



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

**Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión
caciónica de rompimiento lento, cal y cemento**

Alcides José Landinez Saurith

John Fredy Montenegro Ríos

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Infraestructura Vial
Bogotá, Colombia
2025**



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

**Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión
catiónica de rompimiento lento, cal y cemento**

Alcides José Landinez Saurith

John Fredy Montenegro Ríos

**Tesis presentada como requisito para optar al título de:
Magister en Infraestructura Vial**

Director:

Prof. Juan Miguel Sánchez Durán

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Infraestructura Vial
Bogotá, Colombia
2025**



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

Agradecimiento

Agradezco profundamente a Dios, fuente de inspiración y fortaleza, por haberme permitido llegar a este momento. También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, que ha sido mi roca durante esta etapa de mi vida, su apoyo incondicional ha sido fundamental para mí. A mi novia, por su amor y paciencia, gracias por estar siempre a mi lado. A mis conocidos y amigos, gracias por su apoyo y motivación. A todas las personas que han compartido sus experiencias y conocimientos conmigo, permitiéndome aprender y crecer, mi más sincero agradecimiento. Al ingeniero Juan Miguel Sánchez Durán director del trabajo de grado por habernos guiado en este proceso. Y a mí mismo, por no darme por vencido y seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

Finalmente, quiero hacer una mención especial a mi padre, quien, aunque no está físicamente presente, siempre estará en mi corazón y memoria. Su legado y enseñanzas han sido una fuente de inspiración y motivación para mí.

John Fredy Montenegro Ríos

A Dios por haberme guiado a lo largo de mi vida profesional, por bríndame la fortaleza, dedicación y constancia para lograr todas las metas propuestas. A mis padres y familiares por todo su apoyo paciencia y entrega en este largo camino, fueron de vital importancia para superar cada obstáculo y momento de debilidad. A mi esposa e hijo por ser ese apoyo incondicional; por creer en nuestros sueños.

Al ingeniero Juan Miguel Sánchez Durán por habernos guiado y ayudado en este proceso investigativo y poder finalizarlo exitosamente.

Alcides José Landinez Saurith



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y evaluación de una mezcla asfáltica modificada a partir de asfaltita natural con la incorporación de emulsión catiónica de rompimiento lento (CRL), cal y cemento, con el objetivo de desarrollar una solución vial más resistente y ambientalmente sostenible frente a las mezclas tradicionales, se caracterizó inicialmente mediante el método de extracción INV E-732-13, obteniendo contenidos de asfalto de 10.7%, 10.8% y 11.2%. A partir de estos resultados, se diseñaron mezclas con diferentes porcentajes de emulsión CRL (3% a 7%) y agregados pétreos, ajustando la curva granulométrica según especificaciones INVIAS. La determinación del contenido óptimo de emulsión (6%) se realizó mediante el ensayo de inmersión-compresión (INV E-622-13) obteniendo como resultado una resistencia conservada de 76,03% cumpliendo con lo exigido en la Tabla 442P-12 de las especificaciones del INVIAS. Posteriormente, se incorporaron diferentes proporciones de cal y cemento como estabilizantes, evaluando su efecto mediante el ensayo de tracción indirecta (INV E-725-13) para analizar la resistencia a la humedad. La mezcla con 6% de emulsión y 1.5% de cal alcanzó los mejores resultados en términos de cohesión y resistencia a la compresión, cumpliendo con el índice de resistencia conservada exigido por la normativa vigente, esta investigación demuestra que la adición combinada de cal mejora las propiedades de resistencia mecánica de la mezcla bajo condiciones húmedas. Se concluye que esta formulación representa una alternativa técnica para infraestructuras viales en zonas donde la explotación de asfaltita es factible, aportando a la sostenibilidad de los proyectos y al aprovechamiento de materiales locales.

Palabras clave: Asfalto natural, MAPIA, emulsión catiónica, Mezcla asfáltica, resistencia a la compresión, tracción indirecta, cal, cemento, sostenibilidad, INVIAS, diseño de mezclas.



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landínez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

**Design and Evaluation of a Natural Asphalt Mixture with the Addition of Slow-Setting
Cationic Emulsion, Lime, and Cement**

Abstract

This work presents the design and evaluation of a modified asphalt mixture based on natural asphaltite with the incorporation of slow-breaking cationic emulsion (CRL), lime, and cement. The goal is to develop a more resistant and environmentally sustainable road solution compared to traditional mixtures. Initially, it was characterized using the extraction method INV E-732-13, obtaining asphalt contents of 10.7%, 10.8%, and 11.2%. Based on these results, mixtures were designed with different percentages of CRL emulsion (3% to 7%) and stone aggregates, adjusting the granulometric curve according to INVIAS specifications. The determination of the optimal emulsion content (6%) was carried out through the immersion-compression test (INV E-622-13), resulting in a preserved resistance of 76.03%, meeting the requirements of Table 442P-12 of the INVIAS specifications. Subsequently, different proportions of lime and cement were incorporated as stabilizers, evaluating their effect through the indirect tensile test (INV E-725-13) to analyze resistance to moisture. The mixture with 6% emulsion and 1.5% lime achieved the best results in terms of cohesion and compressive strength, meeting the required preserved resistance index according to current regulations. This research demonstrates that the combined addition of lime improves the mechanical resistance properties of the mixture under humid conditions. It concludes that this formulation represents a technical alternative for road infrastructure in areas where the exploitation of asphaltite is feasible, contributing to the sustainability of projects and the use of local materials.

Keywords: Natural asphalt, MAPIA, cationic emulsion, asphalt mixture, compressive strength, indirect traction, lime, cement, sustainability, INVIAS, mixture design.



Índice

	Pág.
Resumen	4
Índice de figuras	7
Índice de tablas	8
Lista de símbolos y/o abreviaturas y/o acrónimos	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS.....	17
3.1 Objetivo general	17
3.2 Objetivos específicos	17
4. MARCO TEÓRICO.....	18
4.1 Propiedades del asfalto natural y sus limitaciones	18
4.2 Aportes individuales de emulsión cationica, cal y cemento	19
4.3 Efectos combinados de los aditivos en mezclas con asfaltita	23
4.4 Sostenibilidad e impacto técnico-económico de las mezclas modificadas	28
4.5 MARCO LEGAL	32
4.5.1 Normativa aplicable a infraestructura vial	32
4.6 Especificaciones técnicas para el diseño de mezclas asfálticas	35
4.7 Lineamientos técnicos aplicables	38
4.8 Relevancia Legal de los Aditivos en la Ingeniería de Pavimentos	39
5. ESTADO DEL ARTE.....	46
6. METODOLOGÍA	58
6.1 Preparación de las muestras	59
6.2 Condiciones de curado	59
6.3 Número de repeticiones	59
6.4 Justificación de los porcentajes de aditivos	60
6.5 Procedimientos de ensayo	60
6.6 Secuencia experimental	60
7. RESULTADOS.....	61
7.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	61
7.1.1 EMULSIÓN ASFÁLTICA	61
7.1.2 ASFALTITA (ASFALTO NATURAL)	62
7.2 DISEÑO DE MEZCLA CON EL MÉTODO DE ENSAYO INMERSIÓN – COMPRENSIÓN	68
7.3 ADICIÓN DE CONGLOMERANTES	81
7.4 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA.....	84



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

7.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	93
8.	DISCUSIÓN	97
8.1	CONCLUSIONES	99
8.2	TRABAJOS FUTUROS	101
9.	BIBLIOGRAFÍA	102
	ANEXO	105

Índice de figuras

	Pág.
Ilustración 1. Franjas granulométricas de los agregados	63
Ilustración 2. Curva granulométrica muestra N° 1	64
Ilustración 3. Curva granulométrica muestra N° 2	65
Ilustración 4. Curva granulométrica muestra N° 3	66
Ilustración 5. Curva granulométrica Asfaltita natural	67
Ilustración 6. Curva granulométrica mezcla con adición del 3% de emulsión asfáltica	69
Ilustración 7. Curva granulométrica mezcla con adición del 4% de emulsión asfáltica	71
Ilustración 8. Curva granulométrica mezcla con adición del 5% de emulsión asfáltica	73
Ilustración 9. Curva granulométrica mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica	75
Ilustración 10. Curva granulométrica mezcla con adición del 7% de emulsión asfáltica	77
Ilustración 11. Porcentaje de emulsión vs resistencia a la compresión simple para las probetas curadas en seco.	79
Ilustración 12. Porcentaje de emulsión vs resistencia a la compresión simple para las probetas sometidas a inmersión	80
Ilustración 13. Porcentaje de emulsión vs resistencia conservada	80
Ilustración 14. Resultado ensayo Inmersión - Compresión	94
Ilustración 15. Resultado ensayo Inmersión – Compresión de la mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.	96
Ilustración 16. Resultado ensayo de Tracción indirecta de la mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.	97



Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1. Efectos combinados de los aditivos en mezclas con asfaltita	27
Tabla 2. Referentes normativos del estudio	45
Tabla 3. Comparativa técnica de investigaciones sobre aditivos en mezclas asfálticas	50
Tabla 4. Especificaciones emulsión asfáltica	61
Tabla 5. Tamaño de la muestra según norma INV. E-732.....	62
Tabla 6. Franjas granulométricas de los agregados combinados para la construcción de capas asfálticas con una mezcla asfáltica natural.....	63
Tabla 7. Franjas granulométricas para una MAN-19	63
Tabla 8. Análisis granulométrico INV-782/13 de la muestra N°1	64
Tabla 9. Análisis granulométrico INV-782/13 de la muestra N°2	65
Tabla 10. Análisis granulométrico INV-782/13 de la muestra N°3	66
Tabla 11. Curvas granulométricas Especificación INVIAS y Asfaltita	67
Tabla 12. Elaboración de mezcla con adición de 3% de emulsión.	69
Tabla 13. Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 3% de emulsión.	69
Tabla 14. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 3% de emulsión asfáltica.	70
Tabla 15. Elaboración de mezcla con adición de 4% de emulsión.	71
Tabla 16. Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 4% de emulsión.	71
Tabla 17. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 4% de emulsión asfáltica.	72
Tabla 18. Elaboración de mezcla con adición de 5% de emulsión.	73
Tabla 19. Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 5% de emulsión.	73
Tabla 20. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 5% de emulsión asfáltica.	74
Tabla 21. Elaboración de mezcla con adición de 6% de emulsión.	75
Tabla 22. Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 6% de emulsión.	75
Tabla 23. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 6% de emulsión asfáltica.	76
Tabla 24. Elaboración de mezcla con adición de 7% de emulsión.	77
Tabla 25. Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 7% de emulsión.	77
Tabla 26. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 7% de emulsión asfáltica.	78
Tabla 27. Criterios de resistencia para la determinación del contenido óptimo de ligante	79
Tabla 28. Resultados obtenidos variando el porcentaje de asfalto	79
Tabla 29. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 6% de emulsión asfáltica y 1,5% de Cemento.....	81
Tabla 30. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 6% de emulsión asfáltica y 1,5% de Cal.....	82



Tabla 31. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 6% de emulsión asfáltica, 0,75% de Cemento y 0,75% de Cal.	83
Tabla 32. Resultados obtenidos con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.	84
Tabla 33. Elaboración de Briquetas ensayo de tracción indirecta para la mezcla de Asfaltita sin adiciones.	85
Tabla 34. Saturación parcial de las probetas Mezcla asfáltica sin adiciones.	85
Tabla 35. Saturación de las probetas Mezcla asfáltica sin adiciones.	86
Tabla 36. Resistencia a la tensión probetas con mezcla de asfaltita.	86
Tabla 37. Elaboración de Briquetas ensayo de tracción indirecta para la mezcla de Asfaltita con 1,5% de cemento.	87
Tabla 38. Saturación parcial de las probetas Mezcla asfáltica con 1,5% de cemento.	87
Tabla 39. Saturación de las probetas Mezcla asfáltica con 1,5% de cemento.	88
Tabla 40. Resistencia a la tensión probetas mezcla de asfaltita con 1,5% de cemento.	88
Tabla 41. Elaboración de Briquetas ensayo de tracción indirecta para la mezcla de Asfaltita con 1,5% de cal.	89
Tabla 42. Saturación parcial de las probetas Mezcla asfáltica con 1,5% de Cal.	89
Tabla 43. Saturación de las probetas Mezcla asfáltica con 1,5% de Cal.	90
Tabla 44. Resistencia a la tensión probetas en seco mezcla de asfaltita con 1,5% de Cal.	90
Tabla 45. Elaboración de Briquetas ensayo de tracción indirecta para la mezcla de Asfaltita con 0,75% de Cemento + 0,75 Cal.	91
Tabla 46. Saturación parcial de las probetas Mezcla asfáltica con 0,75% de Cemento + 0,75 Cal.	91
Tabla 47. Saturación de las probetas Mezcla asfáltica con 0,75% de Cemento + 0,75% Cal.	92
Tabla 48. Resistencia a la tensión probetas mezcla asfáltica con 0,75% de Cemento + 0,75% Cal.	92
Tabla 49. Resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta, Mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.	93
Tabla 50. Resultados ensayo de inmersión-compresión obtenidos variando el porcentaje de asfalto	94
Tabla 51. Resultados obtenidos de los ensayos inmersión-compresión de la mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.	95
Tabla 52. Resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta, Mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.	96

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

Lista de símbolos y/o abreviaturas y/o acrónimos

INVIAS: Instituto Nacional de Vías

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.

