **Sub-Total** | | | | | **$ 103,162,075.24** |
| **2. Pavimento suelo-cemento estabilizado** | | | | | |
| 2.1 | Agua | m3 | 108.7 | $ 3,038.00 | $ 330,138.24 |
| 2.2 | Aditivo QI BINDER (0.5 % del agua compactación) | Kg | 326.0 | $ 12,126.00 | $ 3,953,182.71 |
| 2.3 | Cemento (Argos UG verde) | Kg | 94041 | $ 600.00 | $ 56,424,600.00 |
| 2.4 | Suministro e instalación de roca muerta para vías | m3 | 552.8 | $ 76,402.00 | $ 42,236,935.65 |
| 2.5 | Estabilización suelo cemento e=15cm, dosificación cemento=9 % y aditivo=0.5 % * | m2 | 3240 | $ 23,650.48 | $ 76,627,555.20 |
| 2.6 | Extendido y compactada 15 cm | m3/Comp | 1080 | $ 65,760.00 | $ 71,020,800.00 |
| 2.7 | Mezcla asfáltica superficie bituminosa e=3cm** | m3 | 97.2 | $ 1,300,213.00 | $ 126,380,703.60 |
| **Sub-Total** | | | | | **$ 376,973,915.40** |
| **AIU (35 %)** | | | | | **$ 168,047,596.73** |
| **Total** | | | | | **$ 648,183,587.37** |

* Este ítem incluye el alquiler del valor por Hr del camión cisterna y motoniveladora.
** Este ítem incluye el alquiler del valor por Hr de la terminadora y equipos de compactación.

Los datos de precios unitarios fueron tomados de la resolución de la secretaria de infraestructura de la gobernación del valle donde se definen los precios unitarios para la construcción y mantenimiento de pavimentos en la malla vial en la zona urbana y rural para el año 2024. La do-

sificación de aditivo al 0.3 % tiene un costo de $644,625,722.94, lo que representa una diferencia de $3,557,864.43 menos en comparación con la dosificación al 0.5 %, cuyo costo es de $648,183,587.37

En el análisis de cantidades de obra, se calculó la cantidad necesaria de materiales para construir el pavimento suelo-cemento con base al estudio de Hernández [52] que comparó dos soluciones de pavimento tipo placa huella y pavimento rígido, a continuación se presenta las cantidades de obra teniendo en cuenta los datos suministrados por Hernández:

**Tabla 5.14:** Datos de la via analizada y cantidades de obra respectivas

Vía k0+000 a k0+540 transporte estimado de 30 km

| **Datos de la via** | | | |
|---|---|---|---|
| Ancho (m) | Longitud (m) | Espesor (m) | Volumen (m3) |
| 6 | 540 | 0.15 | 486 |
| Superficie bituminosa | | 0.03 | 97.2 |

| | | |
|---|---|---|
| **Densidad seca maxima** | 2.15<br>2150 | **g/cm3**<br>**Kg/m3** |
| **Contenido óptimo de Humedad** | 10.4 | % |

| **Cantidades de obra** | | | |
|---|---|---|---|
| **Items** | **Masa** | | **Volumen** |
| | Kg | Ton | m3 |
| Suelo cemento estabilizado | 1044900 | 1044.9 | - |
| Cemento 9 % | 94041 | 94.04 | - |
| Roca muerta RM* | 1188574 | 1188.57 | 552.8 |
| Agua | 108669.6 | - | 108.7 |
| Aditivo 0.5 % del agua de comp. | 326.0088 | 0.33 | - |
| Aditivo 0.3 % del agua de comp. | 543.348 | 0.54 | - |

*Al momento de compactar el volumen de RM disminuye por lo tanto se adicionó 25 % del volumen calculado

Para construir el análisis de precios, no se consideró el costo asociado al mantenimiento periódico del pavimento debido a la dificultad de cuantificar y estimar estos trabajos con precisión, ya que dependen de múltiples variables, como las condiciones climáticas, el tránsito y el tipo de deterioro que pueda presentarse. Sin embargo, es importante destacar que la vida útil total del pavimento de 20 años puede ser extendida mediante actividades de rehabilitación y mantenimiento periódico. Este mantenimiento debe ser planificado y ejecutado en conformidad con el marco legal y las directrices del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), la entidad responsable de la supervisión y regulación de los proyectos viales, así como de garantizar su correcto mantenimiento.

En el análisis comparativo de costos, se evaluaron tres alternativas de pavimentación para la vía estudiada: placa huella, pavimento rígido y el pavimento suelo-cemento propuesto. Según la propuesta del trabajo de grado de Hernandez [52], el costo total estimado para la construcción de la placa huella con un espesor de 15 cm sobre concreto ciclópeo asciende a $1,767,425,361.00, mientras que el pavimento rígido, diseñado con una losa de 25 cm de espesor, alcanza un costo de $2,040,653,045.00. En contraste, el pavimento suelo-cemento propuesto en este estudio con cemento al 9 % y aditivo al 0.5 %, con un espesor de 15 cm (6 pulgadas), tiene un costo total significativamente menor de $648,183,587.40, incluyendo la capa bituminosa de 3 cm. Este análisis evidencia que la alternativa suelo-cemento es una opción económicamente más viable, representando un ahorro del 63.3 % respecto al pavimento rígido y del 68.2 % en comparación con la placa huella, mientras ofrece un diseño funcionalmente adecuado para las condiciones de tráfico y características del suelo en la zona de estudio.

En contraste, el pavimento suelo-cemento propuesto con cemento al 9 % y aditivo 0.3 % tiene un costo significativamente menor. Para esta dosificación de aditivo, el costo total estimado es de $644,625,722.94, lo que representa un ahorro del 63.4 % frente al pavimento rígido y del 68.5 % respecto a la placa huella, manteniendo un diseño funcional y adecuado para las condiciones del tráfico y del suelo en la zona.

# 6. CONCLUSIONES

1. Con respecto a la caracterización de las muestras utilizadas en este proyecto, el suelo roca muerta de las canteras Cachibí y la Roca fueron clasificadas según la normativa INV E-180-13 como suelos A-2-6 y de acuerdo con SUCS como SC (arena arcillosa), ambos materiales son predominantemente arenas con finos plásticos con un pasa tamiz N 200 de 7.1 % para el material de Cachibí y 14.5 % para el material de La Roca. Esta clasificación sugiere que ambos materiales son adecuados para estabilización con cemento y aditivos en aplicaciones de pavimentos.

2. Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas en la capacidad de carga del suelo tipo roca muerta entre los materiales provenientes de las canteras evaluadas. El material de la cantera Cachibí presentó un CBR del 46 % al 100 % de compactación, lo que refleja una mayor capacidad de soporte en comparación con el material de la cantera La Roca, que alcanzó un CBR del 15 %. No obstante, según el artículo 350 de INVIAS, ambos materiales cumplen con los requisitos mínimos para ser tratados con cemento, dado que el valor mínimo de CBR requerido para este tipo de estabilización es del 10 %.

3. Los resultados obtenidos en las pruebas de CBR mostraron un incremento significativo en la capacidad de soporte del suelo roca muerta con el aumento de las dosificaciones de estabilización para la cantera Cachibí. Para una dosificación de 7 % de cemento y 0.3 % de aditivo QI BINDER, se alcanzó un CBR del 156 % al 100 % de compactación. Al incrementar la dosificación a 9 % de cemento y 0.5 % de aditivo, el CBR aumentó a 285 %, lo que representa una mejora del 82.7 %. Este resultado evidencia la efectividad de mayores dosificaciones en el fortalecimiento del suelo para aplicaciones en pavimentos.

4. Con base en el método PCA y los resultados obtenidos del comportamiento del material estabilizado de la cantera Cachibí, se diseñó un pavimento unicapa óptimo para las dosificaciones de 9 % de cemento combinado con 0.3 % y 0.5 % de aditivo QI BINDER. Este diseño incluye un espesor mínimo de 15 cm (6 pulgadas) de roca muerta estabilizada, complementado con una capa bituminosa de 1 pulgada, estos espesores son suficiente para soportar el tráfico proyectado de 35 vehículos por día (TPD) con un periodo de 20 años. El diseño considera un módulo de reacción k correspondiente a un suelo débil, asegurando un desempeño adecuado bajo estas condiciones.

5. El análisis comparativo de costos entre un pavimento de suelo-cemento, diseñado según el método PCA, y una placa huella convencional evidenció una diferencia significativa en términos económicos. La construcción del pavimento de suelo-cemento tiene un costo estimado de $648,183,587.37, mientras que la placa huella convencional asciende a $1,767,425,361. Esto representa un ahorro aproximado del 63.3 % en favor del pavimento de suelo-cemento.

Este ahorro resalta la viabilidad económica de utilizar suelos estabilizados químicamente, especialmente en proyectos de infraestructura vial en zonas rurales o de bajos presupuestos.

6. Los resultados de las pruebas de durabilidad evidenciaron diferencias significativas en el comportamiento de los materiales estudiados. El material de la cantera La Roca no logró superar la prueba de durabilidad, incluso con las dosificaciones más altas de cemento y aditivo, ya que las pérdidas durante los ensayos excedieron el límite del 10 % establecido por la normativa. Por el contrario, el material de la cantera Cachibí demostró un desempeño superior, cumpliendo con los requisitos de durabilidad para ambas dosificaciones evaluadas (9 % de cemento con 0.3 % y 0.5 % de aditivo). Este resultado confirma que el material de Cachibí tiene mejores propiedades para ser estabilizado químicamente y utilizado en aplicaciones de pavimentos, mientras que el material de La Roca presenta limitaciones importantes en términos de durabilidad bajo las condiciones de estabilización estudiadas.

7. Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión muestran que, aunque ambos materiales presentan limitaciones en mezclas sin aditivo, las dosificaciones con 9 % de cemento y aditivos al 0.3 % o al 0.5 % son las únicas que cumplen los límites establecidos por la norma INVIAS, tanto a 7 como a 28 días, demostrando la importancia de combinar mayores proporciones de cemento con aditivos para un desempeño adecuado. Además, el material de la cantera Cachibí mostró un mejor comportamiento general frente a la estabilización, logrando mayores valores de resistencia en comparación con el material de La Roca, lo que evidencia su mayor aptitud para este tipo de tratamiento bajo las condiciones evaluadas.

8. La cantera Cachibí tiene una antiguedad de 45 años de funcionamiento mientras que la cantera La Roca es más reciente contando con apenas 25 años, el sustrato de donde se sacó las muestras del material de La Roca posiblemente es más superficial y por consiguiente más meteorizado comparado con el material que se extrae de la montaña de Cachibí que es un sustrato más profundo y más cercano a la roca madre a pesar de que ambos materiales son de una zona geológica similar, esta hipótesis se refuerza con los ensayos equivalente de arena, granulometría y limites que demostraron que La Roca tiene mayor contenido de arcilla y más finos comparados con Cachibí.

# 7. IMPACTO Y PERSPECTIVAS

La presente investigación sobre estabilización química de suelos utilizando cemento junto con el aditivo químico QI Binder representa un aporte significativo para el mejoramiento de las vías terciarias, especialmente en regiones donde las condiciones de los suelos naturales son inadecuadas para soportar el tráfico vehicular. Los resultados obtenidos que demostraron la efectividad de estas dosificaciones para mejorar la resistencia a la compresión y la durabilidad, permiten establecer lineamientos iniciales para el diseño de capas estabilizadas en vías rurales, promoviendo alternativas sostenibles y de bajo costo que prolonguen la vida útil de estas infraestructuras.

Un aspecto clave del impacto de esta investigación radica en la posibilidad de estimar los costos asociados a la estabilización química y compararlos con metodologías tradicionales, como el uso de placa huella o pavimento rígido. Los resultados evidencian que, al emplear estabilización química, se reduce significativamente la necesidad de transporte de materiales pétreos y se minimiza el desgaste de los recursos naturales locales. Esto no solo implica menores costos iniciales de construcción, sino también beneficios económicos a largo plazo debido a la prolongación de la vida útil de las vías y la disminución de intervenciones de mantenimiento. Adicionalmente, la propuesta ofrece un impacto ambiental positivo al reducir las emisiones de dióxido de carbono. Esto refuerza el enfoque hacia la sostenibilidad en la infraestructura vial, haciendo de la estabilización química una opción ideal para regiones donde los recursos son limitados

En cuanto a las perspectivas futuras, este estudio abre la posibilidad de realizar investigaciones adicionales en las siguientes áreas:

1. Evaluación en campo: Implementar las dosificaciones estudiadas en proyectos piloto para observar su desempeño en condiciones reales de tráfico y clima, comparando los resultados obtenidos en laboratorio con los comportamientos observados en sitio y hacerle seguimiento a estos tramos.

2. Optimización de costos: Analizar combinaciones de dosificaciones de cemento y aditivo para determinar configuraciones más económicas que mantengan o mejoren los niveles de desempeño obtenidos en esta investigación.

3. Inclusión de otros agentes estabilizantes: Investigar estabilizantes alternativos, como cal, cenizas volantes o escorias, en combinación con los ya evaluados.

4. Investigar la resistencia frente a agentes químicos agresivos (sulfatos, cloruros) o ciclos térmicos extremos.

# ANEXOS

## Anexo 1. Análisis granulométrico de suelos por tamizado.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE**
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA**
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

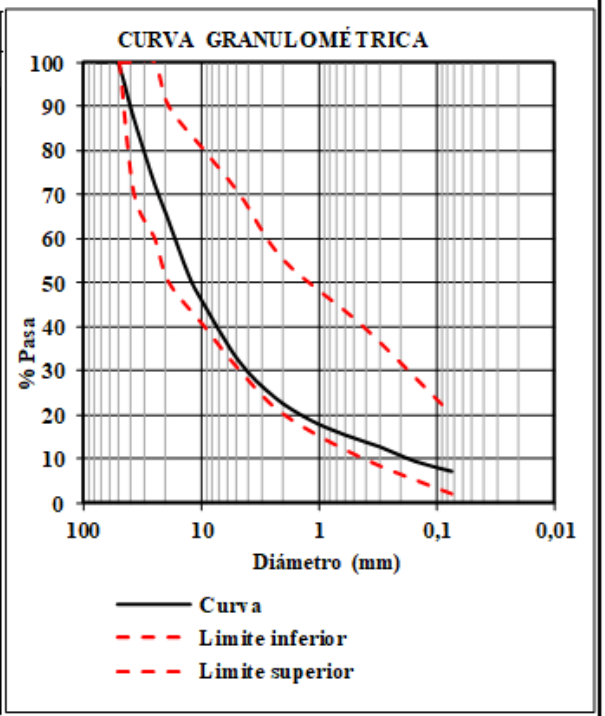
| | | | |
|---|---|---|---|
| **Proyecto** | Estabilización de suelos | **Fecha:** | 21-ago-24 |
| **Localización:** | Cantera Cachibí | | |
| **Fuente:** | Roca muerta cantera Cachibí | | |
| **Descripción** | Muestra en Recipiente 23 | | |

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO**
**I.N.V.I.E - 123**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Peso recipiente (gr)** | 657,5 | | |
| Peso inicial (gr) | 9971,0 | Peso lavado (gr) | 9287,0 |
| | | Peso tamizado (gr) | 9287,0 |

| TAMIZ | Peso retenido gr | Porcentaje retenido % | Retenido acumulado % | Porcentaje pasa % |
|---|---|---|---|---|
| 3" | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 2 1/2" | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 2" | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 1 1/2" | 1165,0 | 11,7 | 11,7 | 88,3 |
| 1" | 1493,0 | 15,0 | 26,7 | 73,3 |
| 3/4" | 888,5 | 8,9 | 35,6 | 64,4 |
| 1/2" | 1268,5 | 12,7 | 48,3 | 51,7 |
| 3/8" | 641,5 | 6,4 | 54,7 | 45,3 |
| # 4 | 1311,5 | 13,2 | 67,9 | 32,1 |
| # 8 | 819,0 | 8,2 | 76,1 | 23,9 |
| #16 | 511,0 | 5,1 | 81,2 | 18,8 |
| # 30 | 338,5 | 3,4 | 84,6 | 15,4 |
| # 50 | 272,0 | 2,7 | 87,3 | 12,7 |
| # 100 | 330,5 | 3,3 | 90,7 | 9,3 |
| # 200 | 223,5 | 2,2 | 92,9 | 7,1 |

| | |
|---|---|
| Pasa N°200 tamizado | 24,50 |
| Total | 9287,0 |
| %Error | 0,0000 |



**UNIVERSIDAD DEL VALLE**
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA**
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

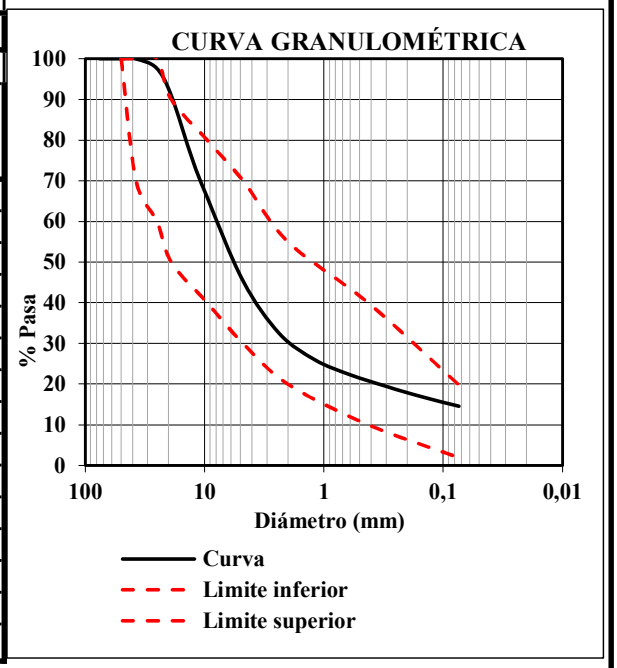
**Proyecto** Estabilización de suelos **Fecha:** 21-ago-24
**Localización:** Cantera La Roca
**Fuente:** Roca muerta cantera La Roca
**Descripción** Muestra en Recipiente 21

## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
## I.N.V.I.E - 123

**Peso recipiente (gr)**
Peso inicial (gr) 4281,0 Peso lavado (gr) 3650,0
Peso tamizado (gr) 3663,0

| TAMIZ | Peso retenido gr | Porcentaje retenido % | Retenido acumulado % | Porcentaje pasa % |
|---|---|---|---|---|
| 3" | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 2 1/2" | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 2" | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 1 1/2" | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 1" | 95,0 | 2,2 | 2,2 | 97,8 |
| 3/4" | 285,0 | 6,7 | 8,9 | 91,1 |
| 1/2" | 676,0 | 15,8 | 24,7 | 75,3 |
| 3/8" | 399,0 | 9,3 | 34,0 | 66,0 |
| # 4 | 884,5 | 20,7 | 54,6 | 45,4 |
| # 8 | 553,0 | 12,9 | 67,6 | 32,4 |
| #16 | 279,0 | 6,5 | 74,1 | 25,9 |
| # 30 | 154,5 | 3,6 | 77,7 | 22,3 |
| # 50 | 123,5 | 2,9 | 80,6 | 19,4 |
| # 100 | 108,0 | 2,5 | 83,1 | 16,9 |
| # 200 | 101,5 | 2,4 | 85,5 | 14,5 |

| | |
|---|---|
| Pasa N°200 tamizado | 4,00 |
| Total | 3663,0 |
| %Error | 0,3562 |



# Anexo 2. Limite líquido y plástico de los suelos.

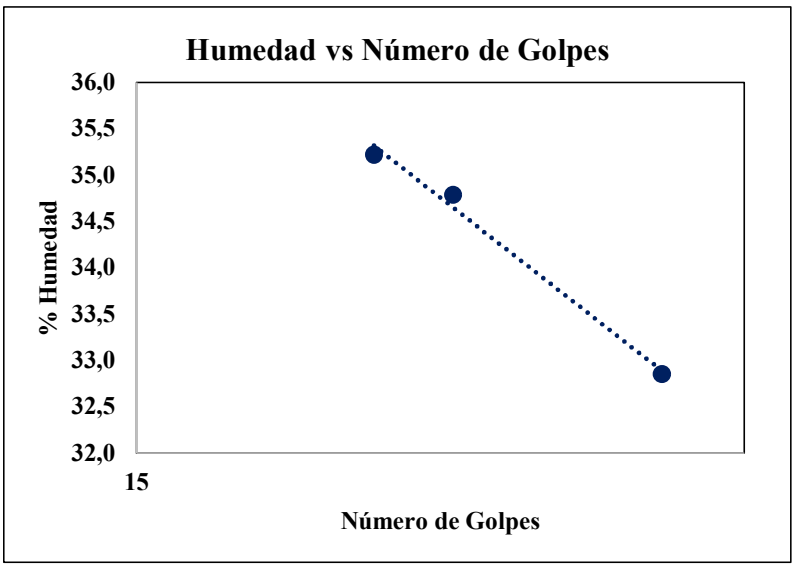
**UNIVERSIDAD DEL VALLE**
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA**
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Proyecto** | Estabilización de suelos | **Fecha:** | 21-ago-24 |
| **Localización:** | Cantera Cachibí | | |
| **Fuente:** | Roca muerta cantera Cachibí | | |
| **Descripción** | Muestra en Recipiente 136 | | |

**LIMITE LIQUIDO Y PLÁSTICO DE LOS SUELOS**
**I.N.V.I.E - 125 I.N.V.I.E - 126**

| **Recipiente** | **Limite liquido** | | | **Limite plastico** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **# Golpes** | 35 | 25 | 22 | | | |
| **$P_1$ (gr)** | 21,53 | 24,73 | 27,70 | 18,38 | 23,77 | 18,68 |
| **$P_2$ (gr)** | 17,66 | 19,86 | 22,03 | 16,23 | 21,57 | 16,50 |
| **$P_3$ (gr)** | 5,88 | 5,86 | 5,93 | 5,90 | 10,99 | 5,96 |
| **Humedad %** | 32,9 | 34,8 | 35,2 | 20,813 | 20,794 | 20,683 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Limite Liquido % | 34,750 | Limite plastico % | 20,763 |



**UNIVERSIDAD DEL VALLE**
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA**
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

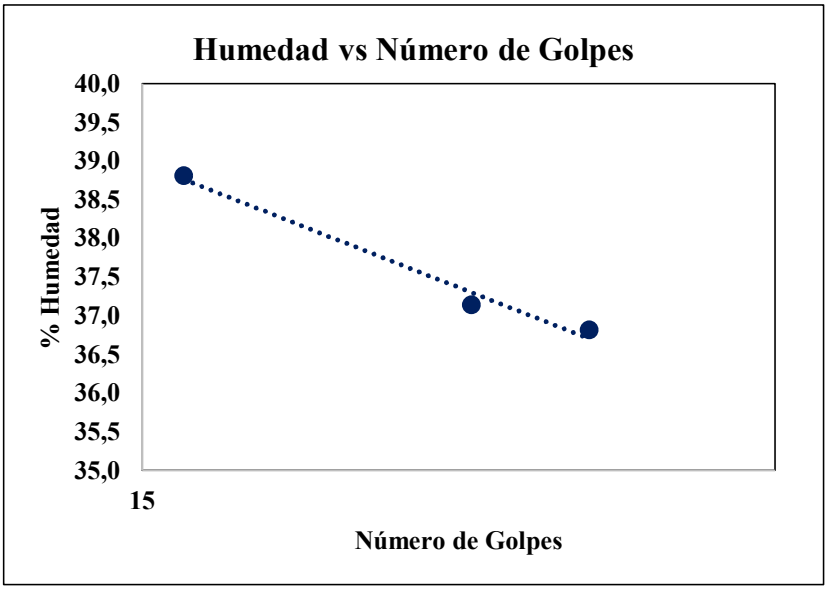
| | | | |
|---|---|---|---|
| **Proyecto** | Estabilización de suelos | **Fecha:** | 21-ago-24 |
| **Localización:** | Cantera La Roca | | |
| **Fuente:** | Roca muerta cantera La Roca | | |
| **Descripción** | Muestra en Recipiente 136 | | |

## LIMITE LIQUIDO Y PLÁSTICO DE LOS SUELOS
**I.N.V.I.E - 125  I.N.V.I.E - 126**

| **Recipiente** | **Limite liquido** | | | **Limite plastico** | |
|---|---|---|---|---|---|
| **# Golpes** | 25 | 16 | 30 | | |
| **$P_1$ (gr)** | 20,37 | 25,15 | 24,43 | 16,9 | 19,11 |
| **$P_2$ (gr)** | 16,37 | 19,81 | 19,46 | 14,66 | 17,30 |
| **$P_3$ (gr)** | 5,6 | 6,05 | 5,96 | 5,99 | 10,37 |
| **Humedad %** | 37,1 | 38,8 | 36,8 | 25,8 | 26,1 |

| | |
|---|---|
| Limite Liquido % | 37,3 |

| | |
|---|---|
| Limite plastico % | 26,0 |



# Anexo 3. Ensayo modificado de compactación para la cantera Cachibí.

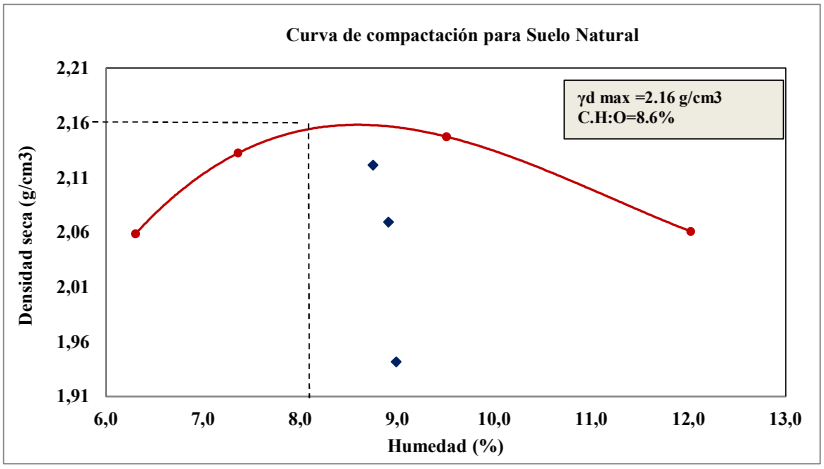
**CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO**
**INV E 148**

FGL-05
Versión 01
Septiembre de 2024

**CLIENTE:**
**OBRA:**
**LOCALIZACION:** Planta de agragados Cachibí
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

**DESCRIPCION MATERIAL:** Suelo Natural **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN DE LA MUESTRA:**
**FECHA :** **FECHA DE ENSAYO:** 12-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** **PROFUNDIDAD (m):**

| | *Ensayo modificado compactación* | | | | *Compactacion moldes CBR* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| No. de golpes | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 26 | 12 |
| No. de Capas | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| Molde No. | 1 | 1 | 1 | 1 | 7 | 81 | 5 |
| Peso molde + muestra húmeda | 7785 | 8001 | 8134 | 8042 | 10614 | 9566 | 9499 |
| Peso Molde | 3102 | 3102 | 3102 | 3102 | 5193 | 4270 | 4526 |
| Peso de la muestra húmeda | 4683 | 4899 | 5032 | 4940 | 5421 | 5296 | 4973 |
| Humedad (Horno) | **6,3** | **7,4** | **9,5** | **12,0** | **8,8** | **8,9** | **9,0** |
| Peso de la muestra seca | 4405 | 4563 | 4595 | 4410 | 4985 | 4863 | 4563 |
| Volumen de la muestra | 2140 | 2140 | 2140 | 2140 | 2350 | 2350 | 2350 |
| Densidad de la muestra Seca | **2,06** | **2,13** | **2,15** | **2,06** | **2,12** | **2,07** | **1,94** |
| **HUMEDAD** | | | | | | | |
| Peso recipiente + suelo húmedo | 551,2 | 589,1 | 599,1 | 571,3 | 447,6 | 555,8 | 442,5 |
| Peso recipiente + suelo seco | 521,6 | 552,3 | 552,3 | 515,2 | 415,6 | 514,3 | 409,8 |
| Peso recipiente | 52,5 | 51,8 | 59,7 | 48,6 | 50,4 | 48,4 | 45,6 |
| Humedad (Horno) | **6,3** | **7,4** | **9,5** | **12,0** | **8,8** | **8,9** | **9,0** |



# CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO
## INV E 148

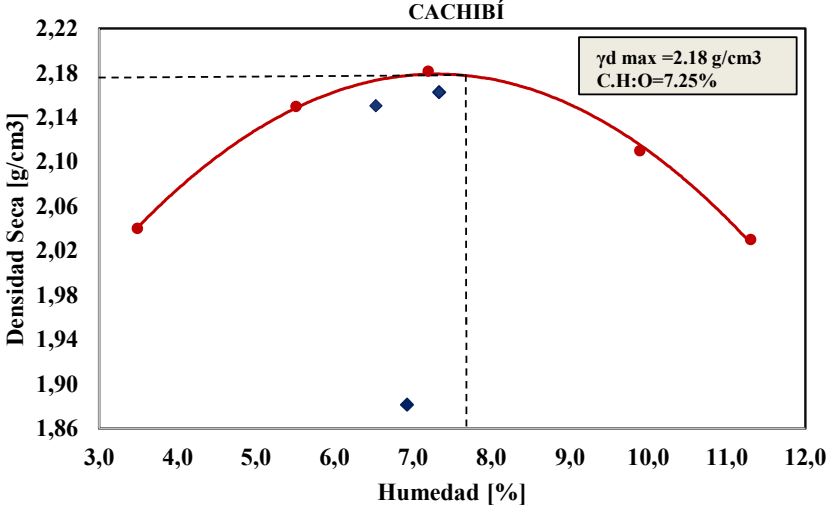


**CLIENTE:**
**OBRA:**
**LOCALIZACION** Planta de agragados Cachibí
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

**DESCRIPCION MATERIAL:** Roca Muerta C=7% y Aditivo 0.3% **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN MUESTRA:**
**FECHA DE RECIBO:** **FECHA DE ENSAYO:** 13-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** **PROFUNDIDAD (m):**

| | *Ensayo modificado compactación* | | | | | *Compactacíon moldes CBR* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| No. de golpes | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 56 | 26 | 12 |
| No. de Capas | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| Molde No. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 3 | 81 |
| Masa molde + muestra húmeda | 7628,0 | 7965,0 | 8115,0 | 8073,0 | 7946,0 | 9976,5 | 9937,5 | 8993,5 |
| Masa Molde | 3102 | 3102 | 3102 | 3102 | 3102 | 4521,5 | 4554,5 | 4266,5 |
| Masa de la muestra húmeda | 4526 | 4863 | 5013 | 4971 | 4844 | 5455 | 5383 | 4727 |
| **Humedad (Horno)** | **3,5** | **5,5** | **7,2** | **9,9** | **11,3** | **7,3** | **6,5** | **6,9** |
| Masa de la muestra seca | 4373 | 4609 | 4677 | 4523 | 4352 | 5082 | 5053 | 4421 |
| Volumen de la muestra | 2144 | 2144 | 2144 | 2144 | 2144 | 2350 | 2350 | 2350 |
| **Densidad de la muestra Seca** | **2,04** | **2,15** | **2,18** | **2,11** | **2,03** | **2,16** | **2,15** | **1,88** |
| Masa recipiente + suelo húmedo | 535,9 | 482,2 | 504,4 | 530,1 | 780,7 | 521,7 | 531,8 | 526,7 |
| Masa recipiente + suelo seco | 520,0 | 459,0 | 474,0 | 488,0 | 708,0 | 490,5 | 503,0 | 496,8 |
| Masa recipiente | 64,5 | 38,0 | 51,5 | 62,5 | 64,9 | 65,0 | 62,5 | 63,8 |
| Humedad (Horno) | **3,5** | **5,5** | **7,2** | **9,9** | **11,3** | **7,3** | **6,5** | **6,9** |

**Curva de compactación para Cemento 7% y Aditivo 0.3% para la cantera CACHIBÍ**




| | |
|---|---|
| **Densidad seca maxima [g/cm3]** | **2.18** |
| **Contenido óptimo de Humedad [%]** | **7.25** |

# CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO
## INV E 148

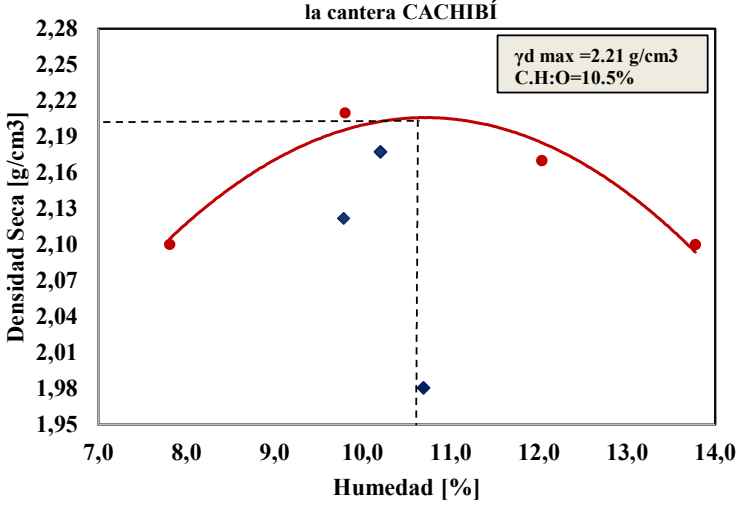


**CLIENTE:**
**OBRA:**
**LOCALIZACION OBRA:** Planta de agragados Cachibí
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

**DESCRIPCION MATERIAL:** Roca Muerta C=7% y Aditivo 0.5% **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN DE LA MUESTRA:**
**FECHA DE RECIBO:** **FECHA DE ENSAYO:** 17-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** **PROFUNDIDAD (m):**

| | *Ensayo modificado compactación* | | | | *Compactacíon moldes CBR* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| No. de golpes | 25 | 25 | 25 | 25 | 56 | 26 | 12 |
| No. de Capas | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| Molde No. | 1 | 1 | 1 | 1 | MN1 | 7 | 5 |
| Masa molde + muestra húmeda | 7956,0 | 8304,0 | 8314,0 | 8224,0 | 10162,0 | 10623,0 | 9535,0 |
| Masa Molde | 3102 | 3102 | 3102 | 3102 | 4523,0 | 5149,0 | 4383,0 |
| Masa de la muestra húmeda | 4854 | 5202 | 5212 | 5122 | 5639 | 5474 | 5152 |
| **Humedad (Horno)** | **7,8** | **9,8** | **12,0** | **13,8** | **10,2** | **9,8** | **10,7** |
| Masa de la muestra seca | 4502 | 4738 | 4652 | 4502 | 5117 | 4986 | 4654 |
| Volumen de la muestra | 2144 | 2144 | 2144 | 2144 | 2350 | 2350 | 2350 |
| **Densidad de la muestra Seca** | **2,10** | **2,21** | **2,17** | **2,10** | **2,18** | **2,12** | **1,98** |
| Masa recipiente + suelo húmedo | 441,2 | 405,6 | 554,0 | 454,0 | 954,4 | 242,8 | 378,5 |
| Masa recipiente + suelo seco | 412,0 | 374,0 | 501,0 | 406,0 | 878,5 | 227,0 | 347,5 |
| Masa recipiente | 38,0 | 51,5 | 60,5 | 57,5 | 134,5 | 65,5 | 57,5 |
| Humedad (Horno) | **7,8** | **9,8** | **12,0** | **13,8** | **10,2** | **9,8** | **10,7** |

**Curva de compactación para Cemento 7% y Aditivo 0.5% para la cantera CACHIBÍ**




| | |
|---|---|
| **Densidad seca maxima [g/cm3]** | **2.21** |
| **Contenido óptimo de Humedad [%]** | **10.2** |

# CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO
## INV E 148

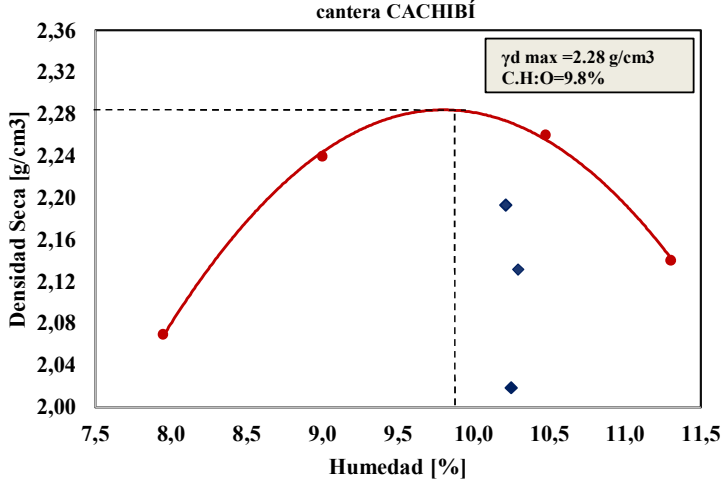


**CLIENTE:**
**OBRA:**
**LOCALIZACION OBRA:** Planta de agragados Cachibí
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

**DESCRIPCION MATERIAL:** Roca Muerta C=9% y Aditivo 0.3% **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN DE LA MUESTRA:**
**FECHA DE RECIBO:** **FECHA DE ENSAYO:** 19-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** **PROFUNDIDAD (m):**

| | *Ensayo modificado compactación* | | | | *Compactacíon moldes CBR* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| No. de golpes | 25 | 25 | 25 | 25 | 56 | 26 | 12 |
| No. de Capas | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| Molde No. | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 3 | 81 |
| Masa molde + muestra húmeda | 7892,0 | 8336,0 | 8455,0 | 8209,0 | 10231,0 | 10047,0 | 9498,5 |
| Masa Molde | 3102 | 3102 | 3102 | 3102 | 4551,0 | 4522,5 | 4269,0 |
| Masa de la muestra húmeda | 4790 | 5234 | 5353 | 5107 | 5680 | 5525 | 5230 |
| **Humedad (Horno)** | **7,9** | **9,0** | **10,5** | **11,3** | **10,2** | **10,3** | **10,2** |
| Masa de la muestra seca | 4437 | 4802 | 4845 | 4588 | 5154 | 5009 | 4743 |
| Volumen de la muestra | 2144 | 2144 | 2144 | 2144 | 2350 | 2350 | 2350 |
| **Densidad de la muestra Seca** | **2,07** | **2,24** | **2,26** | **2,14** | **2,19** | **2,13** | **2,02** |
| Masa recipiente + suelo húmedo | 397,5 | 555,0 | 574,0 | 878,0 | 444,1 | 366,9 | 405,5 |
| Masa recipiente + suelo seco | 372,5 | 514,5 | 525,5 | 796,0 | 408,5 | 338,5 | 373,5 |
| Masa recipiente | 58,0 | 64,5 | 62,5 | 70,5 | 59,5 | 62,5 | 61,0 |
| Humedad (Horno) | **7,9** | **9,0** | **10,5** | **11,3** | **10,2** | **10,3** | **10,2** |

**Curva de compactación para Cemento 9% y Aditivo 0.3% para la cantera CACHIBÍ**




| | |
|---|---|
| **Densidad seca maxima [g/cm3]** | **2.28** |
| **Contenido óptimo de Humedad [%]** | **9.8** |

# CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO
## INV E 148

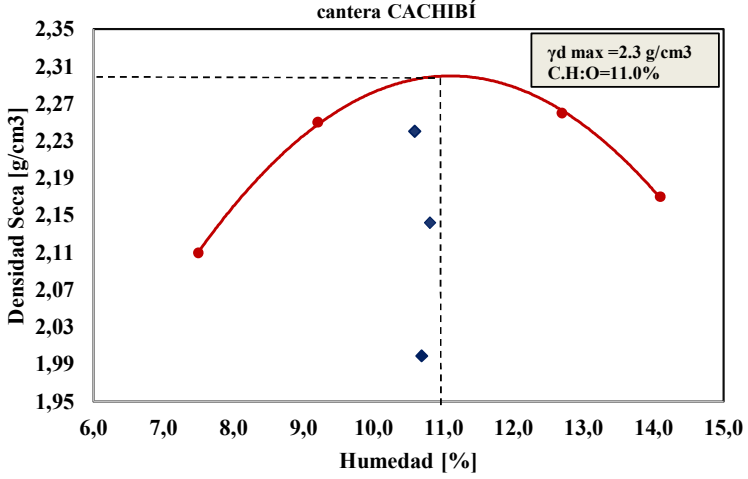


**CLIENTE:**
**OBRA:**
**LOCALIZACION OBRA:** Planta de agragados Cachibí
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

**DESCRIPCION MATERIAL:** Roca Muerta C=9% y Aditivo 0.5% **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN DE LA MUESTRA:**
**FECHA DE RECIBO:** **FECHA DE ENSAYO:** 20-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** **PROFUNDIDAD (m):**

| | *Ensayo modificado compactación* | | | | *Compactacion moldes CBR* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| No. de golpes | 25 | 25 | 25 | 25 | 56 | 26 | 12 |
| No. de Capas | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| Molde No. | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | MN1 | 7 |
| Masa molde + muestra húmeda | 7964,0 | 8370,0 | 8562,0 | 8410,0 | 10206,0 | 10105,0 | 10349,0 |
| Masa Molde | 3102 | 3102 | 3102 | 3102 | 4384,0 | 4527,0 | 5149,0 |
| Masa de la muestra húmeda | 4862 | 5268 | 5460 | 5308 | 5822 | 5578 | 5200 |
| **Humedad (Horno)** | **7,5** | **9,2** | **12,7** | **14,1** | **10,6** | **10,8** | **10,7** |
| Masa de la muestra seca | 4523 | 4824 | 4845 | 4652 | 5265 | 5034 | 4698 |
| Volumen de la muestra | 2144 | 2144 | 2144 | 2144 | 2350 | 2350 | 2350 |
| **Densidad de la muestra Seca** | **2,11** | **2,25** | **2,26** | **2,17** | **2,24** | **2,14** | **2,00** |
| Masa recipiente + suelo húmedo | 426,2 | 677,1 | 500,0 | 612,8 | 404,1 | 477,8 | 440,9 |
| Masa recipiente + suelo seco | 401,0 | 626,0 | 451,0 | 545,0 | 368,9 | 437,0 | 403,0 |
| Masa recipiente | 65,0 | 71,0 | 65,0 | 64,0 | 36,5 | 59,5 | 48,0 |
| Humedad (Horno) | **7,5** | **9,2** | **12,7** | **14,1** | **10,6** | **10,8** | **10,7** |