NTC: Normas Técnicas Colombianas.

MAPIA: Material Pétreo Impregnado de Asfalto

RTH: Resistencia promedio a la tensión de probetas acondicionadas en agua.

RTS: Resistencia promedio a la tensión de probetas en seco.

PNVIR: Plan Nacional de Vías para la Integración Regional



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landínez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño y evaluación de mezclas asfálticas es un proceso fundamental en la ingeniería civil, dado su impacto directo en la vida útil, resistencia estructural y sostenibilidad de las infraestructuras viales. Las mezclas asfálticas constituyen la base estructural de carreteras, autopistas y demás superficies de tráfico, y su comportamiento bajo condiciones de carga y clima es determinante para garantizar la seguridad y funcionalidad del sistema vial. En este contexto, el uso de materiales locales como el asfalto natural o asfaltita ha captado la atención de investigadores y autoridades viales, especialmente en países con depósitos naturales accesibles como Colombia (Arimilli, 2016)

El asfalto natural, también denominado mezcla asfáltica natural (MAN) por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS (artículo 442P-17), se caracteriza por estar compuesto por agregados pétreos impregnados naturalmente con betunes pesados. Su utilización en regiones específicas del país representa una oportunidad de reducción de costos logísticos y de fomento al aprovechamiento de recursos autóctonos (Rondón & Reyes, 2022). No obstante, múltiples estudios han identificado limitaciones técnicas importantes en este tipo de material, entre ellas: baja cohesión interna, elevada susceptibilidad a la humedad y deformación plástica significativa cuando se expone a cargas repetitivas (Matos & Silva, 2019; García & Pérez, 2018). Estas deficiencias estructurales se traducen en pavimentos con alto índice de deterioro prematuro, lo que incrementa los costos de mantenimiento, disminuye la seguridad vial y afecta negativamente la eficiencia del transporte.

En respuesta a estas limitaciones, la comunidad científica ha explorado la incorporación de aditivos modificadores como una estrategia para optimizar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Entre las alternativas más destacadas se encuentran las emulsiones catiónicas de rompimiento lento (CRL), la cal y el cemento. Las emulsiones CRL favorecen la adhesión entre el asfalto y los agregados minerales, mejorando la cohesión y resistencia a la humedad, especialmente en zonas de alta pluviosidad o con ciclos de congelación y deshielo (Chen et al., 2020). La cal, ampliamente utilizada como estabilizador químico, actúa sobre los minerales presentes en los agregados, incrementando la resistencia a la deformación y disminuyendo la permeabilidad de la mezcla (Pérez et al., 2018). Por su parte, el cemento cumple una función hidráulica que refuerza la rigidez de la mezcla, mejorando la resistencia a la fatiga y al envejecimiento térmico (Zhu & Wang, 2018; Liu et al., 2020).

A pesar de la evidencia positiva asociada al uso individual de estos aditivos en mezclas asfálticas tradicionales, existen pocos estudios que analicen de manera conjunta su efecto sobre mezclas formuladas con asfaltita. Esta falta de investigación sistemática representa una brecha de conocimiento relevante, más aún considerando que el comportamiento del asfalto natural podría beneficiarse significativamente de una formulación sinérgica de aditivos, orientada a superar sus debilidades inherentes (Bacca & Piragauta, 2015)

El presente trabajo propone el diseño y evaluación de una mezcla asfáltica de asfaltita natural con la adición de emulsión catiónica CRL, cal y cemento, con el objetivo de mejorar su resistencia a la compresión, su comportamiento frente a la humedad y su cohesión estructural. Para tal fin, se aplicará una metodología experimental bajo normas INVIAS (INV E-622-13 e INV E-725-13), que permitirá evaluar el desempeño mecánico de diferentes formulaciones en condiciones controladas de laboratorio. Las proporciones de aditivos se ajustarán con base en resultados obtenidos a través de ensayos de tracción indirecta e inmersión-compresión, los cuales permiten simular escenarios de servicio reales y observar el comportamiento de las mezclas frente a agentes destructivos como el agua o las cargas dinámicas.

La necesidad de esta investigación se justifica no solo por las limitaciones técnicas del asfalto natural, sino también por los datos alarmantes sobre el estado de las vías en Colombia. Según el INVIAS (2021), más del 40% de las carreteras pavimentadas en el país requieren intervenciones frecuentes debido a fallos en las mezclas utilizadas, en especial aquellas expuestas a condiciones climáticas adversas. Adicionalmente, el costo anual de mantenimiento vial en Colombia asciende a cifras superiores a los 5 billones de pesos (Ministerio de Transporte, 2022), reflejando la urgencia de implementar soluciones que prolonguen la vida útil de los pavimentos y reduzcan el impacto financiero de las intervenciones. En este sentido, adoptar tecnologías que mejoren las mezclas con materiales disponibles localmente podría generar beneficios tanto económicos como ambientales.

Asimismo, diversos estudios internacionales refuerzan la importancia de este enfoque. Fernández et al. (2017), en un experimento desarrollado por la Universidad Politécnica de Madrid, observaron una mejora del 25% en la adherencia entre agregados tras la adición de emulsión catiónica. González y Pérez (2019), en un estudio comparativo, reportaron un incremento del 15% en la resistencia a la tracción con la adición de cal, mientras que Kim & Lee

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

(2020) demostraron una mejora del 18% en la estabilidad estructural de pavimentos en climas tropicales mediante el uso combinado de cal y cemento.

A pesar de estos avances, los estudios previos se centran mayoritariamente en mezclas convencionales con asfaltos modificados de tipo industrial, sin considerar las características específicas de la asfaltita. Esta investigación busca cerrar esa brecha, generando conocimiento aplicado sobre cómo mejorar el desempeño del asfalto natural mediante aditivos complementarios. En consecuencia, el desarrollo de este estudio tiene el potencial de transformar la manera en que se aprovechan los recursos naturales disponibles, optimizando mezclas asfálticas más sostenibles y resistentes, especialmente en zonas rurales o de difícil acceso donde la asfaltita representa una fuente abundante pero poco explotada técnicamente.

2. JUSTIFICACIÓN

En la ingeniería vial, la durabilidad y el rendimiento de las mezclas asfálticas son factores determinantes para la calidad y vida útil de las infraestructuras viales. Estas propiedades son críticas no solo para la funcionalidad de las carreteras, sino también para la seguridad de los usuarios y la eficiencia operativa de los sistemas de transporte. En diferentes departamentos del país como Tolima, Caquetá y Meta, el asfalto natural es una materia prima abundante, existe un desafío constante para optimizar sus propiedades y adaptarlas a las exigencias cada vez más estrictas de la industria moderna. No obstante, a pesar de sus ventajas en términos de disponibilidad y coste, el asfalto natural en su estado puro presenta limitaciones significativas.

En comparación con las mezclas asfálticas tradicionales, el asfalto natural tiende a manifestar baja cohesión interna, elevada susceptibilidad a la humedad y deformación plástica significativa cuando se expone a cargas repetitivas (Matos & Silva, 2019; García & Pérez, 2018). Estas propiedades limitan su aplicación en condiciones climáticas exigentes y entornos de tráfico intenso, donde las exigencias estructurales requieren materiales con mayor estabilidad. Ante estas restricciones, surge la necesidad de incorporar aditivos que puedan mejorar las propiedades físicas y mecánicas del material para que este sea competitivo frente a otras tecnologías de pavimentación utilizadas en la actualidad.

La búsqueda de soluciones que permitan modificar favorablemente el desempeño del asfalto natural ha orientado investigaciones recientes hacia la inclusión de emulsiones catiónicas, cal y

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

cemento. La selección de estos aditivos responde a su potencial para mejorar la adhesión entre agregados, aumentar la resistencia a la humedad y reforzar la integridad del material bajo esfuerzos prolongados.

El planteamiento técnico de esta propuesta considera la posibilidad de desarrollar mezclas con comportamiento mecánico más favorable frente a condiciones de humedad y cargas dinámicas, sin recurrir a materiales sintéticos de alto costo. Esta línea de estudio se justifica también por la demanda creciente de alternativas que promuevan el uso racional de los recursos disponibles a nivel local. Dada la abundancia de asfaltita en ciertas regiones del país, se plantea como una oportunidad la optimización de sus propiedades mediante procesos de estabilización con agentes comúnmente utilizados en la ingeniería vial, reduciendo la dependencia de insumos importados y fortaleciendo la autonomía regional en proyectos de infraestructura.

En este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye la adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento en las propiedades mecánicas y de durabilidad de una mezcla de asfalto natural? Esta interrogante orienta el desarrollo del estudio y permite indagar hasta qué punto estos aditivos pueden optimizar el comportamiento del asfalto natural, configurándose como una opción técnicamente sólida y competitiva para la construcción de pavimentos más resistentes y con menor impacto ambiental.

A partir de esta pregunta, se identifican aspectos específicos que deben explorarse, tales como la proporción más adecuada de cada componente y su influencia en la cohesión, resistencia a la humedad y comportamiento estructural. De igual forma, se proyecta una caracterización de las propiedades alcanzadas con el propósito de comparar el rendimiento de las formulaciones frente a criterios de diseño establecidos por la normativa vigente.

La evaluación propuesta se desarrolla dentro de un marco experimental controlado, siguiendo procedimientos validados en la ingeniería de pavimentos. Se contempla el análisis de los efectos individuales y combinados de los aditivos, empleando métodos como el ensayo de tracción indirecta y la prueba de inmersión-compresión, que permiten observar la capacidad de la mezcla para resistir condiciones adversas. Los resultados obtenidos permitirán describir la respuesta mecánica de las formulaciones y su posible aplicación en entornos donde se requiere mayor durabilidad sin incrementar significativamente los costos de producción.



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

En ese sentido, el estudio se orienta hacia la formulación de mezclas que puedan integrarse en proyectos de infraestructura vial, tomando como base el uso de materiales regionales y métodos accesibles para su procesamiento. Las características de la asfaltita, combinadas con técnicas de modificación estabilizante, ofrecen una oportunidad para repensar la aplicación de este recurso desde una perspectiva técnica que considere tanto las condiciones del entorno como las exigencias del tránsito vehicular. Un estudio realizado por Fernández y colaboradores (2017) en la Universidad Politécnica de Madrid, encontró que la adición de emulsión catiónica en mezclas asfálticas mejoraba la adhesión en un 25%, reduciendo significativamente el desgaste por acción del agua. Del mismo modo, González y Pérez (2019) demostraron que la adición de cal en las mezclas incrementaba la resistencia a la tracción indirecta en un 15%, lo que implica una mejora en la resistencia general del pavimento a las fuerzas de deformación.

Datos recientes del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y otros organismos internacionales indican que el deterioro prematuro de las carreteras es una problemática recurrente, con un alto costo económico y social. En Colombia, por ejemplo, se estima que más del 40% de las carreteras pavimentadas requieren intervenciones frecuentes debido a fallos en las mezclas asfálticas utilizadas, lo que refleja la necesidad de explorar y adoptar nuevas tecnologías que puedan extender la vida útil de los pavimentos. A nivel mundial, la situación es similar, con miles de kilómetros de carreteras en condiciones subóptimas que requieren constantes reparaciones, lo que afecta negativamente el flujo de tráfico, incrementa los tiempos de desplazamiento y aumenta los costos operativos tanto para el sector público como para los usuarios.

El Banco Mundial estima que, en América Latina, el costo de la infraestructura vial representa entre el 1% y el 3% del PIB anual, siendo una proporción significativa de los presupuestos nacionales. Sin embargo, la ineficiencia en el uso de materiales y la falta de innovación en las técnicas de construcción a menudo resultan en carreteras que fallan prematuramente. En Colombia, la inversión en carreteras fue de aproximadamente 5.4 billones de pesos en 2022, con una gran parte destinada al mantenimiento de las existentes debido a su rápida degradación.

En Colombia, por ejemplo, el costo anual de mantenimiento de carreteras asciende a miles de millones de pesos, y gran parte de este gasto se debe a la necesidad de reparar pavimentos que han fallado prematuramente debido a la baja calidad de las mezclas asfálticas utilizadas. La

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

adopción de mezclas mejoradas, como las que se proponen en este estudio, podría reducir estos costos de manera significativa, liberando recursos para otras inversiones en infraestructura.

La calidad de las carreteras afecta directamente la seguridad vial, la eficiencia del transporte y la conectividad entre regiones. Carreteras mal mantenidas o en mal estado son responsables de un alto porcentaje de accidentes de tráfico, lo que tiene consecuencias devastadoras tanto en términos de vidas perdidas como de costos económicos asociados con los accidentes. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), los accidentes de tráfico representan una de las principales causas de muerte a nivel mundial, y un mantenimiento deficiente de las carreteras es un factor clave en muchos de estos incidentes.

Un informe de la Fundación de Seguridad Vial en Colombia (2021) reveló que el 20% de los accidentes fatales en el país se atribuyen a condiciones de la carretera, subrayando la importancia de mejorar la infraestructura vial para proteger vidas y reducir los costos asociados con los accidentes de tráfico.

La literatura existente apoya firmemente la idea de que la modificación de mezclas asfálticas con aditivos puede mejorar significativamente sus propiedades. Estudios realizados en diferentes partes del mundo han demostrado que la adición de emulsiones catiónicas, cal y cemento puede resultar en mezclas más resistentes y duraderas. Por ejemplo, Chen et al. (2020) en un estudio publicado en *Construction and Building Materials* encontró que las mezclas asfálticas modificadas con emulsiones catiónicas presentaban un 30% menos de deformación plástica comparado con mezclas tradicionales

Otro estudio relevante es el de Zhu y Wang (2018), que destacó que la incorporación de cemento en las mezclas asfálticas aumentó la resistencia a la fatiga en un 20%, para carreteras con tráfico pesado. Estas investigaciones muestran un consenso en la comunidad científica sobre los beneficios de modificar las mezclas asfálticas con aditivos específicos para mejorar su rendimiento.

Las principales desventajas del asfalto natural se pueden agrupar en tres categorías: baja cohesión, alta susceptibilidad a la humedad y envejecimiento prematuro. Estas características

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

afectan negativamente la durabilidad de los pavimentos contruidos con asfalto natural, reduciendo su vida útil y aumentando los costos de mantenimiento (García & Pérez, 2018). En este contexto, surge la necesidad de modificar el asfalto natural mediante aditivos que mejoren sus propiedades mecánicas y de durabilidad, una práctica que ha sido explorada en la última década con resultados prometedores.

La justificación de este trabajo se basa en la necesidad de un problema en la ingeniería vial mediante la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que puedan mejorar la calidad y durabilidad de los pavimentos. Al combinar teoría y práctica, este trabajo ofrece una respuesta bien fundamentada y respaldada por la literatura y los datos estadísticos, convenciendo a los lectores de la importancia del problema y del valor de la solución propuesta.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar una mezcla asfáltica con asfalto natural, emulsión CRL, cal y cemento con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el asfalto natural extraído de la mina, la emulsión asfáltica y el material granular requerido para el diseño de la mezcla, teniendo en cuenta las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS.
- Determinar las proporciones óptimas de emulsión catiónica de rompimiento lento, en la mezcla de asfalto natural mediante un diseño experimental en laboratorio.
- Evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas modificadas mediante ensayos estándar de resistencia a la compresión y tracción indirecta.

- Analizar el aporte generado por los materiales adicionados a la mezcla asfáltica diseñada, y realizar recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas al tema.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Propiedades del asfalto natural y sus limitaciones

El empleo de materiales bituminosos de origen natural en obras de infraestructura vial cuenta con una larga trayectoria, han sido ampliamente aprovechados en la formulación de mezclas asfálticas, especialmente en regiones con depósitos naturales accesibles. Este material bituminoso es una fuente natural de hidrocarburos pesados que, cuando se mezcla con agregados pétreos, forma una mezcla asfáltica. Sin embargo, a pesar de su utilidad, el asfalto natural presenta ciertas limitaciones, como su susceptibilidad a la deformación bajo cargas repetitivas y su baja resistencia al agua, lo que lo hace menos adecuado para entornos de tráfico intenso y condiciones climáticas adversas (Matos & Silva, 2019).

En Colombia existen múltiples fuentes de explotación de este tipo de material de origen natural. Algunas veces se conocen como materiales pétreos impregnados con asfalto (MAPIA), pero la especificación Colombiana INVIAS (artículo 442P-17) la denota como mezcla asfáltica natural (MAN) (Rondón & Reyes, 2022).

La baja cohesión es una de las limitaciones más importantes, ya que afecta la capacidad del material para mantener unidos los agregados y resistir la fragmentación bajo el paso constante de vehículos. Esta cohesión deficiente contribuye a una mayor deformación plástica, lo que resulta en la formación de baches y grietas en la superficie del pavimento. La alta susceptibilidad a la humedad es otro desafío crítico, pues el agua debilita la adhesión entre el asfalto y los agregados, generando problemas como el desprendimiento del material y el deterioro de la estructura vial. El envejecimiento prematuro, por su parte, se debe a la exposición prolongada al oxígeno y los rayos ultravioleta, lo que provoca la oxidación del asfalto y la pérdida de flexibilidad. Esta rigidez inducida por el envejecimiento acelera la aparición de grietas, especialmente en climas extremos (Zhu & Wang, 2018).

4.2 Aportes individuales de emulsión catiónica, cal y cemento

Para estos problemas, se ha investigado la incorporación de aditivos como emulsiones catiónicas, cal y cemento en las mezclas asfálticas. Las emulsiones catiónicas mejoran la adhesión y cohesión del asfalto, mientras que la cal y el cemento actúan como estabilizadores, aumentando la resistencia a la deformación y mejorando la durabilidad. Estos aditivos han demostrado ser eficaces para mitigar los efectos del envejecimiento, la humedad y la deformación, ofreciendo una solución prometedora para extender la vida útil de los pavimentos de asfalto natural (García et al., 2020).

El mejoramiento de las propiedades del asfalto mediante aditivos ha sido explorado desde hace varias décadas. Desde los años 80, se han utilizado polímeros y otros aditivos para mejorar las propiedades del asfalto, como la elasticidad y la resistencia al agua. Los aditivos más comunes incluyen polímeros, fibras, cal y cemento, entre otros (Polacco et al., 2019). Sin embargo, en el caso del asfalto natural, la adición de emulsiones catiónicas, cal y cemento ha cobrado importancia en la última década debido a su capacidad para mejorar las propiedades clave del material sin incurrir en costos excesivos.

Las emulsiones asfálticas son el producto de la adición de agua a un cemento asfáltico. Para que estos dos materiales se puedan mezclar es necesario incorporar un tercer componente, denominado agente emulsificante, que puede ser arcilla coloidal, silicatos solubles o insolubles, jabón o aceites vegetales sulfatados (Rondón & Reyes, 2022).

Las emulsiones catiónicas son ampliamente utilizadas en la construcción de carreteras debido a su capacidad para mejorar la adhesión entre los agregados pétreos y el asfalto. Esta propiedad resulta especialmente relevante porque contribuye a incrementar la cohesión de la mezcla asfáltica, un aspecto fundamental para garantizar la durabilidad de las estructuras viales. Uno de los principales beneficios asociados al uso de estas emulsiones es su capacidad para mejorar la resistencia a la humedad, considerando que la exposición prolongada al agua representa una de las causas más frecuentes de deterioro en los pavimentos.

Dentro de esta categoría, las emulsiones catiónicas de rompimiento lento presentan ventajas adicionales en contextos donde las condiciones climáticas y de tráfico son variables. Este tipo de emulsión permite un mayor tiempo de trabajo antes de que el asfalto comience su proceso de endurecimiento, lo que facilita su manejo y aplicación durante las fases de distribución y compactación. Esta característica técnica resulta útil en proyectos que requieren una ejecución prolongada o en los que las condiciones ambientales no permiten una rápida evaporación del agua contenida en la emulsión. De esta manera, se optimiza el proceso de curado y se mejora el rendimiento del material en el sitio de aplicación (Liu et al., 2020).

El principio de acción de las emulsiones catiónicas radica en su carga positiva, que interactúa con los agregados de carga negativa, logrando una mayor adhesión y cohesión en la mezcla (Zhu & Wang, 2018). Esta mayor cohesión se traduce en una mayor resistencia al agua y a la tracción, lo que reduce el riesgo de fallos prematuros en el pavimento. El uso exitoso de emulsiones catiónicas es el proyecto de rehabilitación vial en el norte de España, donde se observó una mejora del 30% en la resistencia a la humedad al usar emulsiones catiónicas en mezclas asfálticas naturales (Fernández & Álvarez, 2019).

Otra ventaja clave de las emulsiones catiónicas es su capacidad para mejorar la resistencia a los daños por humedad, uno de los principales problemas en la durabilidad de los pavimentos. El agua puede debilitar la unión entre el asfalto y los agregados, provocando fallos prematuros en el pavimento, como grietas y desprendimientos. Al mejorar la adhesión entre estos componentes, las emulsiones catiónicas permiten que la mezcla asfáltica mantenga su integridad bajo condiciones de lluvia intensa o en áreas donde hay ciclos repetitivos de congelación y deshielo. Estos ciclos son particularmente dañinos, ya que el agua que penetra en el pavimento se expande al congelarse, provocando una separación interna de los materiales que, con el tiempo, lleva a la formación de grietas (González & Pérez, 2018).

El éxito de las emulsiones catiónicas en la mejora de la durabilidad de los pavimentos también se ha observado en climas tropicales, donde la combinación de humedad y temperaturas elevadas es especialmente perjudicial para los pavimentos convencionales. En un estudio realizado en Colombia, se implementaron emulsiones catiónicas en una carretera expuesta a condiciones climáticas adversas, lo que resultó en una mejora del 25% en la resistencia a la

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

deformación y una reducción significativa de los daños por humedad tras tres años de uso (INVIAS, 2019). Este tipo de resultados subraya el potencial de las emulsiones catiónicas para prolongar la vida útil de los pavimentos y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo.

Las emulsiones catiónicas representan una alternativa eficaz en la construcción de vías, ya que optimizan el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas y prolongan su vida útil frente a diferentes condiciones climáticas. Más allá de sus beneficios técnicos, su aplicación favorece prácticas más sostenibles en el sector vial al disminuir tanto el uso de insumos como el impacto ambiental derivado de la fabricación del asfalto. Estas emulsiones también fortalecen la cohesión interna de las mezclas y mejoran su resistencia al agua, lo que las convierte en un recurso clave para el desarrollo de infraestructuras viales más resistentes y eficientes.

Por su parte, la cal es un estabilizador químico que contribuye a la reducción de la deformación plástica, mejorando la capacidad del asfalto para resistir las cargas repetitivas. Además, ayuda a mitigar los efectos de la humedad y reduce la susceptibilidad del material al agrietamiento inducido por las variaciones de temperatura (Zhu & Wang, 2018). El cemento, al actuar como un agente de refuerzo, aumenta la rigidez de la mezcla asfáltica, lo que mejora su resistencia a la fatiga y prolonga la vida útil del pavimento. Esta combinación de aditivos ha permitido un enfoque más rentable y eficiente para mejorar las propiedades del asfalto natural, haciendo que estas mezclas sean una opción viable para infraestructuras más duraderas.

En un estudio realizado por Pérez y colaboradores (2018), se observó que las mezclas asfálticas modificadas con cal tenían un 20% más de resistencia a la tracción y una reducción del 15% en la pérdida de masa bajo condiciones de inmersión, lo que indica una mejora significativa en la resistencia a la humedad. Este enfoque ha sido utilizado en países con climas húmedos y ha demostrado ser efectivo en la prolongación de la vida útil de los pavimentos.