**Curva de compactación para Cemento 9% y Aditivo 0.5% para la cantera CACHIBÍ**




| | |
|---|---|
| **Densidad seca maxima [g/cm3]** | **2,3** |
| **Contenido óptimo de Humedad [%]** | **11,0** |

# Anexo 4. Ensayo modificado de compactación para la cantera La Roca

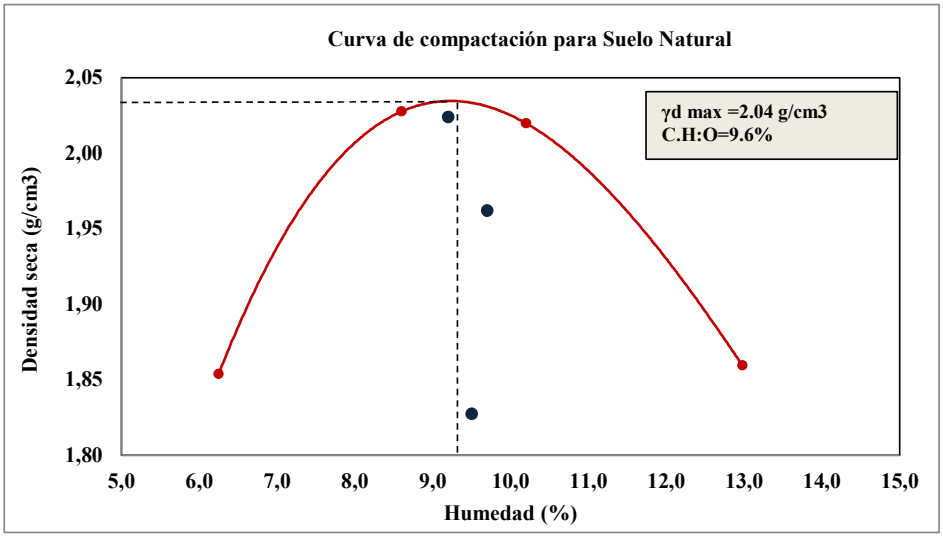
**CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO**
**INV E 148**

**FGL-05**
Versión 01
Septiembre de 2024

**CLIENTE:**
**OBRA:**
**LOCALIZACION:** Planta de agragados La Roca
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

**DESCRIPCION MATERIAL:** Suelo Natural **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN DE LA MUESTRA:**
**FECHA :** **FECHA DE ENSAYO:** 12-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** **PROFUNDIDAD (m):**

| | *Ensayo modificado compactación* | | | | *Compactacion moldes CBR* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| No. de golpes | 0 | 0 | 0 | 0 | 56 | 26 | 12 |
| No. de Capas | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Molde No. | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 7 | 4 |
| Peso molde + muestra húmeda | 7325 | 7823 | 7874 | 7606 | 9575 | 9322 | 9225 |
| Peso Molde | 3102 | 3102 | 3102 | 3102 | 4381 | 4264 | 4523 |
| Peso de la muestra húmeda | 4223 | 4721 | 4772 | 4504 | 5194 | 5058 | 4703 |
| Humedad (Horno) | **6,3** | **8,6** | **10,2** | **13,0** | **9,2** | **9,7** | **9,5** |
| Peso de la muestra seca | 3975 | 4347 | 4330 | 3987 | 4756 | 4611 | 4295 |
| Volumen de la muestra | 2144 | 2144 | 2144 | 2144 | 2350 | 2350 | 2350 |
| Densidad de la muestra Seca | **1,85** | **2,03** | **2,02** | **1,86** | **2,02** | **1,96** | **1,83** |
| **HUMEDAD** | | | | | | | |
| Peso recipiente + suelo húmedo | 485,3 | 510,3 | 531,4 | 791,5 | 359,3 | 448,8 | 556,7 |
| Peso recipiente + suelo seco | 459,0 | 474,0 | 488,0 | 708,0 | 334,5 | 415,0 | 512,4 |
| Peso recipiente | 38,0 | 51,5 | 62,5 | 64,9 | 65,0 | 66,5 | 45,7 |
| Humedad (Horno) | **6,3** | **8,6** | **10,2** | **13,0** | **9,2** | **9,7** | **9,5** |



**UNIVERSIDAD DEL VALLE**

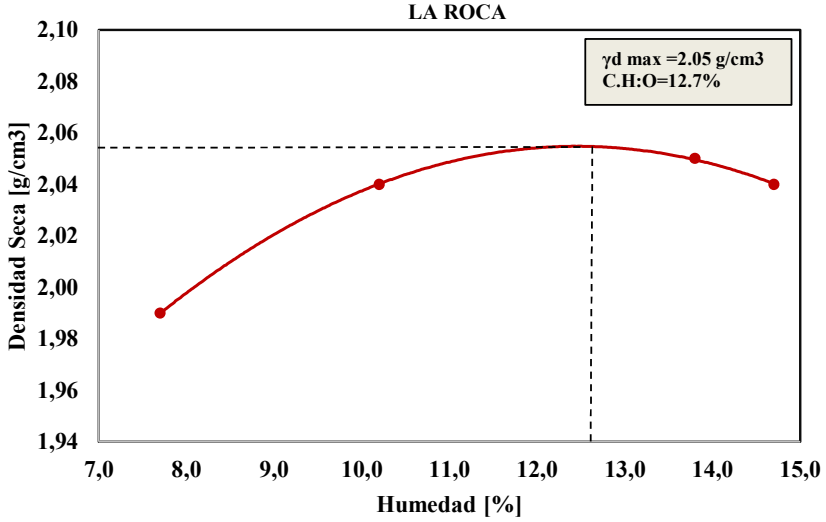
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Proyecto** | | **Fecha:** | 1-oct-24 |
| **Localización:** | Cantera LA ROCA | **Fecha muestreo:** | |
| **Fuente:** | | **Muestra #** | **1** |
| **Descripción** | Roca Muerta dosificación cemento 7% y aditivo 0.3% | | |

## RELACIONES DE HUMEDAD - PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACION) I.N.V. E - 142

| DATOS DE ENSAYO METODO C | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| No. de golpes | 25 | 25 | 25 | 25 |
| No. de Capas | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Molde No. | 85 | C-4 | 99 | 54 |
| Peso molde + muestra húmeda | 3935 | 4035 | 4116 | 4124 |
| Peso Molde | 1863 | 1863 | 1863 | 1863 |
| Peso de la muestra húmeda | 2072 | 2172 | 2253 | 2261 |
| **Humedad (Horno)** | **7,7** | **10,2** | **13,8** | **14,7** |
| Peso de la muestra seca | 1923 | 1971 | 1980 | 1971 |
| Volumen de la muestra | 968 | 968 | 968 | 968 |
| **Densidad de la muestra Seca** | **1,99** | **2,04** | **2,05** | **2,04** |
| **HUMEDAD** | | | | |
| Peso recipiente + suelo húmedo | 670,5 | 647,5 | 430,5 | 640,0 |
| Peso recipiente + suelo seco | 627,0 | 593,0 | 386,0 | 567,0 |
| Peso recipiente | 65,0 | 57,5 | 62,5 | 71,0 |
| Humedad (Horno) | **7,7** | **10,2** | **13,8** | **14,7** |

**Curva de compactación para Cemento 7% y Aditivo 0.3% para la cantera LA ROCA**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE**

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA

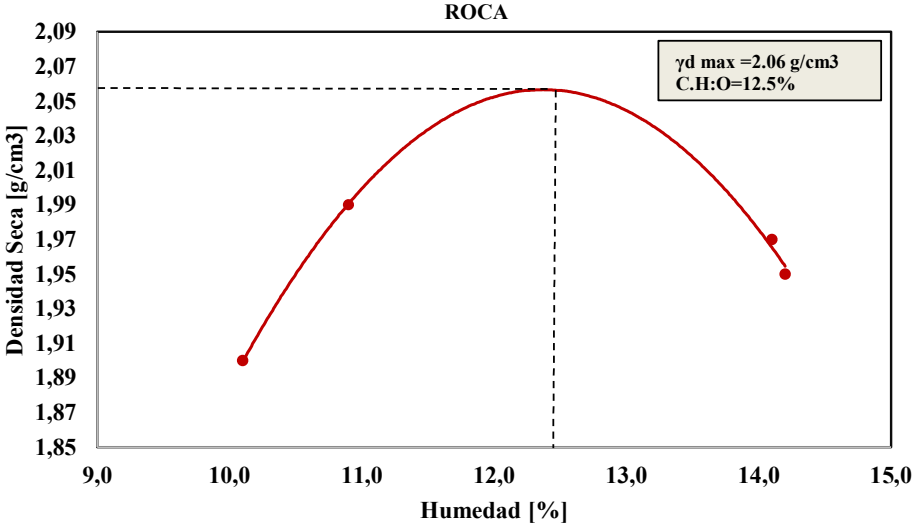
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Proyecto** | | **Fecha:** | 2-oct-24 |
| **Localización:** | Cantera LA ROCA | **Fecha muestreo:** | |
| **Fuente:** | | **Muestra #** | **1** |
| **Descripción** | Roca Muerta dosificación cemento 7% y aditivo 0.5% | | |

## RELACIONES DE HUMEDAD - PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACION) I.N.V. E - 142

| DATOS DE ENSAYO METODO C | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| No. de golpes | 25 | 25 | 25 | 25 |
| No. de Capas | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Molde No. | 85 | C-4 | 99 | 54 |
| Peso molde + muestra húmeda | 3947 | 4062 | 4080 | 4103 |
| Peso Molde | 1923 | 1923 | 1923 | 1924 |
| Peso de la muestra húmeda | 2024 | 2139 | 2157 | 2179 |
| **Humedad (Horno)** | **10,1** | **10,9** | **14,2** | **14,1** |
| Peso de la muestra seca | 1839 | 1928 | 1888 | 1910 |
| Volumen de la muestra | 968 | 968 | 968 | 968 |
| **Densidad de la muestra Seca** | **1,90** | **1,99** | **1,95** | **1,97** |
| **HUMEDAD** | | | | |
| Peso recipiente + suelo húmedo | 441,5 | 408,0 | 452,0 | 519,0 |
| Peso recipiente + suelo seco | 407,0 | 373,5 | 404,5 | 462,0 |
| Peso recipiente | 65,0 | 57,5 | 71,0 | 57,5 |
| Humedad (Horno) | **10,1** | **10,9** | **14,2** | **14,1** |

**Curva de compactación para Cemento 7% y Aditivo 0.5% para la cantera LA ROCA**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE**

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA

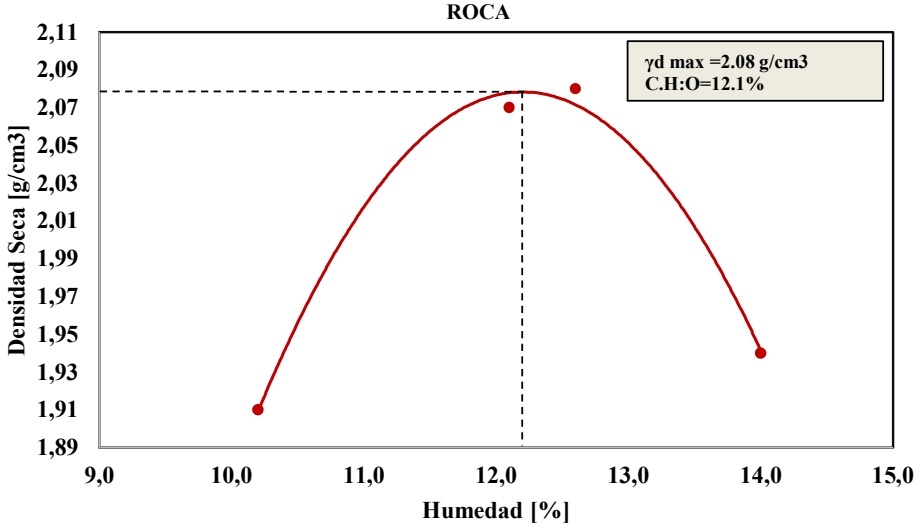
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Proyecto** | | **Fecha:** | 4-oct-24 |
| **Localización:** | Cantera LA ROCA | **Fecha muestreo:** | |
| **Fuente:** | | **Muestra #** | **1** |
| **Descripción** | Roca Muerta dosificación cemento 9% y aditivo 0.3% | | |

## RELACIONES DE HUMEDAD - PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACION) I.N.V. E - 142

| DATOS DE ENSAYO METODO C | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| No. de golpes | 25 | 25 | 25 | 25 |
| No. de Capas | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Molde No. | 85 | C-4 | 99 | 54 |
| Peso molde + muestra húmeda | 3953 | 4179 | 4067 | 4196 |
| Peso Molde | 1920 | 1931 | 1920 | 1931 |
| Peso de la muestra húmeda | 2033 | 2249 | 2147 | 2265 |
| **Humedad (Horno)** | **10,2** | **12,1** | **14,0** | **12,6** |
| Peso de la muestra seca | 1845 | 2007 | 1882 | 2012 |
| Volumen de la muestra | 968 | 968 | 968 | 968 |
| **Densidad de la muestra Seca** | **1,91** | **2,07** | **1,94** | **2,08** |
| **HUMEDAD** | | | | |
| Peso recipiente + suelo húmedo | 422,0 | 493,0 | 469,0 | 397,0 |
| Peso recipiente + suelo seco | 389,0 | 449,0 | 418,5 | 358,5 |
| Peso recipiente | 70,5 | 84,0 | 62,0 | 52,0 |
| Humedad (Horno) | **10,2** | **12,1** | **14,0** | **12,6** |

**Curva de compactación para Cemento 9% y Aditivo 0.3% para la cantera LA ROCA**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE**