La cal es un material ampliamente empleado en la estabilización de suelos y mezclas asfálticas debido a su capacidad de reaccionar con los minerales presentes en el suelo y los agregados, generando compuestos estables que incrementan la resistencia a la deformación y disminuyen la susceptibilidad a la humedad. Diversas investigaciones han evidenciado que la incorporación de cal en mezclas asfálticas mejora de forma notable la resistencia a la tracción indirecta y la

cohesión interna, lo que se traduce en una mayor durabilidad del pavimento (González et al., 2017).

asimismo, el uso de cal tiene efectos positivos en la estabilidad volumétrica de las mezclas asfálticas, aspecto fundamental para prevenir deformaciones relacionadas con los cambios de temperatura. Al reaccionar con los silicatos y aluminatos presentes en los suelos y agregados, la cal forma compuestos cementantes que incrementan la resistencia y rigidez estructural de las capas del pavimento, contribuyendo así a la reducción de fisuras y grietas (Fernández et al., 2019).

Además de mejorar la resistencia a la deformación, la cal también actúa como una barrera protectora contra los efectos del agua. Al reducir la permeabilidad de la mezcla asfáltica, la cal impide que el agua penetre en el pavimento, lo que minimiza la acumulación de humedad dentro de la estructura. Esto es especialmente importante en regiones donde las lluvias intensas o los ciclos de congelación y deshielo son comunes, ya que el agua que ingresa en los pavimentos puede generar fallos estructurales con el tiempo (Zhu & Wang, 2018). En este sentido, la cal no solo refuerza la mezcla, sino que también prolonga la vida útil del pavimento al protegerlo de los daños causados por la humedad.

Además, el uso exitoso del concreto y la cal en proyectos de infraestructura vial se encuentra en la rehabilitación de carreteras en el sudeste de Asia, una región conocida por su clima húmedo y tropical. En este caso, la adición de cal a las mezclas asfálticas resultó en una reducción significativa de los fallos por humedad y en una mejora del 18% en la estabilidad estructural del pavimento después de cinco años de uso (Kim & Lee, 2020). Esto demuestra la eficacia de la cal no solo como un aditivo que mejora las propiedades mecánicas, sino también como un componente esencial para aumentar la resistencia al agua y la durabilidad en condiciones climáticas desafiantes.

El uso de cal en la estabilización de suelos y mezclas asfálticas ofrece una solución efectiva para mejorar la durabilidad y resistencia de los pavimentos. Al aumentar la cohesión interna, la estabilidad volumétrica y la resistencia a la humedad, la cal contribuye a la creación de

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

pavimentos más duraderos y resistentes, lo que reduce los costos de mantenimiento y mejora la calidad de la infraestructura vial a largo plazo.

4.3 Efectos combinados de los aditivos en mezclas con asfaltita

El cemento, a pesar de ser un material tradicionalmente asociado con la construcción de concreto, ha encontrado un lugar en la modificación de mezclas asfálticas. Su principal función en este contexto es actuar como un agente estabilizador que aumenta la rigidez de la mezcla y mejora su resistencia a las cargas cíclicas y al envejecimiento. El cemento forma enlaces rígidos entre los agregados, lo que refuerza la estructura interna del pavimento y mejora su resistencia a la fatiga (Rodríguez & Martínez, 2020).

Destacado la aplicación práctica, la ciudad de São Paulo, Brasil, utilizó mezclas de asfalto natural con cemento para pavimentar carreteras en áreas de alto tráfico. Los resultados mostraron una mejora del 25% en la resistencia a la fatiga, lo que permitió reducir el número de reparaciones necesarias durante un período de cinco años (Silva et al., 2019).

El uso del cemento en mezclas asfálticas también ha demostrado ser eficaz para mejorar la resistencia a la deformación plástica, un problema común en pavimentos sometidos a cargas pesadas, como los utilizados en carreteras con tráfico constante de camiones. Al aumentar la rigidez de la mezcla, el cemento ayuda a prevenir la formación de surcos y otras deformaciones que pueden comprometer la seguridad y funcionalidad del pavimento a largo plazo. Esta capacidad para soportar mejor las cargas repetitivas sin perder su forma original es especialmente valiosa en climas cálidos, donde las altas temperaturas tienden a ablandar el asfalto y aumentar la deformación (González & Pérez, 2018).

Otra ventaja clave de la adición de cemento a las mezclas asfálticas es su capacidad para mejorar la resistencia al envejecimiento. Con el tiempo, el pavimento asfáltico se vuelve más frágil debido a la oxidación y la exposición a los rayos ultravioleta. Este proceso de envejecimiento provoca la pérdida de flexibilidad del material, lo que aumenta la aparición de grietas y, en última instancia, reduce la vida útil del pavimento. La inclusión de cemento en la mezcla asfáltica retarda este proceso, proporcionando una mayor durabilidad y minimizando la

necesidad de intervenciones de mantenimiento frecuentes (Liu et al., 2020). Esto no solo reduce los costos asociados con las reparaciones, sino que también mejora la sostenibilidad de la infraestructura vial al disminuir la cantidad de materiales y energía necesarios para mantener las carreteras en buen estado.

Un estudio realizado en México evaluó el rendimiento de mezclas asfálticas modificadas con cemento en carreteras expuestas a condiciones climáticas extremas, incluidas altas temperaturas y lluvias intensas. Los resultados mostraron que la adición de cemento mejoró la resistencia del pavimento en un 20% en comparación con las mezclas convencionales, lo que se tradujo en una vida útil prolongada y una reducción de los costos de mantenimiento en más del 15% durante un período de diez años (Hernández et al., 2021).

Según esto se concluye que el uso de cemento en la modificación de mezclas asfálticas ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar tanto las propiedades mecánicas como la durabilidad de los pavimentos. Su capacidad para aumentar la rigidez, mejorar la resistencia a la fatiga y al envejecimiento, y prevenir la deformación plástica, lo convierte en un aditivo clave para infraestructuras viales más duraderas y sostenibles. Con aplicaciones exitosas en diversas regiones y climas, el cemento se posiciona como un componente para optimizar el rendimiento y la longevidad de las carreteras modernas.

Las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica determinan su capacidad para resistir las tensiones y deformaciones impuestas por el tráfico y las condiciones climáticas. Entre las propiedades más importantes se encuentran la resistencia a la compresión, la tracción indirecta y el módulo de resiliencia. En el caso de las mezclas asfálticas modificadas con emulsión catiónica, cal y cemento, los estudios han demostrado mejoras significativas en estas propiedades en comparación con mezclas no modificadas.

La resistencia a la compresión es un indicador clave de la capacidad de la mezcla para soportar las cargas verticales de los vehículos, y es especialmente importante en carreteras con tráfico pesado. La adición de cal y cemento ha mostrado aumentar esta resistencia, lo que permite que las mezclas asfálticas modificadas mantengan su integridad estructural durante más tiempo, reduciendo la aparición de deformaciones permanentes, como los surcos. En estudios realizados

por González et al. (2018), las mezclas con aditivos mostraron un incremento del 18% en su resistencia a la compresión, lo que se traduce en pavimentos más robustos y menos propensos a sufrir daños prematuros.

La tracción indirecta, que mide la capacidad de la mezcla para resistir la propagación de grietas bajo la carga de tráfico, también se ve mejorada con la adición de estos aditivos. Las mezclas modificadas con cal y cemento tienden a presentar una mayor cohesión interna, lo que reduce la aparición de fisuras que pueden comprometer la durabilidad del pavimento. Esta mayor resistencia a la tracción es particularmente importante en climas fríos, donde los ciclos de congelación y descongelación suelen causar grietas en las carreteras.

Por otro lado, la resistencia a la tracción indirecta es esencial para evaluar la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir el agrietamiento bajo tensiones de tracción. Estas tensiones ocurren típicamente en climas fríos, donde las bajas temperaturas y los ciclos de congelación y deshielo generan tensiones internas en el pavimento, lo que conduce a la formación de grietas. La mejora del 22% en la resistencia a la tracción indirecta observada en el estudio de García et al. (2019) sugiere que las mezclas asfálticas modificadas con cal y cemento tienen una mayor cohesión interna, lo que les permite absorber mejor las tensiones y prevenir la propagación de grietas. Esta mayor resistencia a la tracción indirecta en regiones con climas extremos, ya que reduce la incidencia de fallos estructurales relacionados con las tensiones térmicas.

Con base en lo anterior, se infiere que la modificación de mezclas asfálticas con emulsión catiónica, cal y cemento no solo incrementa la resistencia a la compresión y a la tracción, sino que también refuerza la capacidad de la mezcla para soportar cargas repetitivas sin presentar deformaciones permanentes, lo cual representa una alternativa eficaz para el desarrollo de infraestructuras viales con mayor durabilidad y eficiencia.

La resistencia a la compresión es una medida clave de la capacidad del pavimento para soportar cargas verticales, mientras que la resistencia a la tracción indirecta evalúa su capacidad para resistir la propagación de grietas. En un estudio de García et al. (2019), se observó que las mezclas modificadas con cal y cemento presentaban un aumento del 18% en la resistencia a la compresión en comparación con las mezclas de asfalto natural sin aditivos. Además, la

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

resistencia a la tracción indirecta aumentó un 22%, lo que sugiere que la adición de estos aditivos mejora la cohesión interna de la mezcla y su capacidad para resistir las fuerzas de tracción.

La resistencia a la compresión es particularmente importante en carreteras que experimentan tráfico pesado, como aquellas utilizadas por vehículos de carga. Las cargas repetitivas que ejercen estos vehículos pueden causar la deformación progresiva del pavimento, lo que se manifiesta en la formación de surcos y otros defectos superficiales. Al mejorar la resistencia a la compresión mediante la adición de cal y cemento, se incrementa la capacidad del pavimento para soportar estas cargas verticales sin sufrir deformaciones permanentes. Este aumento en la resistencia a la compresión no solo mejora la durabilidad del pavimento, sino que también reduce los costos de mantenimiento a largo plazo, ya que los daños por carga son una de las principales causas de intervención en las carreteras.

Otro aspecto importante es que tanto la resistencia a la compresión como la tracción indirecta son indicadores de la cohesión interna de la mezcla asfáltica. La adición de cal y cemento mejora la interacción entre los agregados y el asfalto, fortaleciendo la estructura interna del pavimento. Esta mayor cohesión permite que las mezclas asfálticas modifiquen su comportamiento ante cargas mecánicas sin perder integridad estructural. Los resultados del estudio demuestran que la modificación de mezclas asfálticas con cal y cemento no solo refuerza las propiedades mecánicas fundamentales de resistencia a la compresión y tracción, sino que también prolonga la vida útil del pavimento, disminuyendo la frecuencia de intervenciones y aumentando la sostenibilidad de las infraestructuras viales.

Uno de los mayores desafíos en la construcción de pavimentos es la degradación de las mezclas asfálticas a lo largo del tiempo debido a factores como la exposición a los rayos UV, el tráfico pesado y la infiltración de agua. El envejecimiento prematuro de los pavimentos asfálticos puede provocar grietas, deformaciones y una pérdida de cohesión que reduce significativamente su vida útil (Matos & Silva, 2019). Este proceso de degradación se ve acelerado por las condiciones climáticas extremas y el constante tránsito de vehículos pesados, que incrementan las tensiones sobre el pavimento y favorecen el desarrollo de defectos estructurales.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

La adición de emulsiones catiónicas de rompimiento lento, cal y cemento ha demostrado ser una solución efectiva para mitigar los efectos del envejecimiento prematuro en los pavimentos asfálticos. Estos aditivos no solo mejoran la cohesión interna del asfalto, sino que también refuerzan su resistencia a los factores ambientales que suelen causar su degradación. En un estudio de Fernández et al. (2021), se observó que las mezclas modificadas con estos aditivos presentaban una reducción del 12% en la tasa de envejecimiento, lo que se traduce en una mayor vida útil del pavimento. Esta mejora es particularmente significativa en áreas expuestas a altos niveles de radiación solar, donde los rayos UV pueden oxidar y endurecer el asfalto, haciéndolo más propenso a agrietarse.

Tabla 1. Efectos combinados de los aditivos en mezclas con asfaltita

Propiedad Evaluada	Aditivos Involucrados	Efecto Observado	Contexto / Aplicación
Resistencia a la fatiga	Cemento	Incremento del 25% en resistencia a la fatiga, reducción de intervenciones en 5 años	Carreteras de alto tráfico en São Paulo, Brasil
Resistencia a la deformación plástica	Cemento	Mejora en la rigidez, disminución de formación de surcos	Vías con tráfico pesado, especialmente en climas cálidos
Resistencia al envejecimiento	Cemento	Reducción de oxidación y fragilidad, mayor durabilidad	Exposición prolongada a rayos UV
Desempeño en climas extremos	Cemento	Incremento del 20% en resistencia estructural, reducción del 15% en costos de mantenimiento	Carreteras mexicanas con altas temperaturas y lluvias intensas
Resistencia a la compresión	Cal + Cemento	Aumento del 18% en la capacidad de soportar cargas verticales	Carreteras con tránsito pesado
Resistencia a la tracción indirecta	Cal + Cemento	Aumento del 22%, mejora en cohesión interna y resistencia a grietas	Regiones frías con ciclos de congelación y deshielo
Cohesión interna de la mezcla	Cal + Cemento	Mejora en la interacción entre agregados y asfalto, mayor resistencia mecánica	Tramos con altas tensiones mecánicas
Resistencia al envejecimiento acelerado	Emulsión catiónica + Cal + Cemento	Reducción del 12% en la tasa de envejecimiento, mayor vida útil del pavimento	Zonas expuestas a alta radiación solar

Fuente: elaboración propia

4.4 Sostenibilidad e impacto técnico-económico de las mezclas modificadas

La resistencia a la humedad es otro aspecto crítico en la durabilidad de los pavimentos. El agua, al infiltrarse en la mezcla asfáltica, debilita los enlaces entre el asfalto y los agregados, lo que provoca la pérdida de cohesión y, eventualmente, el desprendimiento del material. Las pruebas de resistencia al agua mostraron que las mezclas modificadas con cal y emulsión catiónica eran menos propensas a sufrir daño por humedad, con una reducción del 10% en la pérdida de masa durante las pruebas de inmersión. Este comportamiento se debe a la capacidad de la cal para reaccionar con los minerales de los agregados, formando compuestos estables que mejoran la adhesión y sellan las posibles vías de infiltración de agua (González & Pérez, 2018).

Esto se evidencia en la efectividad de estas modificaciones en el comportamiento del pavimento frente a la humedad se puede observar en regiones con climas húmedos o lluviosos. En un estudio realizado en el sudeste asiático, se observó que las mezclas asfálticas modificadas con estos aditivos presentaban una mejora del 15% en su resistencia a los daños causados por el agua y los ciclos de congelación y descongelación, lo que prolongó la vida útil de las carreteras en hasta cinco años (Kim & Lee, 2020).

La modificación de mezclas asfálticas con emulsión catiónica, cal y cemento no solo mejora la resistencia al envejecimiento, sino que también protege al pavimento contra los efectos de la humedad, lo que se traduce en una mayor durabilidad y menores costos de mantenimiento a largo plazo.

La sostenibilidad es un aspecto clave en la construcción de infraestructuras modernas. El uso de asfalto natural modificado con emulsiones catiónicas, cal y cemento no solo mejora las propiedades mecánicas y de durabilidad del pavimento, sino que también puede reducir el impacto ambiental de la construcción de carreteras. Al prolongar la vida útil de los pavimentos y reducir la necesidad de reparaciones frecuentes, estas mezclas asfálticas contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al ahorro de recursos naturales.

En la industria de la construcción, el enfoque en la sostenibilidad ha cobrado una importancia creciente debido a los desafíos asociados con el cambio climático y el agotamiento de los

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

recursos naturales. La producción de asfalto tradicional requiere grandes cantidades de energía y materiales vírgenes, lo que genera una huella de carbono considerable. En este contexto, la adopción de asfalto natural modificado con aditivos como emulsiones catiónicas, cal y cemento ofrece una alternativa más sostenible, al reducir la necesidad de materiales nuevos y disminuir la frecuencia de mantenimiento.

La prolongación de la vida útil de los pavimentos es un aspecto clave en esta estrategia de sostenibilidad. Las mezclas asfálticas convencionales tienden a deteriorarse con mayor rapidez bajo el estrés del tráfico intenso y las condiciones climáticas extremas, lo que genera la necesidad de frecuentes reparaciones o incluso la reconstrucción de tramos completos de carretera. Al mejorar las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, la compresión y el envejecimiento, las mezclas modificadas permiten que los pavimentos mantengan su integridad estructural durante más tiempo. Esto se traduce en menos intervenciones, lo que no solo ahorra recursos financieros, sino que también reduce el consumo de energía y las emisiones asociadas con las actividades de mantenimiento (González & Pérez, 2018).

Un estudio de evaluación del ciclo de vida realizado por Silva et al. (2020) encontró que las mezclas asfálticas modificadas con cal y cemento tenían un 25% menos de impacto ambiental en comparación con las mezclas tradicionales debido a la reducción en la necesidad de mantenimiento y la menor producción de asfalto nuevo. La disminución en el uso de asfalto nuevo tiene un impacto directo en la huella de carbono, ya que la extracción y procesamiento de los materiales necesarios para fabricar asfalto tradicional requieren grandes cantidades de energía. Además, la reducción en el número de reparaciones necesarias también implica menos interrupciones en el tráfico, lo que contribuye a una disminución en las emisiones de los vehículos que quedan varados en las obras de mantenimiento.

Otro aspecto importante de la sostenibilidad es el uso de materiales reciclables y el aprovechamiento de los recursos locales. Al utilizar asfalto natural modificado, se puede reducir la dependencia de materiales importados o de producción intensiva, favoreciendo el uso de recursos que ya están disponibles en la región. Esto no solo reduce los costos y el impacto ambiental asociado con el transporte de materiales, sino que también fomenta la economía local y disminuye la huella ecológica del proyecto.



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

Además, la mejora en la resistencia al envejecimiento de las mezclas asfálticas modificadas contribuye a reducir el daño causado por factores ambientales como los rayos UV y la humedad. Estos factores son responsables de acelerar el deterioro de los pavimentos, lo que incrementa los costos de mantenimiento y genera residuos adicionales. Al utilizar aditivos que refuercen la resistencia de los pavimentos a estas condiciones, se disminuye la necesidad de reemplazar materiales con tanta frecuencia, lo que, a su vez, reduce la generación de residuos y la demanda de recursos vírgenes.

La incorporación de emulsiones catiónicas, cal y cemento en mezclas de asfalto natural no solo mejora el rendimiento y durabilidad de los pavimentos, sino que también representa una solución sostenible para la construcción de infraestructuras viales. Al reducir el impacto ambiental y optimizar el uso de recursos, esta tecnología responde a las crecientes demandas de sostenibilidad en el sector de la construcción, proporcionando una alternativa más eficiente y respetuosa con el medio ambiente que las técnicas tradicionales.

A lo largo de los últimos años, varios proyectos de construcción vial han implementado mezclas asfálticas modificadas con emulsión catiónica, cal y cemento con resultados exitosos. En el Proyecto Autopista del Sol en Colombia, por ejemplo, se utilizaron estas mezclas para mejorar la durabilidad de los pavimentos en áreas de alto tráfico y clima húmedo. Los resultados mostraron una reducción del 30% en los costos de mantenimiento a lo largo de un período de cinco años (INVIAS, 2021). Esto subraya el impacto positivo de las mezclas modificadas en términos económicos, al disminuir la necesidad de reparaciones y extender la vida útil de las carreteras, especialmente en entornos con condiciones climáticas adversas, donde la humedad y las altas temperaturas aceleran el desgaste del pavimento.

Del mismo modo, en España, un proyecto de rehabilitación en la carretera A-6 implementó mezclas asfálticas modificadas con emulsiones catiónicas, logrando una mejora del 25% en la resistencia a la fatiga y una mayor durabilidad en condiciones de tráfico pesado (Fernández & Álvarez, 2019). La resistencia a la fatiga es un factor crítico en carreteras de alto tráfico, ya que la exposición constante a cargas pesadas puede generar grietas y deformaciones que reducen la vida útil del pavimento. Al mejorar esta propiedad mecánica, se consigue una mayor estabilidad estructural, lo que permite que las carreteras soporten mejor las tensiones a las que están

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

sometidas diariamente. Este caso demuestra que las mezclas asfálticas modificadas no solo mejoran la durabilidad del pavimento, sino que también reducen el impacto del tráfico sobre la infraestructura vial.

Otro ejemplo de éxito en la implementación de estas tecnologías se encuentra en México, donde se emplearon mezclas asfálticas modificadas con emulsión catiónica y cemento en una red vial que atraviesa zonas montañosas con climas extremos. Los resultados mostraron una reducción significativa en la aparición de deformaciones plásticas, con una disminución del 20% en los costos de mantenimiento durante los primeros cuatro años tras su implementación (González & Pérez, 2020). En este contexto, las mezclas modificadas demostraron su capacidad para resistir tanto las altas temperaturas como las cargas pesadas de los vehículos que circulan por estas carreteras, lo que garantiza una mayor durabilidad y una disminución de los costos asociados a su mantenimiento.

En regiones donde las condiciones climáticas extremas, como las altas temperaturas, las lluvias intensas o los ciclos de congelación y deshielo, aceleran el deterioro de las carreteras, la modificación de las mezclas asfálticas ha demostrado ser una solución eficaz. Un caso notable ocurrió en el sudeste de Asia, donde el uso de estas mezclas permitió reducir los problemas de desprendimiento del pavimento causados por la infiltración de agua, mejorando la cohesión y la estabilidad del pavimento en áreas con alta pluviosidad (Kim & Lee, 2020).

La investigación y el desarrollo de mezclas asfálticas modificadas pueden tener un impacto significativo en la práctica de la ingeniería vial, al aumentar la durabilidad, reducir los costos de mantenimiento y mejorar la sostenibilidad de los proyectos. Con la incorporación de tecnologías como las emulsiones catiónicas, cal y cemento, las infraestructuras viales se vuelven más resilientes y capaces de soportar las exigencias del tráfico moderno y los desafíos climáticos.

4.5 MARCO LEGAL

4.5.1 Normativa aplicable a infraestructura vial

El marco legal que regula la construcción de infraestructuras viales, específicamente en lo que respecta al uso de mezclas asfálticas modificadas con aditivos como emulsiones catiónicas, cal y cemento, es fundamental para garantizar la calidad, seguridad y sostenibilidad de los pavimentos. Este marco comprende tanto normativas nacionales como internacionales que se han desarrollado con el objetivo de estandarizar los procedimientos, asegurar la durabilidad de los pavimentos y mitigar el impacto ambiental de las construcciones viales. A continuación, se presenta una revisión del marco legal relevante, a nivel nacional e internacional, que regula el uso de materiales y tecnologías en la construcción de carreteras.

En el ámbito nacional, la legislación colombiana establece regulaciones específicas para la construcción de infraestructuras viales. El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y el Ministerio de Transporte son las principales entidades encargadas de la supervisión y regulación de las construcciones viales en el país. Entre las normativas más destacadas se encuentra la Resolución 4150 de 1999, la cual establece especificaciones técnicas y de calidad para la construcción de carreteras. Esta resolución promueve el uso de materiales que cumplan con los estándares necesarios para garantizar la durabilidad de los pavimentos, lo que incluye el empleo de aditivos como las emulsiones catiónicas, la cal y el cemento para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas (INVIAS, 1999).

En el contexto internacional, organizaciones como la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) han desarrollado normas para regular el uso de materiales en la construcción de carreteras. Estas normativas, como la ASTM D6373 y la AASHTO M140, establecen especificaciones técnicas para las emulsiones asfálticas y su aplicación en pavimentos, garantizando que se utilicen materiales que mejoren la resistencia y durabilidad de las infraestructuras viales (ASTM, 2018). Asimismo, la Unión Europea, a través de sus normativas de contratación pública y desarrollo sostenible, como la Directiva 2004/18/CE, fomenta el uso de tecnologías y materiales innovadores en la construcción de infraestructuras, asegurando que estas sean sostenibles y

eficientes a lo largo del tiempo (Parlamento Europeo, 2004); a continuación, desarrollaremos en detalle lo mencionado en este contexto.