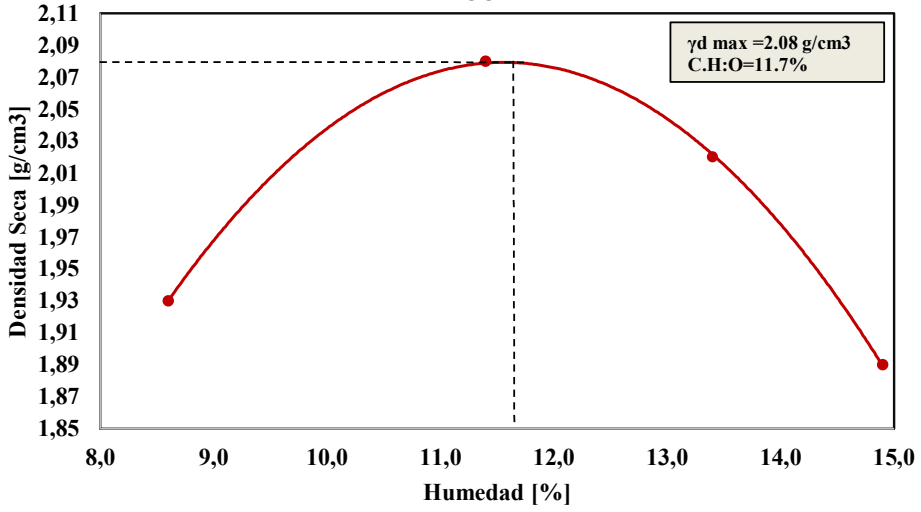
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Proyecto** | | **Fecha:** | 7-oct-24 |
| **Localización:** | Cantera LA ROCA | **Fecha muestreo:** | |
| **Fuente:** | | **Muestra #** | **1** |
| **Descripción** | Roca Muerta dosificación cemento 9% y aditivo 0.5% | | |

## RELACIONES DE HUMEDAD - PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACION) I.N.V. E - 142

| DATOS DE ENSAYO METODO C | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Punto No. | 1 | 1 | 5 | 4 |
| No. de golpes | 25 | 25 | 25 | 25 |
| No. de Capas | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Molde No. | M5 | M7 | M5 | M4 |
| Peso molde + muestra húmeda | 3960 | 4023 | 4173 | 4154 |
| Peso Molde | 1931 | 1920 | 1931 | 1931 |
| Peso de la muestra húmeda | 2030 | 2103 | 2243 | 2223 |
| **Humedad (Horno)** | **8,6** | **14,9** | **11,4** | **13,4** |
| Peso de la muestra seca | 1869 | 1830 | 2013 | 1960 |
| Volumen de la muestra | 968 | 968 | 968 | 968 |
| **Densidad de la muestra Seca** | **1,93** | **1,89** | **2,08** | **2,02** |
| **HUMEDAD** | | | | |
| Peso recipiente + suelo húmedo | 338,0 | 425,5 | 721,5 | 616,5 |
| Peso recipiente + suelo seco | 316,5 | 377,0 | 654,0 | 552,0 |
| Peso recipiente | 65,5 | 52,0 | 62,5 | 71,0 |
| Humedad (Horno) | **8,6** | **14,9** | **11,4** | **13,4** |

**Curva de compactación para Cemento 9% y Aditivo 0.5% para la cantera LA ROCA**



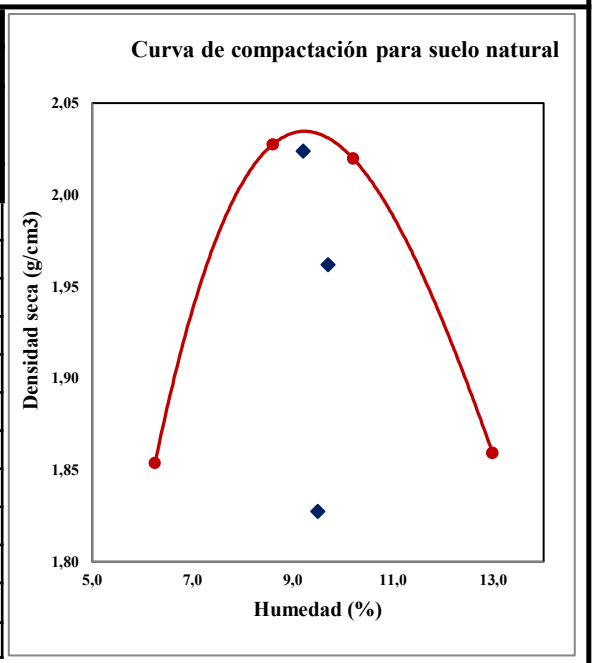
# Anexo 5. CBR suelos compactados en laboratorio para la cantera La Roca.

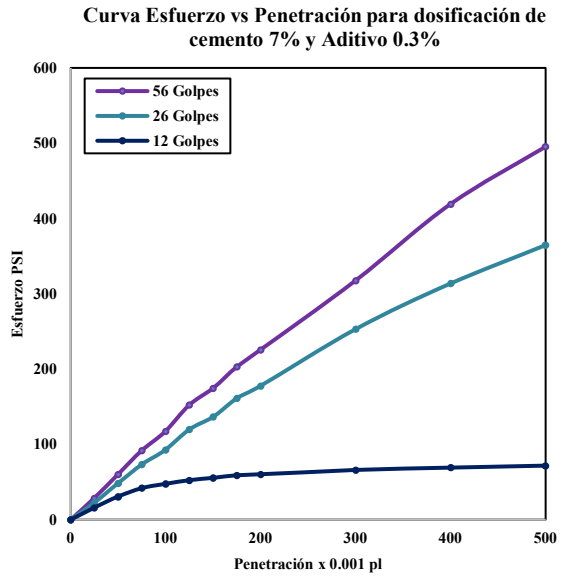
**UNIVERSIDAD DEL VALLE**
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA**
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

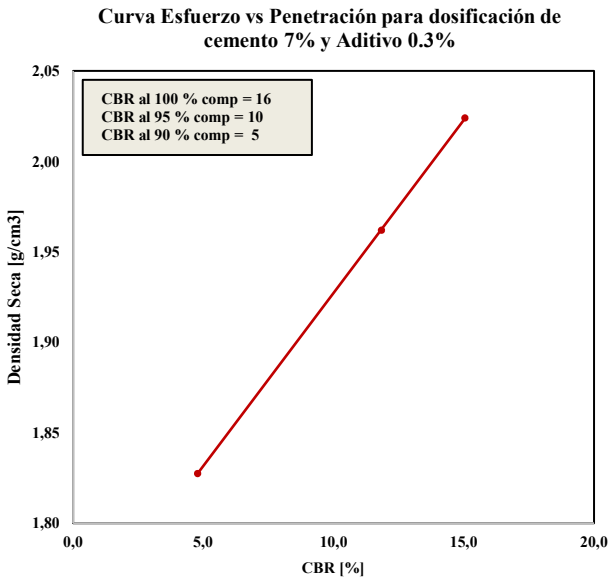
| | | | |
|---|---|---|---|
| **Proyecto** | | **Fecha:** | |
| **Localización:** | Cantera La Roca | **Fecha muestreo:** | 14-sep-24 |
| **Fuente:** | | **Muestra #** | 1 |
| **Descripción** | Suelo Roca Muerta | | |

## CBR SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO INV E 148 - 13

| Constante del anillo de carga | | | | 3,407 | *9,53* Lb/10$^{-4}$ pl | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 56 | 25 | 10 | 56 | 26 | 12 |
| **Penetración X 10$^{-3}$ pl** | **Lectura anillo de carga x 10$^{-4}$ pl.** | | | **ESFUERZO (PSI)** | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | *85,77* | *67,5* | *47,698* | 29 | 23 | 16 |
| 50 | *181,07* | *145,36* | *91,989* | 60 | 48 | 31 |
| 75 | *276,37* | *220,14* | *126,06* | 92 | 73 | 42 |
| 100 | *352,61* | *278,67* | *143,09* | 118 | 93 | 48 |
| 125 | *457,44* | *359,36* | *156,72* | 152 | 120 | 52 |
| 150 | *524,15* | *409,85* | *166,94* | 175 | 137 | 56 |
| 175 | *609,92* | *484,23* | *177,16* | 203 | 161 | 59 |
| 200 | *676,63* | *532,69* | *180,57* | 226 | 178 | 60 |
| 300 | *953* | *759,24* | *197,61* | 318 | 253 | 66 |
| 400 | *1258* | *941,25* | *207,83* | 419 | 314 | 69 |
| 500 | *1486,7* | *1094* | *214,64* | 496 | 365 | 72 |
| **CBR %** | | | | 15,0 | 11,8 | 4,8 |



# Anexo 6. CBR suelos compactados en laboratorio para la cantera cachibí.

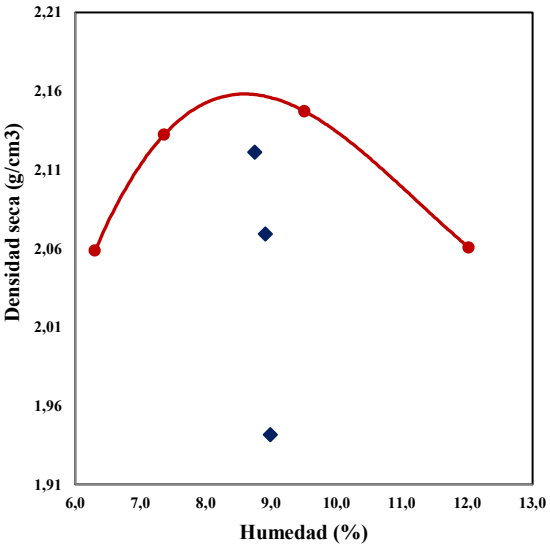
**UNIVERSIDAD DEL VALLE**
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA**
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Proyecto** | | **Fecha:** | |
| **Localización:** | Cantera CACHIBÍ | **Fecha muestreo:** | 13-sep-24 |
| **Fuente:** | | **Muestra #** | 1 |
| **Descripción** | Suelo Roca Muerta | | |

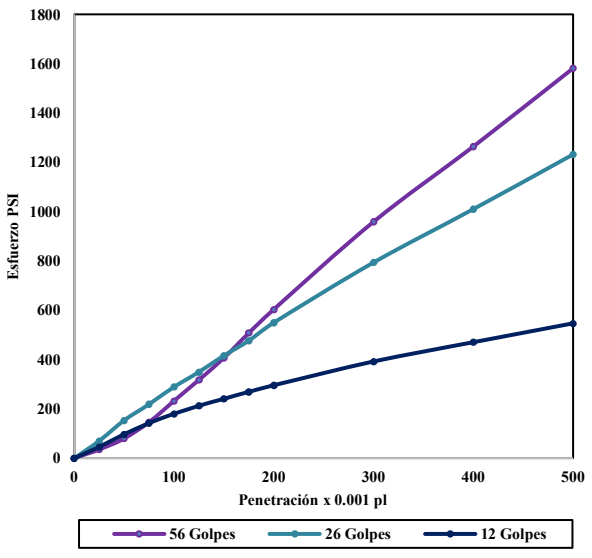
## CBR SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO INV E 148 - 13

| Constante del anillo de carga | | | | 3,407 | *9,53* Lb/10$^{-4}$ pl | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 56 | 25 | 10 | 56 | 26 | 12 |
| **Penetración X 10$^{-3}$ pl** | **Lectura anillo de carga x 10$^{-4}$ pl.** | | | **ESFUERZO (PSI)** | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 11 | 22 | 40 | 35 | 70 | 45 |
| 50 | 25 | 48 | 85 | 79 | 152 | 97 |
| 75 | 46 | 69 | 125 | 146 | 219 | 142 |
| 100 | 73 | 91 | 158 | 232 | 289 | 179 |
| 125 | 100 | 110 | 187 | 318 | 349 | 212 |
| 150 | 128 | 131 | 212 | 407 | 416 | 241 |
| 175 | 160 | 150 | 237 | 508 | 477 | 269 |
| 200 | 190 | 173 | 260 | 604 | 550 | 295 |
| 300 | 302 | 250 | 345 | 959 | 794 | 392 |
| 400 | 398 | 318 | 414 | 1264 | 1010 | 470 |
| 500 | 498 | 388 | 481 | 1582 | 1233 | 546 |
| **CBR %** | | | | 40 | 37 | 20 |

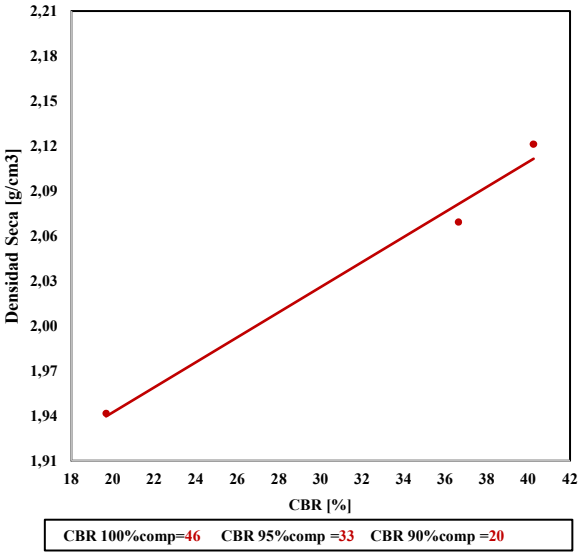
**Curva de compactación para suelo natural**




**Curva Esfuerzo vs Penetración para Suelo Natural**




**CBR de suelo natural para la cantera CACHIBÍ**



# CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO
# INV E 148



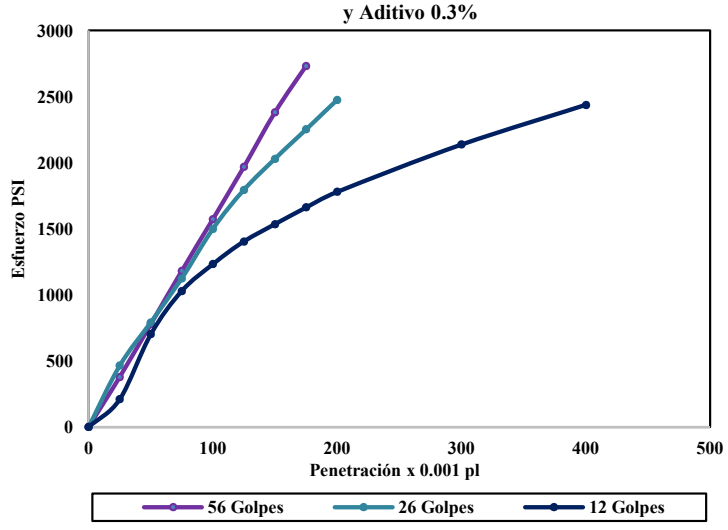
**CLIENTE:** **ORDEN No:** **C - 618**
**OBRA:**
**LOCALIZACION** Planta de agregados de Cachibí
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