- Ley 105 de 1993: Esta ley establece los principios generales para la regulación del transporte en Colombia, y aunque no trata específicamente de la construcción de carreteras, establece los lineamientos generales para la prestación del servicio de transporte y el desarrollo de la infraestructura vial. Entre sus disposiciones, se resalta la importancia de garantizar la sostenibilidad y seguridad de las vías, lo que indirectamente implica la necesidad de utilizar materiales duraderos y eficaces, como las mezclas asfálticas modificadas (Congreso de Colombia, 1993).

Esta ley señala que el transporte debe ser eficiente, seguro, accesible y sostenible, y que los proyectos de infraestructura deben cumplir con estos criterios. En este sentido, la ley no solo contempla aspectos relativos a la operación del transporte, sino que también pone un énfasis particular en la infraestructura vial como un componente clave para asegurar la conectividad del país y el desarrollo económico.

Aunque la Ley 105 no entra en detalles sobre los materiales específicos que deben utilizarse en la construcción de carreteras, los principios de sostenibilidad y seguridad que promueve obligan a los responsables de la construcción de infraestructura vial a elegir tecnologías y materiales que cumplan con estos objetivos. Esto incluye el uso de mezclas asfálticas modificadas con aditivos como emulsiones catiónicas, cal y cemento, que mejoran la resistencia, durabilidad y sostenibilidad de los pavimentos. Estos materiales son esenciales para construir carreteras que puedan soportar el tráfico pesado, resistir las condiciones climáticas adversas y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo. En términos de sostenibilidad, la ley subraya la necesidad de minimizar el impacto ambiental de las infraestructuras de transporte, lo cual implica el uso de materiales y tecnologías que promuevan la conservación de los recursos naturales y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Las mezclas asfálticas modificadas, al prolongar la vida útil de los pavimentos y reducir la necesidad de reparaciones frecuentes, contribuyen significativamente a estos objetivos. Según estudios recientes, el uso de estos materiales puede reducir el impacto ambiental de los proyectos de construcción de

carreteras en un 20% al minimizar el consumo de asfalto virgen y reducir la frecuencia de intervención en las vías (Silva et al., 2020).

En cuanto a la seguridad, la ley establece que la infraestructura vial debe cumplir con estándares de calidad que garanticen la protección de los usuarios, lo cual implica la utilización de materiales duraderos y capaces de soportar el desgaste y la deformación bajo condiciones de tráfico intenso. Frente a este desafío, las mezclas asfálticas modificadas ofrecen una solución efectiva, dado que incrementan significativamente la resistencia al agrietamiento, la fatiga y la deformación plástica, permitiendo que las vías se mantengan en buenas condiciones durante más tiempo y minimizando los riesgos para conductores y peatones.

Asimismo, la resolución establece detalladamente los procedimientos específicos de ensayo para estas mezclas, los cuales son fundamentales para verificar que los materiales empleados cumplan con todas las especificaciones técnicas. Entre estos procedimientos destacan las pruebas de resistencia a la compresión, tracción indirecta, módulo de resiliencia y resistencia a la humedad, esenciales para asegurar que las mezclas mantengan sus propiedades con el paso del tiempo y no presenten deformaciones ni daños significativos. Por esta razón, la normativa subraya la necesidad de un control riguroso desde la etapa inicial del proceso constructivo.

Adicionalmente, el uso de aditivos en mezclas asfálticas está directamente relacionado con la sostenibilidad y eficiencia económica de las infraestructuras viales. Al mejorar las propiedades mecánicas de estos materiales, se reduce la necesidad de intervenciones frecuentes, lo que se traduce en menores costos de mantenimiento y en una reducción del impacto ambiental asociado. De hecho, aditivos como la emulsión catiónica y el cemento han demostrado mejorar notablemente la resistencia al agua y la fatiga, proporcionando así vías más resistentes frente a condiciones climáticas adversas, como lluvias intensas y cambios bruscos de temperatura (Silva et al., 2020). cabe mencionar que el ICONTEC, en calidad de entidad encargada de elaborar normas técnicas en Colombia, garantiza que la normativa nacional sobre mezclas asfálticas esté alineada con las mejores prácticas internacionales, contribuyendo así a la competitividad y calidad de la infraestructura vial colombiana en el contexto global.

4.6 Especificaciones técnicas para el diseño de mezclas asfálticas

En Colombia, la regulación de las obras públicas y la infraestructura vial está bajo la supervisión del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y del Ministerio de Transporte, ambos responsables de formular políticas, normas y directrices técnicas para la construcción y mantenimiento de las vías del país.

- Resolución 4150 de 1999: Esta resolución del INVIAS establece las especificaciones generales para la construcción de carreteras, donde se incluyen los requisitos para el diseño de mezclas asfálticas. Se contempla el uso de aditivos para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas, y se detallan los procedimientos de ensayo para garantizar su durabilidad y resistencia a las condiciones climáticas y de tráfico (INVIAS, 1999).

Esta normativa técnica, tiene como objetivo principal estandarizar los procedimientos y materiales utilizados en la construcción de carreteras, garantizando que las obras viales sean seguras, duraderas y capaces de soportar las condiciones variables de tráfico y clima del país. Esto es especialmente importante en un país como Colombia, donde las condiciones climáticas, como la alta humedad y las precipitaciones en muchas regiones, presentan desafíos importantes para la durabilidad de las infraestructuras viales.

Uno de los puntos más importantes de la resolución es el diseño de mezclas asfálticas, que regula tanto la selección de materiales como los procedimientos de construcción. Se reconoce la necesidad de utilizar aditivos que mejoren las propiedades del asfalto, con el fin de hacer que las mezclas sean más resistentes a las deformaciones, el agrietamiento y el desgaste. Entre los aditivos que se contemplan en la resolución están las emulsiones catiónicas, la cal y el cemento, los cuales se han probado como eficaces para mejorar la cohesión interna y la durabilidad de las mezclas asfálticas, particularmente en carreteras de alto tráfico y en zonas con condiciones climáticas adversas.

- Norma Técnica Colombiana (NTC) 174: Regula los requisitos técnicos que deben cumplir los materiales utilizados en la construcción de carreteras, incluyendo mezclas asfálticas. Esta norma, elaborada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), establece los parámetros de calidad y durabilidad que deben cumplir los

materiales, alineándose con las especificaciones internacionales para garantizar la seguridad y sostenibilidad de los proyectos de infraestructura vial.

Dentro del ámbito de esta norma, uno de los aspectos más relevantes es la regulación de las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras. La NTC 174 especifica que las mezclas deben cumplir con criterios rigurosos de resistencia mecánica, durabilidad, y comportamiento bajo cargas dinámicas. Estos parámetros son fundamentales para asegurar que los pavimentos asfálticos puedan soportar el tráfico pesado y las condiciones climáticas adversas, factores comunes en las diversas regiones geográficas de Colombia.

Además, la NTC 174 establece los procedimientos que deben seguirse para la selección de los materiales, la fabricación y colocación de las mezclas asfálticas, y el control de calidad durante las etapas de construcción. La norma subraya la importancia de utilizar aditivos que mejoren las propiedades de las mezclas, como emulsiones asfálticas, cal y cemento, para aumentar la resistencia a la deformación plástica, la fatiga y la humedad. Estos aditivos no solo mejoran las propiedades mecánicas de las mezclas, sino que también contribuyen a la sostenibilidad del proyecto, al reducir la necesidad de mantenimiento frecuente y prolongar la vida útil de los pavimentos.

Otro aspecto destacado de la NTC 174 es su alineación con normativas internacionales, lo que garantiza que los proyectos de infraestructura vial en Colombia se realicen bajo estándares globales de calidad y sostenibilidad. En este sentido, la norma se ajusta a los lineamientos de organizaciones internacionales como la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), que proporcionan especificaciones detalladas para el diseño y evaluación de mezclas asfálticas. Esta armonización con estándares internacionales permite a Colombia implementar tecnologías y metodologías de vanguardia en sus proyectos viales.

Finalmente, la NTC 174 también aborda la importancia de garantizar la seguridad de las infraestructuras viales, al asegurar que los materiales utilizados cumplan con las características necesarias para resistir las condiciones del entorno, como la alta humedad y las temperaturas extremas. Esta normativa es un componente esencial para la creación

de carreteras más seguras, duraderas y sostenibles, que puedan cumplir con las crecientes demandas del tráfico moderno y las condiciones ambientales desafiantes.

- Política Nacional de Infraestructura (2020): El Gobierno colombiano ha implementado políticas de modernización de la infraestructura vial para promover el desarrollo económico y la conectividad del país. Dentro de esta política, se promueve la utilización de tecnologías y materiales que aseguren la durabilidad y sostenibilidad de las carreteras, lo que incluye el uso de mezclas asfálticas modificadas con emulsiones catiónicas, cal y cemento para reducir el impacto ambiental y los costos de mantenimiento (Ministerio de Transporte, 2020).

La Política Nacional de Infraestructura lanzada en 2020 por el Ministerio de Transporte colombiano se enmarca en una estrategia más amplia de desarrollo económico y competitividad, reconociendo la infraestructura vial como un pilar clave para conectar las distintas regiones del país, mejorar la eficiencia del transporte de bienes y servicios, y fomentar el crecimiento en zonas rurales y urbanas. El plan busca los principales desafíos del país en cuanto a movilidad y logística, al tiempo que se alinean con los compromisos de sostenibilidad y mitigación del impacto ambiental.

Uno de los elementos fundamentales de esta política es la promoción de la modernización de carreteras mediante el uso de tecnologías avanzadas y materiales innovadores que contribuyan a la durabilidad de las infraestructuras viales. Esto es esencial en un país como Colombia, donde las condiciones geográficas y climáticas, que incluyen alta pluviosidad, terrenos montañosos y variaciones extremas de temperatura, plantean retos importantes para la sostenibilidad de las carreteras. El uso de mezclas asfálticas modificadas con aditivos como emulsiones catiónicas, cal y cemento permite que los pavimentos sean más resistentes a estos factores, mejorando su desempeño frente a la fatiga y el desgaste, y prolongando su vida útil.

Además de los beneficios técnicos, la política también tiene un fuerte enfoque en la reducción del impacto ambiental asociado con la construcción y mantenimiento de carreteras. El empleo de mezclas asfálticas modificadas no solo mejora las propiedades mecánicas de los pavimentos, sino que también disminuye la necesidad de reparaciones frecuentes. Esto, a su vez, reduce el

consumo de recursos naturales y de energía, así como las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a los compromisos internacionales de Colombia en la lucha contra el cambio climático (Ministerio de Transporte, 2020).

Un aspecto importante de la Política Nacional de Infraestructura es su objetivo de reducir los costos de mantenimiento a largo plazo. En lugar de recurrir a métodos tradicionales que pueden requerir intervenciones frecuentes, la utilización de materiales como el cemento y la cal en las mezclas asfálticas permite crear carreteras más resistentes a los factores de desgaste, reduciendo así la frecuencia de las reparaciones y los costos asociados. Esto es particularmente relevante en áreas de alto tráfico, donde la infraestructura se ve sometida a mayores tensiones y donde las interrupciones para reparaciones pueden generar pérdidas económicas.

4.7 Lineamientos técnicos aplicables

En el marco nacional colombiano se establecen normativas dirigidas a incentivar la implementación de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia en las infraestructuras viales. Dichas disposiciones asignan claramente a contratistas y empresas constructoras la responsabilidad específica de garantizar que los materiales empleados en cada obra se ajusten a los parámetros técnicos definidos por las autoridades correspondientes. Estas regulaciones tienen como propósito fundamental asegurar la sostenibilidad ambiental, la durabilidad estructural y un óptimo desempeño de los materiales en condiciones reales de operación, incluyendo factores climáticos adversos y cargas vehiculares variables.

Desde una perspectiva internacional, las regulaciones sobre construcción de infraestructuras viales mantienen coherencia con directrices técnicas adoptadas por diversos organismos y acuerdos multilaterales. Estos estándares internacionales incentivan de forma explícita el uso de tecnologías emergentes en mezclas asfálticas para promover una mayor sostenibilidad ambiental, la reducción efectiva del consumo energético y la optimización integral de recursos naturales. Asimismo, ponen énfasis en la seguridad técnica, la resistencia estructural de las vías construidas y la disminución significativa de emisiones contaminantes generadas durante los procesos constructivos.

4.8 Relevancia Legal de los Aditivos en la Ingeniería de Pavimentos

En cuanto a la infraestructura vial, la directiva fomenta el uso de mezclas asfálticas modificadas con aditivos como emulsiones catiónicas, cal y cemento, que han demostrado ser eficaces para mejorar la durabilidad de los pavimentos y reducir los costos de mantenimiento a lo largo de su vida útil. La implementación de estos materiales no solo ayuda a prolongar la vida útil de las carreteras, sino que también reduce la necesidad de reparaciones frecuentes, lo que disminuye las intervenciones en el tráfico y los impactos económicos negativos derivados de las interrupciones de las vías.

En términos de sostenibilidad, la directiva pone un fuerte énfasis en la reducción del impacto ambiental en las infraestructuras viales, alentando a los Estados miembros a considerar criterios ambientales al elegir los materiales de construcción. Esto no solo se traduce en un menor uso de materiales vírgenes, sino también en una menor huella de carbono asociada con el ciclo de vida de los pavimentos, desde la producción hasta el mantenimiento. Así, la Directiva 2004/18/CE desempeña un papel en la modernización y sostenibilidad de las infraestructuras viales en Europa, asegurando que las inversiones públicas sean eficientes, transparentes y ambientalmente responsables.

- **Normas ASTM Internacional:** La American Society for Testing and Materials (ASTM) es uno de los principales organismos internacionales en la estandarización de ensayos y procedimientos para la evaluación de materiales de construcción, incluidas las mezclas asfálticas. Las normas ASTM D3515 y ASTM D6373, por ejemplo, regulan las especificaciones de los aglutinantes asfálticos utilizados en pavimentos, permitiendo el uso de aditivos como emulsiones catiónicas, cal y cemento para mejorar las propiedades de la mezcla (ASTM, 2018).

La ASTM ha establecido un marco de referencia para la evaluación y especificación de materiales utilizados en proyectos de infraestructura vial a nivel global. Estas normas técnicas son ampliamente reconocidas por su rigurosidad y detalle, proporcionando procedimientos claros y estandarizados para evaluar la calidad y desempeño de los materiales utilizados en la construcción de carreteras, puentes y otras obras civiles. En



particular, las normas ASTM aplicadas a las mezclas asfálticas aseguran que los pavimentos construidos bajo estos estándares cumplan con los requisitos de durabilidad, seguridad y sostenibilidad.

La norma ASTM D3515 establece las especificaciones para las mezclas asfálticas de tipo caliente que se utilizan en pavimentos, asegurando que los materiales empleados cumplan con criterios de resistencia mecánica, estabilidad y capacidad de soportar cargas de tráfico pesado. Esta norma permite el uso de aditivos como emulsiones catiónicas y cal, los cuales mejoran la cohesión y durabilidad de la mezcla, reduciendo la susceptibilidad a la deformación plástica y la fatiga, problemas comunes en pavimentos con alto volumen de tráfico.

Por otro lado, la norma ASTM D6373 se centra en la especificación de aglutinantes asfálticos modificados con polímeros, lo que incluye la posibilidad de añadir cemento y otros aditivos para mejorar la resistencia del pavimento a las altas temperaturas y la oxidación. Estos aglutinantes juegan un papel fundamental en la resistencia a la fatiga del pavimento y en su capacidad para soportar ciclos repetidos de cargas sin desarrollar grietas o deformaciones.

- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials): AASHTO ha establecido varias normas para la construcción de carreteras en Estados Unidos, que también son utilizadas como referencia en diversos países. Las especificaciones de AASHTO incluyen el uso de emulsiones catiónicas y otros aditivos para mejorar la resistencia de los pavimentos a la fatiga y la deformación. Normas como la AASHTO M140 y la AASHTO M208 regulan el uso de emulsiones asfálticas, garantizando que los pavimentos sean duraderos y resistentes a las condiciones extremas de tráfico y clima (AASHTO, 2019).

AASHTO, como una de las organizaciones más influyentes en el desarrollo de estándares para la construcción de infraestructuras viales, ha jugado un papel fundamental en la mejora de la calidad y durabilidad de las carreteras en Estados Unidos y más allá. Sus normativas cubren una amplia gama de aspectos técnicos, que van desde los materiales

y procedimientos de construcción hasta los métodos de prueba y evaluación de pavimentos. Estas normativas también se han adoptado en muchos otros países como referencia para asegurar la calidad y sostenibilidad de los proyectos viales.

En cuanto al uso de emulsiones asfálticas, las especificaciones AASHTO M140 y AASHTO M208 detallan los requisitos técnicos para la fabricación y aplicación de estos materiales. La AASHTO M140, por ejemplo, regula las emulsiones asfálticas catiónicas, las cuales son esenciales para mejorar la adhesión entre los agregados y el asfalto, y para aumentar la resistencia a la fatiga y al desgaste. Las emulsiones catiónicas son particularmente útiles en climas donde las condiciones extremas de calor, frío o humedad pueden acelerar la degradación de los pavimentos.

Por otro lado, la AASHTO M208 se enfoca en las emulsiones modificadas, que mejoran aún más las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Estas emulsiones, combinadas con aditivos como el cemento y la cal, aumentan la cohesión interna de la mezcla, lo que resulta en pavimentos más resistentes a la deformación plástica y la propagación de grietas. Esta combinación de emulsiones y aditivos proporciona pavimentos más duraderos y de mayor rendimiento, capaces de soportar las demandas de tráfico pesado y las variaciones climáticas extremas.

- Directrices de la ONU para Infraestructura Sostenible (2021): Como parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), las Naciones Unidas han desarrollado directrices para promover la construcción de infraestructura sostenible. Estas directrices enfatizan la importancia de utilizar materiales que reduzcan el impacto ambiental de las infraestructuras, como el asfalto modificado con aditivos que prolongan su vida útil y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida del pavimento (ONU, 2021).

Las directrices de la ONU se enmarcan en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en la cual uno de los principales objetivos es garantizar infraestructuras resilientes, inclusivas y sostenibles. El sector de la construcción, y en particular la infraestructura vial, es fundamental para el logro de varios ODS, como el ODS 9, que promueve la industria,

la innovación y la infraestructura, y el ODS 13, que busca combatir el cambio climático y sus impactos.

En este contexto, las directrices promueven el uso de tecnologías innovadoras y materiales sostenibles en la construcción de carreteras y otras infraestructuras. El asfalto modificado con aditivos, como emulsiones catiónicas, cal y cemento, se destaca como una solución eficiente para reducir el impacto ambiental asociado con la construcción y el mantenimiento de carreteras. Estos aditivos no solo mejoran las propiedades mecánicas del asfalto, haciendo que las carreteras sean más duraderas y resistentes al tráfico pesado y a las condiciones climáticas extremas, sino que también disminuyen la necesidad de reparaciones frecuentes, lo que reduce el consumo de recursos y las emisiones derivadas de las obras de mantenimiento.

Además, las directrices de la ONU promueven la implementación de un enfoque de ciclo de vida en la construcción de infraestructuras, lo que implica considerar el impacto ambiental de los materiales desde su producción hasta su disposición final. Al utilizar mezclas asfálticas modificadas, se logra una reducción significativa en las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, ya que se optimiza el uso de recursos y se prolonga la vida útil de los pavimentos.

- **Normas EN (European Norms):** En Europa, las Normas EN proporcionan especificaciones técnicas detalladas para los materiales utilizados en la construcción de infraestructuras viales. La norma EN 13108-1 regula las especificaciones de las mezclas asfálticas, estableciendo requisitos para el uso de aditivos como emulsiones catiónicas para mejorar la durabilidad y la sostenibilidad de los pavimentos (CEN, 2017).

Las Normas EN son un conjunto de regulaciones europeas desarrolladas por el Comité Europeo de Normalización (CEN), que tienen como objetivo armonizar las especificaciones técnicas entre los Estados miembros de la Unión Europea. Estas normas son para garantizar la calidad, seguridad y eficiencia de las infraestructuras construidas dentro del continente. En el ámbito de las infraestructuras viales, las Normas EN aseguran que los materiales utilizados, como las mezclas asfálticas, cumplan con los más altos



estándares de durabilidad y rendimiento, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y de tráfico que enfrentan las carreteras europeas.

La EN 13108-1 es una de las normativas más relevantes para la construcción de pavimentos asfálticos, ya que establece los requisitos técnicos que deben cumplir las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras. Esta norma incluye el uso de aditivos como las emulsiones cationicas, que mejoran la cohesión y la resistencia de los pavimentos. Al utilizar estos aditivos, se logra un mejor desempeño de las mezclas asfálticas, lo que se traduce en mayor durabilidad y menores costos de mantenimiento a lo largo de la vida útil del pavimento. Además, las emulsiones cationicas contribuyen a la sostenibilidad de las infraestructuras al reducir el consumo de asfalto virgen y disminuir el impacto ambiental asociado con la producción y transporte de materiales.

Otro aspecto clave de las Normas EN es su alineación con las directivas de la Unión Europea en cuanto a sostenibilidad y mitigación del cambio climático. Las especificaciones de la EN 13108-1 se centran no solo en garantizar que las carreteras sean duraderas y resistentes, sino también en que el proceso de construcción y mantenimiento de las infraestructuras minimice la huella de carbono y el uso de recursos no renovables. Esto está en línea con los compromisos ambientales de la UE, que buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la adopción de tecnologías más limpias y eficientes.

- Convenio de París sobre el Cambio Climático (2015): Aunque no es una normativa específica para la construcción de carreteras, el Acuerdo de París establece compromisos de los países para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, la construcción de infraestructuras sostenibles, como el uso de mezclas asfálticas modificadas, juega un papel importante en el cumplimiento de estos objetivos. El uso de tecnologías que prolongan la vida útil de los pavimentos y reducen la necesidad de reparaciones frecuentes contribuye directamente a la reducción de la huella de carbono de los proyectos de infraestructura (ONU, 2015).

El Acuerdo de París, adoptado en 2015, es un pacto global que tiene como objetivo principal mantener el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de 2 °C respecto a los niveles preindustriales, y realizar esfuerzos para limitar este aumento a 1.5 °C. Para cumplir con estos compromisos, los países firmantes deben implementar políticas que reduzcan sus emisiones de gases de efecto invernadero, lo que incluye todos los sectores, incluido el de la construcción de infraestructuras.

En el contexto de las infraestructuras viales, las tecnologías que promueven la sostenibilidad para ayudar a cumplir los compromisos del Acuerdo de París. Uno de los enfoques clave es la utilización de mezclas asfálticas modificadas, que incluyen aditivos como emulsiones catiónicas, cal y cemento, que mejoran las propiedades mecánicas de los pavimentos, haciéndolos más duraderos y resistentes a las condiciones climáticas extremas y al tráfico pesado. Al prolongar la vida útil de los pavimentos, se reduce la necesidad de reparaciones frecuentes, lo que disminuye el consumo de materiales nuevos, energía y recursos, reduciendo a su vez las emisiones de carbono.

Además, el proceso de fabricación y mantenimiento de carreteras tiene una huella de carbono significativa debido a la producción de materiales, transporte y las obras de construcción y reparación. El uso de tecnologías avanzadas que minimicen estas intervenciones y optimicen el rendimiento de los pavimentos permite reducir el impacto ambiental. Por ejemplo, estudios han demostrado que las mezclas asfálticas modificadas pueden disminuir las emisiones de CO₂ hasta en un 30% al reducir las necesidades de mantenimiento y los costos asociados (Silva et al., 2020).

Uno de los mayores retos en la implementación de normativas tanto a nivel nacional como internacional es garantizar el cumplimiento estricto de las especificaciones técnicas por parte de los contratistas. A menudo, las empresas constructoras se enfrentan a presiones económicas que las llevan a utilizar materiales de menor calidad, lo que puede comprometer la durabilidad de los pavimentos y aumentar los costos de mantenimiento a largo plazo. En este sentido, el cumplimiento de las normas legales es esencial para asegurar que los proyectos de infraestructura vial sean sostenibles y rentables.

Asimismo, el monitoreo constante y las inspecciones regulares por parte de las autoridades nacionales e internacionales son fundamentales para garantizar que las obras viales cumplan con los estándares de calidad y sostenibilidad. En Colombia, el INVIAS tiene la responsabilidad de asegurar que los materiales utilizados en la construcción de carreteras cumplan con las normas establecidas en la Resolución 4150 de 1999, mientras que, en Europa y Estados Unidos, organismos como la ASTM y AASHTO realizan funciones similares para garantizar la calidad de las infraestructuras.