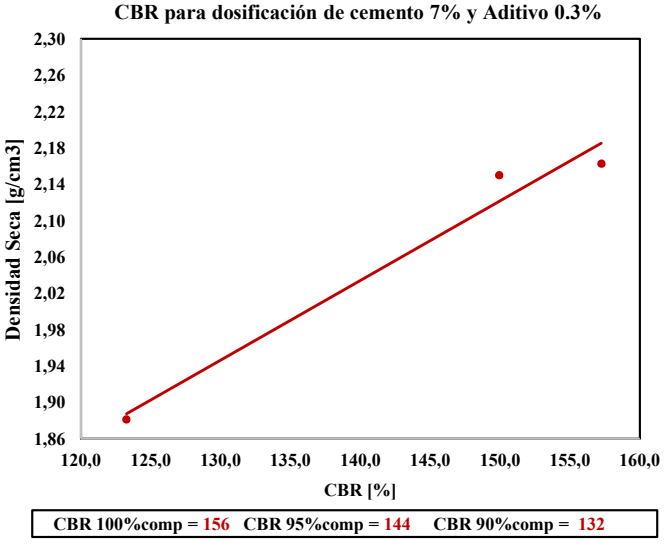
**DESCRIPCION MATERIAL:** Roca muerta con **7%** de cemento y **0.3%** de aditivo QI-BINDER **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN MUESTRA:**
**FECHA DE RECIBO:** 14-feb-2024 **FECHA DE ENSAYO:** 16-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** I **PROFUNDIDAD (m):** No definida

| *Penetración X 10$^{-3}$ pl* | *Carga (lb)* | | | *Esfuerzo (PSI)* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *56* | *26* | *12* | *56* | *26* | *12* |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 1134,1 | 1391,4 | 629,0 | 378,0 | 463,8 | 209,7 |
| 50 | 2334,9 | 2373,0 | 2106,1 | 778,3 | 791,0 | 702,0 |
| 75 | 3545,2 | 3373,6 | 3087,7 | 1181,7 | 1124,5 | 1029,2 |
| 100 | 4717,4 | 4498,2 | 3697,6 | 1572,5 | 1499,4 | 1232,5 |
| 125 | 5908,6 | 5384,5 | 4212,3 | 1969,5 | 1794,8 | 1404,1 |
| 150 | 7147,5 | 6089,7 | 4603,0 | 2382,5 | 2029,9 | 1534,3 |
| 175 | 8195,8 | 6756,8 | 4984,2 | 2731,9 | 2252,3 | 1661,4 |
| 200 | | 7423,9 | 5336,8 | | 2474,6 | 1778,9 |
| 300 | | | 6413,7 | | | 2137,9 |
| 400 | | | 7309,5 | | | 2436,5 |
| 500 | | | | | | |

**Testigos de humedad, muestra compactada**

| | 56 golpes | 26 golpes | 12 golpes |
|---|---|---|---|
| **P Rec+Mh [gr]** | 393,6 | 403,5 | 204,5 |
| **P Rec+Ms [gr]** | 365,5 | 357,5 | 189,5 |
| **Peso Rec [gr]** | 64,48 | 71,21 | 60,60 |
| **Humedad [%]** | **9,32** | **16,07** | **11,66** |
| **Densidad de la muestra Seca g/cm$^3$** | 2,16 | 2,15 | 1,88 |
| **CBR 0.1 pl [%]** | 157,2 | 149,9 | 123,3 |
| **CBR 0.2 pl [%]** | 0,0 | 165,0 | 118,6 |
| **CBR [%]** | 157,2 | 149,9 | 123,3 |




**CBR 100%comp = 156** **CBR 95%comp = 144** **CBR 90%comp = 132**

# CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO
# INV E 148



**CLIENTE:** **ORDEN No:** **C - 618**
**OBRA:**
**LOCALIZACION** Planta de agregados de Cachibí
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

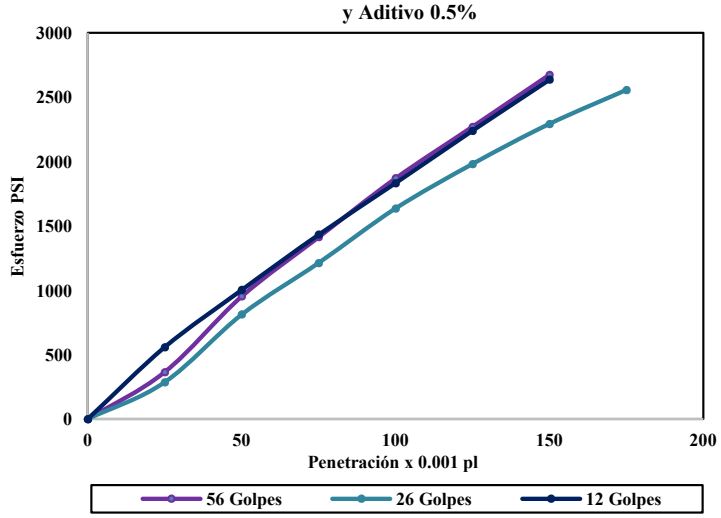
**DESCRIPCION MATERIAL:** Roca muerta con **7%** de cemento y **0.5%** de aditivo QI-BINDER **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN :**
**FECHA DE RECIBO:** 14-feb-2024 **FECHA DE ENSAYO:** 19-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** I **PROFUNDIDAD (m):** No definida

| *Penetración X 10$^{-3}$ pl* | *Carga (lb)* | | | *Esfuerzo (PSI)* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *56* | *26* | *12* | *56* | *26* | *12* |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 1096,0 | 1677,3 | 857,7 | 365,3 | 285,9 | 559,1 |
| 50 | 2859,0 | 3011,5 | 2439,7 | 953,0 | 813,2 | 1003,8 |
| 75 | 4240,9 | 4298,0 | 3640,5 | 1413,6 | 1213,5 | 1432,7 |
| 100 | 5613,2 | 5498,8 | 4908,0 | 1871,1 | 1636,0 | 1832,9 |
| 125 | 6814,0 | 6718,7 | 5946,7 | 2271,3 | 1982,2 | 2239,6 |
| 150 | 8024,3 | 7909,9 | 6880,7 | 2674,8 | 2293,6 | 2636,6 |
| 175 | | | 7671,7 | | 2557,2 | |
| 200 | | | | | | |
| 300 | | | | | | |
| 400 | | | | | | |
| 500 | | | | | | |

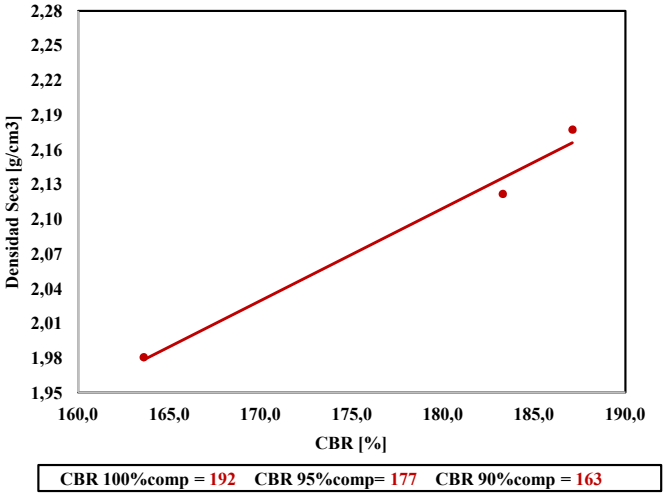
**Testigos de humedad, muestra compactada**

| | 56 golpes | 26 golpes | 12 golpes |
|---|---|---|---|
| **P Rec+Mh [gr]** | 954,0 | 242,5 | 378,5 |
| **P Rec+Ms [gr]** | 878,5 | 227,0 | 347,5 |
| **Peso Rec [gr]** | 134,50 | 65,50 | 57,50 |
| **Humedad [%]** | **10,15** | **9,60** | **10,69** |
| **Densidad de la muestra Seca g/cm$^3$** | 2,18 | 2,12 | 1,98 |
| **CBR 0.1 pl [%]** | 187,1 | 183,3 | 163,6 |
| **CBR 0.2 pl [%]** | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **CBR [%]** | 187,1 | 183,3 | 163,6 |

**Curva Esfuerzo vs Penetración para dosificación de cemento 7% y Aditivo 0.5%**




**CBR para dosificación de cemento 7% y Aditivo 0.5%**




**CBR 100%comp = 192 CBR 95%comp= 177 CBR 90%comp = 163**

# CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO
# INV E 148



**CLIENTE:** **ORDEN No:** **C - 618**
**OBRA:**
**LOCALIZACION :** Planta de agregados de Cachibí
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

**DESCRIPCION MATERIAL:** Roca muerta con 9**%** de cemento y **0.3%** de aditivo QI-BINDER **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN MUESTRA:**
**FECHA DE RECIBO:** 14-feb-2024 **FECHA DE ENSAYO:** 20-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** I **PROFUNDIDAD (m):** No definida

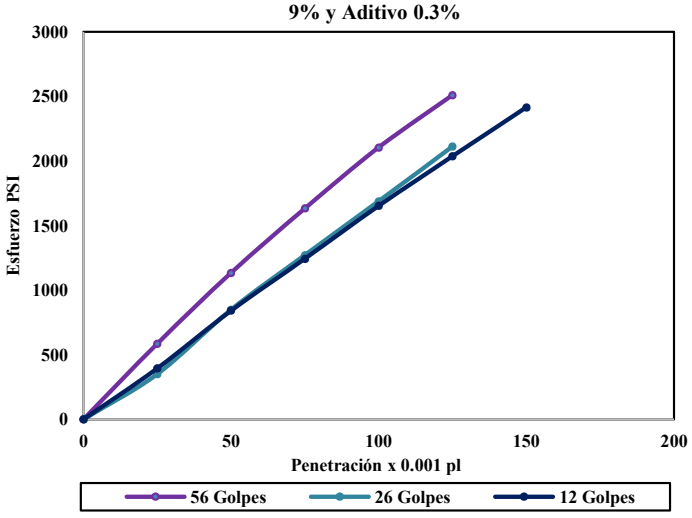
| *Penetración X 10 $^{-3}$ pl* | *Carga (lb)* | | | *Esfuerzo (PSI)* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *56* | *26* | *12* | *56* | *26* | *12* |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 1753,5 | 1048,3 | 1181,7 | 584,5 | 349,4 | 393,9 |
| 50 | 3402,2 | 2544,5 | 2525,5 | 1134,1 | 848,2 | 841,8 |
| 75 | 4898,4 | 3812,0 | 3726,2 | 1632,8 | 1270,7 | 1242,1 |
| 100 | 6308,9 | 5060,4 | 4955,6 | 2103,0 | 1686,8 | 1651,9 |
| 125 | 7528,7 | 6337,5 | 6108,7 | 2509,6 | 2112,5 | 2036,2 |
| 150 | | 7528,7 | 7242,8 | | | 2414,3 |
| 175 | | | | | | |
| 200 | | | | | | |
| 300 | | | | | | |
| 400 | | | | | | |
| 500 | | | | | | |

**Testigos de humedad, muestra compactada**

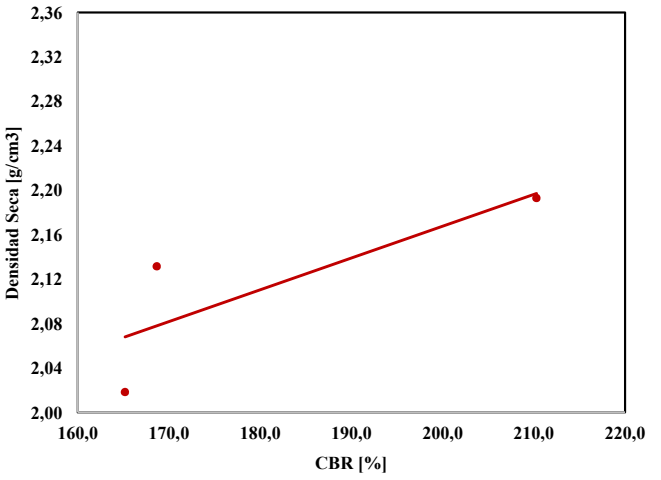
| | **56 golpes** | **26 golpes** | **12 golpes** |
|---|---|---|---|
| **P Rec+Mh [gr]** | 550,5 | 219,0 | 418,0 |
| **P Rec+Ms [gr]** | 504,0 | 201,5 | 382,5 |
| **Peso Rec [gr]** | 62,50 | 65,00 | 71,00 |
| **Humedad [%]** | **10,53** | **12,82** | **11,40** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Densidad de la muestra Seca g/cm$^3$** | 2,19 | 2,13 | 2,02 |
| **CBR 0.1 pl [%]** | 210,3 | 168,7 | 165,2 |
| **CBR 0.2 pl [%]** | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **CBR [%]** | 210,3 | 168,7 | 165,2 |

**Curva Esfuerzo vs Penetración para dosificación de cemento 9% y Aditivo 0.3%**




**CBR para dosificación de cemento 9% y Aditivo 0.3%**




**CBR 100%comp = 235 CBR 95%comp = 200 CBR 90%comp = 156**

# CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO
# INV E 148



**CLIENTE:** **ORDEN SERVICIO** C - 618
**OBRA:**
**LOCALIZACION OBI** Planta de agregados de Cachibí
**CONTRATISTA:**
**INTERVENTORIA:**

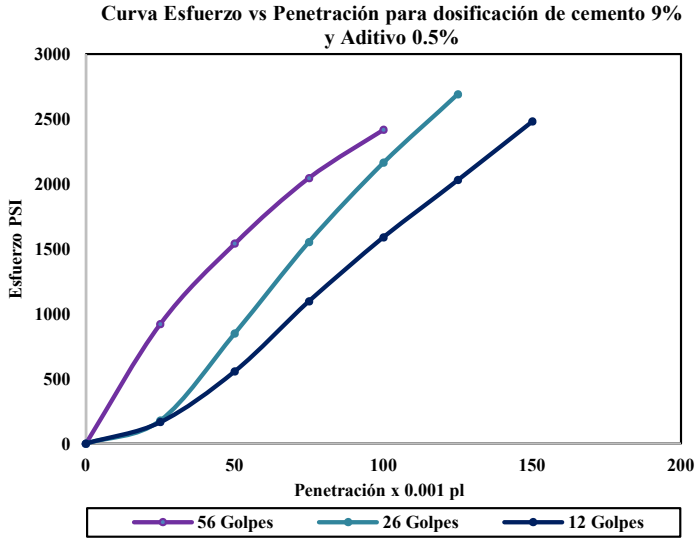
**DESCRIPCION MATERIAL:** Roca muerta con 9**%** de cemento y **0.5%** de aditivo QI-BINDER **FUENTE:**
**LOCALIZACIÓN DE LA MUES**
**FECHA DE RECIBO:** 14-feb-2024 **FECHA DE ENSAYO:** 23-sep-2024
**SECTOR #:** **MUESTRA N°:** I **PROFUNDIDAD (m):** No definida

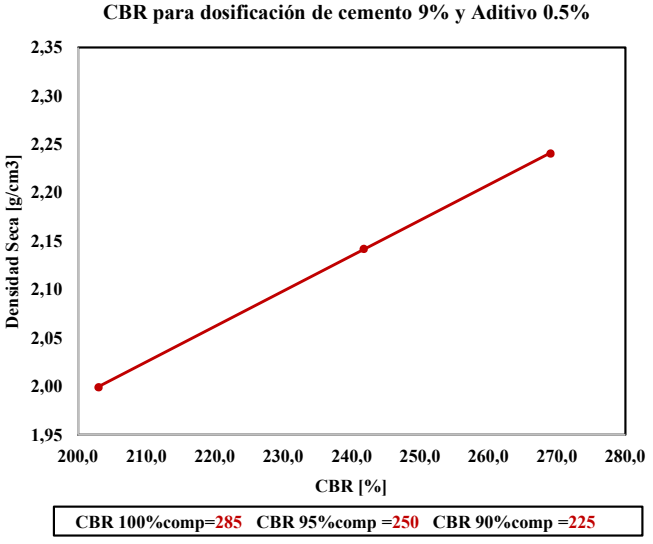
| *Penetración X 10$^{-3}$ pl* | *Carga (lb)* | | | *Esfuerzo (PSI)* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *56* | *26* | *12* | *56* | *26* | *12* |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 533,7 | 2763,7 | 495,6 | 921,2 | 177,9 | 165,2 |
| 50 | 2544,5 | 4622,1 | 1667,8 | 1540,7 | 848,2 | 555,9 |
| 75 | 4660,2 | 6137,3 | 3287,9 | 2045,8 | 1553,4 | 1096,0 |
| 100 | 6489,9 | 7252,3 | 4765,0 | 2417,4 | 2163,3 | 1588,3 |
| 125 | 8071,9 | | 6089,7 | | 2690,6 | 2029,9 |
| 150 | | | 7442,9 | | | 2481,0 |
| 175 | | | | | | |
| 200 | | | | | | |
| 300 | | | | | | |
| 400 | | | | | | |
| 500 | | | | | | |

**Testigos de humedad, muestra compactada**

| | 56 golpes | 26 golpes | 12 golpes |
|---|---|---|---|
| **P Rec+Mh [gr]** | 1136,5 | 371,0 | 596,5 |
| **P Rec+Ms [gr]** | 1024,0 | 329,0 | 548,5 |
| **Peso Rec [gr]** | 70,50 | 65,00 | 64,50 |
| **Humedad [%]** | **11,80** | **15,91** | **9,92** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Densidad de la muestra Seca g/cm$^3$** | 2,24 | 2,14 | 2,00 |
| **CBR 0.1 pl [%]** | 269,1 | 241,7 | 203,0 |
| **CBR 0.2 pl [%]** | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **CBR [%]** | 269,1 | 241,7 | 203,0 |



# Anexo 7. Resistencia a la compresión para la cantera La Roca.

| Resistencia a la compresión a 7 días para probetas de la cantera La Roca | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K del anillo 9.53 | Dosificación | | | | | |
| | C=7, A=0.3 | C=7, A=0.5 | C=9, A=0.3 | C=9, A=0.5 | C=9 | C=7 |
| Diametro (mm) | 101,97 | 103,61 | 101,86 | 103,02 | 102,27 | 103,30 |
| Altura (mm) | 116,08 | 119,39 | 117,34 | 119,45 | 116,38 | 119,96 |
| Area ($mm^2$) | 8167,01 | 8431,27 | 8148,87 | 8334,99 | 8215,13 | 8381,44 |
| Area (in2) | 12,66 | 13,07 | 12,63 | 12,92 | 12,73 | 12,99 |
| Volumen ($mm^3$) | 948053,80 | 1006637,97 | 956188,04 | 995641,85 | 956077,41 | 1005465,28 |
| Carga (Lbf) | 3449,86 | 3659,52 | 4622,05 | 4879,36 | 3183,02 | 3192,55 |
| Esfuerzo (PSI) | 272,53 | 280,03 | 365,94 | 377,68 | 249,97 | 245,75 |
| Esfuerzo (Mpa) | 1,88 | 1,93 | 2,52 | 2,60 | 1,72 | 1,69 |

| Resistencia a la compresión a 28 días para probetas de la cantera La Roca | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K del anillo 9.53 | Dosificación | | | | | |
| | C=7, A=0.3 | C=7, A=0.5 | C=9, A=0.3 | C=9, A=0.5 | C=9 | C=7 |
| Diametro (mm) | 103,33 | 102,37 | 103,32 | 102,18 | 102,00 | 103,23 |
| Altura (mm) | 118,02 | 116,64 | 120,21 | 116,73 | 117,35 | 118,15 |
| Area ($mm^2$) | 8385,77 | 8231,21 | 8384,14 | 8199,61 | 8171,28 | 8369,54 |
| Area (in2) | 13,00 | 12,76 | 13,00 | 12,71 | 12,67 | 12,97 |
| Volumen ($mm^3$) | 989716,06 | 960088,09 | 1007829,88 | 957113,46 | 958859,14 | 988840,56 |
| Carga (Lbf) | 3783,41 | 4136,02 | 4955,60 | 5203,38 | 4784,06 | 3697,64 |
| Esfuerzo (PSI) | 291,08 | 324,18 | 381,33 | 409,41 | 377,72 | 285,03 |
| Esfuerzo (Mpa) | 2,01 | 2,24 | 2,63 | 2,82 | 2,60 | 1,97 |

# Anexo 8. Resistencia a la compresión para la cantera Cachibí.

| Resistencia a la compresión a 7 días para probetas de la cantera Cachibí | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K del anillo 9.53 | Dosificación | | | | | |
| | C=7, A=0.3 | C=7, A=0.5 | C=9, A=0.3 | C=9, A=0.5 | C=7 | C=9 |
| Diametro (mm) | 103,33 | 102,37 | 103,32 | 102,18 | 103,293333 | 102,38 |
| Altura (mm) | 118,02 | 116,64 | 120,21 | 116,73 | 119,296667 | 116,67667 |
| Area ($mm^2$) | 8385,77 | 8231,21 | 8384,14 | 8199,61 | 8379,82 | 8232,28 |
| Area (in2) | 13,00 | 12,76 | 13,00 | 12,71 | 12,99 | 12,76 |
| Volumen ($mm^3$) | 989716,06 | 960088,09 | 1007829,88 | 957113,46 | 999684,08 | 960514,99 |
| Carga (Lbf) | 3240,20 | 3611,87 | 4860,30 | 5479,75 | 3049,60 | 3497,51 |
| Esfuerzo (PSI) | 249,29 | 283,10 | 374,00 | 431,16 | 234,79 | 274,10 |
| Esfuerzo (Mpa) | 1,72 | 1,95 | 2,58 | 2,97 | 1,62 | 1,89 |

| Resistencia a la compresión a 28 días para probetas de la cantera Cachibí | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K del anillo 9.53 | Dosificación | | | | | |
| | C=7, A=0.3 | C=7, A=0.5 | C=9, A=0.3 | C=9, A=0.5 | C=7 | C=9 |
| Diametro (mm) | 102,15 | 103,21 | 102,03 | 103,03 | 102,3125 | 103,19 |
| Altura (mm) | 117,04 | 120,66 | 117,44 | 117,83 | 117,065 | 117,4825 |
| Area ($mm^2$) | 8194,80 | 8366,84 | 8175,56 | 8337,14 | 8221,43 | 8363,06 |
| Area (in2) | 12,70 | 12,97 | 12,67 | 12,92 | 12,74 | 12,96 |
| Volumen ($mm^3$) | 959091,90 | 1009542,97 | 960110,00 | 982393,42 | 962441,51 | 982512,96 |
| Carga (Lbf) | 4574,40 | 5479,75 | 6242,15 | 6985,49 | 4383,80 | 5718,00 |
| Esfuerzo (PSI) | 360,13 | 422,54 | 492,59 | 540,56 | 344,01 | 441,11 |
| Esfuerzo (Mpa) | 2,48 | 2,91 | 3,40 | 3,73 | 2,37 | 3,04 |

# Anexo 9. Ficha técnica del aditivo QI-BINDER.

QUÍMICA INTELIGENTE | Construyendo un presente sostenible

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD:** **QI-BINDER**
Fecha de actualización: 07/03/2022 Versión: 3
Página: 1/6

## SECCIÓN 1: Identificación del producto y la empresa

Nombre del producto: QI-BINDER

Fórmula: Dispersión de polímeros sintéticos con reología controlada.

Uso del producto: Control de material particulado en vías sin pavimentar, mediante la penetración del producto, aglomeración del material fino y consolidación de una carpeta de rodadura con menor susceptibilidad a la humedad, cuando se aplica regularmente.

Proveedor: QI- QUIMICA INTELIGENTE SAS
Cra 3 # 2A-08 Zona Ind. Chimitá, Bucaramanga – Colombia.
info@quimicainteligente.com
Tel: 3167500103

## SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

Clasificación de la sustancia o de la mezcla: Clasificación SGA - No es una sustancia o mezcla peligrosa.

Elementos de la etiqueta: No es una sustancia o mezcla peligrosa.

Otros peligros: Ninguno conocido

## SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

| Nombre químico | No. CAS | Proporción |
|---|---|---|
| Mezcla de Polímeros | N/A | 15 - 25 % |
| Tensioactivos | N/A | 5 - 10% |
| Excipientes | N/A | 5 - 7% |

No hay ningún ingrediente adicional presente que, bajo el conocimiento actual del proveedor y en las concentraciones aplicables, sea clasificado como de riesgo para la salud o el medio ambiente, como PBT o mPmB o tenga asignado un límite de exposición laboral y por lo tanto deban ser reportados en esta sección.

# Anexo 9. Ficha técnica del aditivo QI-BINDER.

QUÍMICA INTELIGENTE | Construyendo un presente sostenible



## SECCIÓN 4. Primeros auxilios

| | |
|---|---|
| Recomendaciones generales: | Sin peligros que requieran medidas especiales de primeros auxilios. |
| Tras inhalación: | No tóxico. Trasladarse a un espacio abierto. |
| En caso de contacto con la piel: | El contacto con el producto no produce irritación en la piel. Lavar todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con abundante agua/ducharse, debido a que el producto es pegajoso. |
| Tras contacto con los ojos: | Aclarar inmediatamente con abundante agua hasta el retiro total del producto. |
| Tras ingestión: | Lavar la boca con agua y hacer beber agua (máximo 2 vasos), en caso de malestar consultar al médico. |

## SECCIÓN 5. Medidas de lucha contra incendios

| | |
|---|---|
| Punto de inflamación: | N/A |
| Medios de extinción apropiados: | Agua, Espuma, Dióxido de carbono (CO2), Polvo seco |
| Medios de extinción no apropiados: | No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla. |
| Productos de combustión peligrosos: | No se conocen productos de combustión peligrosos. |
| Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios: | En caso de fuego, protéjase con un equipo respiratorio autónomo. |

## SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental

No tocar o caminar sobre el material derramado. Recoger el producto derramado con material absorbente o lavar el área contaminada con abundante agua. El producto derramado es biodegradable y puede disponerse en el sistema de alcantarillado.

# Anexo 9. Ficha técnica del aditivo QI-BINDER.

QUÍMICA INTELIGENTE | Construyendo un presente sostenible



## SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento

| | |
|---|---|
| Consejos para una manipulación segura: | Utilizar botas, guantes y gafas de seguridad para protección contra salpicaduras. No fumar, no comer, ni beber durante la manipulación del producto. |
| Medidas de higiene: | Sustituir la ropa contaminada. Lavar manos al término del trabajo. |
| Condiciones de almacenamiento: | Consérvese bien cerrado para evitar evaporación y oxidación del producto. Almacenar en el envase original. En los casos en que se trasvase, asegurarse de la completa limpieza del recipiente que contendrá el producto para evitar reacciones indeseadas. |
| Reacciones peligrosas: | El producto es estable bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas. |
| Usos específicos finales: | Fuera de los usos indicados en la sección 1 no se previenen aplicaciones finales adicionales. |

## SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual

| | |
|---|---|
| Medidas higiénicas: | Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. No comer ni beber durante su utilización. No fumar durante su utilización. Lávense las manos antes de los descansos y después de terminar la jornada laboral. |
| Protección de los ojos/la Cara: | Equipo de protección ocular que cumpla con estándares aprobados debe ser utilizado cuando la evaluación del riesgo indica que es necesario. |
| Protección de las manos: | Deben emplearse guantes químico-resistentes e impermeables que cumplan con estándares aprobados cuando se manejen productos químicos. |
| Protección corporal: | Elegir la protección para el cuerpo según sus características, la concentración y la cantidad de sustancias peligrosas, y el lugar específico de trabajo. |
| Protección respiratoria: | No se requieren medidas especiales. |

# Anexo 9. Ficha técnica del aditivo QI-BINDER.

QUÍMICA INTELIGENTE | Construyendo un presente sostenible



## SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas

| | |
|---|---|
| Estado físico: | Líquido viscoso |
| Color: | Gris vison |
| Olor: | Característico |
| pH: | 7,0 ± 0,5 |
| Viscosidad: | 9.000 ± 1.000 cP |
| Punto de ebullición: | 100°C |
| Punto de inflamación: | N/A |
| Peso específico: | 1,0 – 1,1 |
| Inflamabilidad: | N/A |
| Solubilidad en agua: | 100% |

## SECCIÓN 10. Estabilidad y reactividad

| | |
|---|---|
| Estabilidad química: | El producto es químicamente estable bajo condiciones normales (a temperatura ambiental). El residuo de evaporación puede descomponerse a temperaturas superiores a 200°C |
| Posibilidad de reacciones peligrosas: | En condiciones normales de almacenamiento y uso, no se producen reacciones peligrosas |
| Condiciones que deben evitarse | Llamas y Fuerte calefacción (pérdidas por evaporación y gelado del producto por exposición prolongada a temperaturas encima de 80°C). |
| Productos de descomposición: | CO, $CO_2$, $H_2O$, ácidos orgánicos y aldehídos. |
| Materiales incompatibles: | N/A |

# Anexo 9. Ficha técnica del aditivo QI-BINDER.

QUÍMICA INTELIGENTE | Construyendo un presente sostenible



## SECCIÓN 11. Información toxicológica

| | |
|---|---|
| Toxicidad: | Producto no tóxico. |
| Inhalación: | Riesgo mínimo bajo condiciones ambientales. |
| Contacto con la piel: | Exposición prolongada puede causar irritación y/o resequedad en la piel. |
| Ingestión: | No hay información disponible |
| Toxicidad agua: | No hay información disponible |

## SECCIÓN 12. Información ecológica

| | |
|---|---|
| Biodegradabilidad: | Producido con componentes biodegradables. |
| Potencial de bioacumulación: | No hay información disponible. |
| Movilidad en el suelo: | No hay información disponible. |

## SECCIÓN 13. Consideraciones relativas a la eliminación

| | |
|---|---|
| Métodos para el tratamiento de residuos: | Los residuos deben eliminarse de acuerdo con normativas locales y nacionales. Deje los productos químicos en sus recipientes originales. No los mezcle con otros residuos para evitar reacciones indeseadas. |
| Envases: | Envases/embalajes totalmente vacíos pueden destinarse a reciclaje. QUIMICA INTELIGENTE recoge los recipientes sucios cada vez que lleva producto nuevo, con el fin de promover su adecuado manejo y reutilización. |

# Anexo 9. Ficha técnica del aditivo QI-BINDER.

QUÍMICA INTELIGENTE | Construyendo un presente sostenible



**SECCIÓN 14. Información relativa al transporte**

| | |
|---|---|
| Transporte terrestre (ADR/RID): | Producto no peligroso según los criterios de la reglamentación del transporte. |
| Transporte fluvial (ADN): | No relevante |
| Transporte aéreo (IATA): | Producto no peligroso según los criterios de la reglamentación del transporte. |
| Transporte marítimo (IMDG): | Producto no peligroso según los criterios de la reglamentación del transporte. |

**SECCIÓN 15. Información reglamentaria**

| | |
|---|---|
| Frases de riesgo: | R36/38 (irrita los ojos, irrita la piel) |
| Consejos de prudencia: | |
| S7 | Manténgase el recipiente bien cerrado |
| S26 | En caso de contacto con los ojos, lávense inmediata y abundantemente con agua y acúdase a un médico. |
| Categorías de peligro: | Xi – Irritante |

**SECCIÓN 16. Otra información**

Los datos suministrados en esta ficha de seguridad se basan en el actual conocimiento de QI – QUIMICA INTELIGENTE S.A.S. Describen tan sólo las medidas de seguridad en el manejo de éste producto y no representan una garantía sobre las propiedades descritas del mismo

# REFERENCIAS


[1] L. Narváez, "VÍAS TERCIARIAS: motor del desarrollo económico rural," *Revista de Ingeniería*, págs. 80-87, 2017.

[2] R. d. C. Pérez Collantes, "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos," 2012.

[3] Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVÍAS), *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008*, 2008. dirección: %5Curl%7Bhttps://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/proyectos-de-norma/11313-manual-de-diseno-geometrico-de-carreteras-2008/file%7D.

[4] J. Doe, "Vías terciarias: las grandes olvidadas," *La República*, 2023. dirección: https://www.larepublica.co/opinion/editorial/vias-terciarias-las-grandes-olvidadas-2829535.

[5] J. F. Rivera, A. M. Aguirre, R. M. de Gutiérrez y A. Orobio, "Estabilización química de suelos-Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)," *Informador técnico*, vol. 84, n.º 2, págs. 202-226, 2020.

[6] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino y E. M. Gartner, "Sustainable Development and Climate Change Initiatives," *Cement and Concrete Composites*, vol. 38, n.º 2, págs. 115-127, 2008. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008. dirección: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008.

[7] R. Andrew, "Global CO2 emissions from cement production," *Earth System Science Data*, págs. 1-52, 2017. DOI: 10.5281/zenodo.831455. dirección: https://doi.org/10.5281/zenodo.831455.

[8] Y. Kim y E. Worrell, "CO2 emission trends in the cement industry: An international comparison," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 7, n.º 2, págs. 115-133, 2002. DOI: 10.1023/A:1022857829028. dirección: https://doi.org/10.1023/A:1022857829028.

[9] H. Tremblay, J. Duchesne, J. Locat y S. Leroueil, "Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 39, n.º 3, págs. 535-546, 2002.

[10] M. Atarama, "Evaluación de la transitabilidad para caminos de bajo tránsito estabilizados con aditivo PROES," Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería Civil, 2015.

[11] J. Martínez Santos, "Evaluación del mejoramiento de suelos arcillosos empleando materiales cementantes," Tesis para optar el grado de Ingeniero Civil, Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Civil - Región Xalapa, México, 2012, pág. 122.

[12] *ESPECIFICACIONES INVÍAS - 2022 Capítulo 2 - EXPLANACIONES*, Documento técnico, Disponible en: https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/13330-art-237-22-estabilizacion-de-suelo-con-productos-quimicos-no-tradicionales/file.

[13] A. C. Leal Acosta, "La economía local creció 3.3 % en 2019 frente a 2018 y la suma total alcanzó $1.062 billones. El financiero también fue de los que más aportaron," *Bogotá*, 2020.

[14] A. Urrego, "La inversión en red vial terciaria llegó a $4,25 billones y ha generado 65.681 empleos," *Diario La República*, agosto de 2021. dirección: https://www.larepublica.co/economia/la-inversion-en-red-vial-terciaria-llego-a-4-25-billones-y-ha-generado-65-681-empleos-3214236.

[15] H. M. Choque Sánchez, "Evaluación de Aditivos Químicos en la Eficiencia de la Conservación de Superficies de Rodadura en Carreteras no Pavimentadas," 2012.

[16] A. Ávila. "Vías Terciarias en Colombia." Consultado el [Fecha de Consulta]. (2017), dirección: https://www.semana.com/opinion/articulo/ariel-avila-vias-terciarias-en-colombia/508627/.

[17] E. J. G. Zegarra Cordova, "Análisis comparativo técnico y económico entre el método tradicional y el uso de aditivo Proes en la construcción del pavimento en la carretera de acceso al Puerto de Santa, del Distrito de Santa-Provincia del Santa-Ancash-2018," 2021.

[18] M. A. Ravines Merino, "Tesis Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador," Tesis de mtría., Universidad de Piura, Piura, 2010.

[19] MTC, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Lima, 2013.

[20] T. W. Lambe, R. V. Whitman, J. A. J. Salas y J. M. R. Ortiz, *Mecánica de suelos*. Limusa, 1972, vol. 624.

[21] E. Juárez Badillo y A. Rico Rodríguez, *Mecánica de suelos*. México: 2005, 2005.

[22] J. E. Martínez Oliveros et al., "Predicción de fallas por escalonamiento en las estructuras pavimento rígido propuestas dentro del manual de diseño de pavimentos de concreto para bajos, medios y altos volúmenes de transito del INVIAS, empleando el modelos de deterioro de pavimentos rígidos NAPCOM.," 2017.

[23] R. Alfaro y A. Espinoza, "Caracterizacion geotecnica de suelos mediante ensayos de laboratorio," *Universidad Nacional del Altiplano Puno*, 2021.

[24] A. Casagrande, *Plasticity chart for the classification of cohesive soils*. Harvard University, 1948.

[25] K. Terzaghi, *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., 1943.

[26] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, 2010.

[27] T. W. Lambe y R. V. Whitman, *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, 1969.

[28] H. Urdanivia Roque, "Relación entre el tipo de suelo (SUCS y AASHTO) y el asentamiento de suelos para determinar asentamientos diferenciales en cimientos de concreto armado," 2019.

[29] J. E. Bowles, *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*, 2.ª ed. McGraw-Hill, 1981, pág. 72.

[30] M. D. Braja, "Fundamentos de ingeniería geotécnica," *Thomson y Learning*, vol. 580, 2001.

[31] M. T. DEL ENSAYO, "DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS DE LOS SUELOS INV E–123–13," *PROPUESTA DE GUÍA PARA EL LABORATORIO DE SUELOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA*, pág. 48,

[32] D. C. Bojacá Torres et al., "Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico," Tesis doct., Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2020.

[33] M. Fratelli, *Suelos, Fundaciones y Muros*. Caracas: s.n., 1993.

[34] C. Jurado y D. Clavijo, "Estabilización de suelos con cemento tipo MH para mejorar las características físicas y mecánicas del material de subsuelo de la zona de talleres y cocheras de la PLMQ, sector Quitumbe," *Estabilización de Suelos con Cemento Tipo MH para Mejorar las Características Físicas y Mecánicas del Material de Subsuelo de la Zona de Talleres y Cocheras de la PLMQ, Sector Quitumbe*, 2016.

[35] M. A. Sánchez Albán, "Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Cacical del cantón Tosagua provincia de Manabí," 2014.

[36] A. Larrea y L. Villalba, "Enzimas orgánicas de la estabilización de suelos, un aporte al desarrollo," Tesis, Facultad de Ingeniería, PUCE, Quito, Pichincha, Ecuador, 2000.

[37] M. A. Beltrán Parra y J. A. Copado Beltrán, *Estabilización de un Suelo Arcilloso con Cal Hidratada, Para Ser Utilizada Como Capa Subrasante de Pavimentos en la Colonia San Juan Caspitrano de ciudad Obregón*. Obregón: ASTM International, 2011.

[38] M. D. Vásquez Concha, "Pavimentos no tradicionales para carreteras de selva baja con bajo volumen de tránsito, aplicación: Carretera Contamana - Aguas Calientes, Loreto," 2010.

[39] A. Rico Rodríquez y H. Del Castillo, *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres 2: Carreteras, Ferrocarriles y Autopistas*. México: Limusa, 2012.

[40] A. Montejo Fonseca, *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*, 2.ª ed. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia, 2002, pág. 733.

[41] E. J. S. Rodríguez y E. A. P. González, "Análisis de los cambios en las propiedades mecánicas de materiales de subrasante por la adición de materiales poliméricos reciclados," *Ingeniería Solidaria*, vol. 15, n.º 1, págs. 1-23, 2019.

[42] T. López-Lara, J. B. Hernández-Zaragoza, J. Horta-Rangel, A. Coronado-Márquez y V. M. Castaño-Meneses, "Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas," *Revista Iberoamericana de polimeros*, vol. 11, n.º 3, págs. 159-168, 2010.

[43] D. Nesterenko Cortes, "Desempeño de suelos estabilizados con polímeros en Perú," en *I Congreso Internacional de Ingeniería y Dirección de Proyectos III Congreso Regional IPMA-LATNET*, Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería, 2019.

[44] B. A. Ñahuis Rios, "Estabilización de suelos con el uso de polímero sintético en la subrasante en la Av. Universitaria Carabayllo, Lima-2020," 2020.

[45] G. P. Ramos Hinojosa, "Mejoramiento de subrasantes de baja capacidad portante mediante el uso de polímeros reciclados en carreteras, Paucará Huancavelica 2014. Tema: Geotecnia Víal.," 2014.

[46] B. K. Cuipal Chávez, "Estabilización de la subrasante de suelo arcilloso con uso de polímero sintético en la carretera Chachapoyas–Huancas, Amazonas, 2018," 2018.

[47] K. E. Palomino Terán, "Capacidad portante (CBR) de un suelo arcilloso, con la incorporación del estabilizador MAXXSEAL 100," 2016.

[48] K. M. Contoguris Poma y M. A. Pasmiño Shahuano, "Estabilización de Suelos Finos mediante el uso del Polímero Polycom en Subrasantes para Caminos de Baja Transitabilidad en la Ciudad de Iquitos, 2020," 2022.

[49] J. A. H. Antonio, "Análisis Técnico y Económico para la Construcción de la Vía Terciaria Localizada en el Tramo entre K+000 y K 0+540 Vereda La Playa y el Corregimiento de Frías," Requisito parcial para optar al título de Especialista en Ingeniería de Pavimentos, Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Bogotá D.C., Colombia, 2023.

[50] P. C. Association, *Diseño Suelo-Cemento*, Accedido: 6 de noviembre de 2024, 2023. dirección: https://www.academia.edu/16338209/DISE%C3%91O_SUELO_CEMENTO.

[51] INVIAS, *Artículo 350: Especificación General de Construcción*, Accedido: 2024-11-07, 2022. dirección: https://www.scribd.com/document/700469647/Articulo-350-Especificacion-general-de-construccion-INVIAS-2022.

[52] J. A. Hernández Antonio, "Análisis Técnico y Económico para la Construcción de la Vía Terciaria Localizada en el Tramo entre K+000 y K 0+540 Vereda La Playa y el Corregimiento de Frías," español, Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia, 2023. dirección: https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/62a865a0-1b0f-452f-8b8c-d835ca6f3ae3/content.