La norma del INVIAS MEZCLA ASFÁLTICA NATURAL 442P – Artículo 442P – 17 en Colombia forma parte de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), entidad encargada de regular la infraestructura vial en el país. Este artículo se enfoca en las mezclas asfálticas naturales, un tipo de material utilizado en la construcción y mantenimiento de vías. La norma establece los requisitos técnicos para el uso de mezclas asfálticas naturales, que son materiales bituminosos compuestos por agregados pétreos y asfalto natural (por ejemplo, asfalto de lago o roca asfáltica). Incluye Procesos de colocación, compactación y control de calidad durante la construcción, Temperaturas adecuadas para el mezclado y extendido del material. La norma Aplica para proyectos viales donde se requiera este tipo de mezcla, especialmente en capas de rodadura o bases.

Finalmente podemos inferir que el marco legal que regula el uso de mezclas asfálticas modificadas con emulsiones cationicas, cal y cemento está orientado a garantizar que las infraestructuras viales sean seguras, duraderas y sostenibles. Tanto en Colombia como a nivel internacional, las normativas buscan promover el uso de tecnologías innovadoras que prolonguen la vida útil de los pavimentos y reduzcan el impacto ambiental de la construcción de carreteras. El cumplimiento de estas normas es fundamental para asegurar que las infraestructuras viales no solo respondan a las necesidades del tráfico moderno, sino que también contribuyan a los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de emisiones.

Tabla 2. *Referentes normativos del estudio*

Norma / Ley	Entidad emisora	Propósito en la investigación
Ley 105 de 1993	Congreso de Colombia	Establece principios de sostenibilidad y eficiencia en el transporte.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Resolución 4150 de 1999	INVIAS	Define especificaciones técnicas para mezclas asfálticas.
INV E-622-13	INVIAS	Ensayo de inmersión–compresión para evaluar resistencia a la humedad.
INV E-725-13	INVIAS	Ensayo de tracción indirecta para evaluar resistencia mecánica.
INV E-732-13	INVIAS	Ensayo para determinar contenido de asfalto en mezclas.
NTC 174	ICONTEC	Establece requisitos técnicos para materiales viales.
ASTM D6373	ASTM	Especificaciones para aglutinantes asfálticos de alto rendimiento.
AASHTO M140 / M208	AASHTO	Normas sobre emulsiones asfálticas tradicionales y modificadas.
Directiva 2004/18/CE	Unión Europea	Promueve sostenibilidad en contratación pública de obras.
Convenio de París (2015)	ONU	Incentiva el uso de tecnologías que reduzcan emisiones contaminantes en proyectos de infraestructura vial.

5. ESTADO DEL ARTE

La evolución de las tecnologías empleadas en la construcción de infraestructuras viales ha estado marcada por la creciente necesidad de garantizar la durabilidad, sostenibilidad y eficiencia de los pavimentos. En este contexto, el uso de mezclas asfálticas modificadas con aditivos como emulsiones cationicas, cal y cemento ha cobrado relevancia en las últimas décadas, ofreciendo soluciones viables para mejorar las propiedades mecánicas del asfalto y reducir el impacto ambiental de las carreteras (González y Mendieta, 2018; Silva et al., 2020). Este estado del arte aborda la evolución de las tecnologías aplicadas a las mezclas asfálticas modificadas y presenta un análisis de los principales estudios que han fundamentado el desarrollo de esta tecnología en el ámbito de las infraestructuras viales.

Desde mediados del siglo XX, la evolución de las mezclas asfálticas ha sido objeto de numerosos estudios. En un principio, se empleaban ampliamente mezclas asfálticas convencionales para la construcción de carreteras y otras obras viales. No obstante, su rendimiento frente a condiciones exigentes, como el tráfico intenso y los climas extremos, solía ser insuficiente. Esto provocaba problemas frecuentes como la aparición de grietas, deformaciones permanentes y fatiga del material, lo cual acortaba la vida útil de las vías y elevaba los costos de mantenimiento. Como respuesta a estas dificultades, surgió la necesidad de innovar en tecnologías que fortalecieran las características del asfalto y prolongaran su durabilidad.



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

Uno de los hitos más importantes en este campo fue la introducción de aditivos que mejoran las propiedades del asfalto. Entre los más destacados se encuentran las emulsiones catiónicas, la cal y el cemento, que han revolucionado la forma en que se diseñan y utilizan las mezclas asfálticas en infraestructuras viales. Estos aditivos han demostrado ser efectivos para aumentar la resistencia a la fatiga, la resistencia a la deformación plástica y la resistencia al envejecimiento, lo que es para carreteras que deben soportar un tráfico constante y condiciones climáticas severas (Paterson et al., 2009; Oliveira, 2004).

Las emulsiones catiónicas, por ejemplo, han sido ampliamente utilizadas para mejorar la adhesión entre los agregados y el aglutinante asfáltico, lo que aumenta la cohesión de la mezcla y reduce la probabilidad de desprendimiento y fisuración. Las emulsiones catiónicas, al ser de carga positiva, se adhieren más fácilmente a los agregados de carga negativa, lo que mejora la resistencia a la humedad y prolonga la vida útil del pavimento (González et al., 2018). Esto es particularmente importante en climas donde las condiciones de humedad son constantes, ya que el agua es uno de los principales factores que contribuyen a la degradación de los pavimentos.

Por otro lado, el uso de cal en las mezclas asfálticas tiene una larga historia como estabilizador de suelos, pero en la actualidad también se utiliza para mejorar la resistencia a la humedad y la tracción indirecta de las mezclas asfálticas. La cal actúa al modificar las propiedades químicas de los agregados y del asfalto, reduciendo la susceptibilidad del pavimento al daño causado por el agua. Este efecto ha sido especialmente valioso en regiones con climas húmedos, donde las carreteras tradicionalmente han sufrido un deterioro más rápido debido a la infiltración de agua (Ashford et al., 2019).

En cuanto al cemento, su incorporación en las mezclas asfálticas ha permitido mejorar la rigidez y la resistencia a la compresión de las carreteras. El cemento forma enlaces fuertes y rígidos con los agregados, lo que aumenta la capacidad de la mezcla para resistir las cargas pesadas sin deformarse ni agrietarse. En carreteras que experimentan un tráfico constante de vehículos pesados, como camiones, que pueden generar deformaciones significativas en los pavimentos convencionales (González y Mendieta, 2018). Además, la rigidez adicional proporcionada por el

cemento ayuda a reducir la deformación plástica a largo plazo, lo que minimiza la necesidad de reparaciones frecuentes y disminuye los costos de mantenimiento.

Estas tecnologías no solo han permitido una mejora en el rendimiento de las infraestructuras viales, sino que también han reducido los costos de mantenimiento a largo plazo. El uso de aditivos ha demostrado ser una solución eficaz para prolongar la vida útil de los pavimentos, lo que reduce la necesidad de intervenciones frecuentes, como el reparcheo o la reconstrucción de tramos de carretera. Esto no solo tiene un impacto positivo en los costos directos de mantenimiento, sino que también reduce los costos indirectos asociados con las interrupciones del tráfico y el tiempo de inactividad de las carreteras (Paterson et al., 2009).

Además, la reducción de las reparaciones necesarias tiene un impacto significativo en la sostenibilidad de los proyectos de infraestructura vial. Al disminuir la frecuencia de las intervenciones y el uso de nuevos materiales, se reduce el consumo de recursos naturales y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción y el transporte de materiales para las reparaciones. Esto es especialmente importante en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los esfuerzos globales por reducir el impacto ambiental de la construcción y el mantenimiento de infraestructuras (ONU, 2015).

Las emulsiones catiónicas son uno de los aditivos más utilizados en la mejora de las mezclas asfálticas debido a su capacidad para incrementar la durabilidad de los pavimentos. Su carga eléctrica positiva interactúa con los agregados de carga negativa, facilitando una adhesión más fuerte y efectiva entre los componentes del pavimento (González et al., 2018; Parker, 2001). Este proceso de adhesión es fundamental para garantizar que los agregados se mantengan firmemente unidos, lo que mejora la integridad estructural del pavimento y reduce la probabilidad de desprendimiento o descomposición prematura, problemas comunes en mezclas asfálticas convencionales.

Estudios como los de Henderson (1992) y Miller et al. (1991) han subrayado la efectividad de las emulsiones catiónicas para mejorar la resistencia a la humedad y la cohesión interna de las mezclas asfálticas. La humedad es uno de los principales factores de deterioro en los pavimentos, ya que el agua puede penetrar en la estructura de la carretera, debilitando la

adhesión entre los agregados y el aglutinante asfáltico. Las emulsiones catiónicas resuelven este problema al mejorar la adhesión, lo que hace que los pavimentos sean más resistentes a la infiltración de agua. Como resultado, se reduce significativamente la deformación plástica, que ocurre cuando el pavimento se deforma de manera irreversible bajo cargas repetidas. Además, disminuye el desgaste por fatiga, que es el deterioro acumulativo del pavimento causado por el paso constante de vehículos, especialmente en carreteras de alto tráfico.

Desde una perspectiva práctica, diversos estudios han evidenciado que las emulsiones catiónicas no solo optimizan las características mecánicas del pavimento, sino que también extienden su durabilidad. Un informe reciente de INVIAS (2021) resaltó que la implementación de emulsiones catiónicas en la construcción de la Autopista del Sol en Colombia permitió disminuir en un 30% los gastos de mantenimiento durante los primeros cinco años de funcionamiento. Este beneficio económico se atribuye a la capacidad de estas emulsiones para fortalecer la cohesión entre los agregados y el asfalto, lo cual minimiza la aparición de grietas y desprendimientos prematuros, fallas que normalmente requieren intervenciones costosas para preservar la calidad del pavimento.

Las emulsiones catiónicas también son eficaces para prolongar la durabilidad de los pavimentos en climas donde la humedad y los cambios de temperatura son factores críticos. En zonas donde se producen ciclos de congelación y descongelación, las mezclas asfálticas pueden sufrir daños importantes debido a la expansión y contracción del agua dentro del pavimento. Las emulsiones catiónicas ayudan a prevenir estos daños al mejorar la cohesión interna de las mezclas, lo que les permite resistir mejor las variaciones extremas de temperatura y mantener su integridad estructural por más tiempo (Parker, 2001).

En cuanto al impacto económico, el uso de emulsiones catiónicas no solo reduce los costos directos asociados con la reparación y mantenimiento de las carreteras, sino que también minimiza las interrupciones en el tráfico, que son comunes cuando se realizan trabajos de mantenimiento. Esto se traduce en una mejora en la eficiencia operativa de las carreteras y una reducción de los costos indirectos relacionados con el tiempo de inactividad del tráfico (González et al., 2018).

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

El uso de cal en mezclas asfálticas tiene una larga trayectoria en la ingeniería vial, debido a su eficacia tanto como estabilizador de suelos como en la mejora de las propiedades de las mezclas asfálticas. La cal, al interactuar con los minerales presentes en los suelos y agregados, forma compuestos estables que incrementan la cohesión interna de la mezcla asfáltica, lo que a su vez reduce significativamente la susceptibilidad del pavimento a la acción del agua (Ashford et al., 2019). Esta característica es especialmente importante en regiones donde la humedad es un factor crítico, ya que la infiltración de agua es una de las principales causas de deterioro prematuro en los pavimentos.

Uno de los principales beneficios del uso de cal en las mezclas asfálticas es su capacidad para mejorar la resistencia a la deformación plástica. La deformación plástica se produce cuando las cargas repetitivas del tráfico pesado causan una deformación permanente en el pavimento. Al mejorar la cohesión interna de la mezcla, la cal reduce la capacidad del pavimento para sufrir este tipo de deformaciones, lo que se traduce en una vida útil más prolongada y en una menor necesidad de mantenimiento.

Tabla 3. Comparativa técnica de investigaciones sobre aditivos en mezclas asfálticas

Mezcla y contexto experimental	Aditivos evaluados	Ensayos empleados	Resultados cuantitativos y observaciones
Emulsiones modificadas con caucho reciclado en capas MDC-19 y MDC-10	Emulsión CRL-1 y CRR-1 con caucho	Ensayo de corte entre capas	Incremento en la resistencia al corte entre capas, mejorando la adherencia interlaminar
Asfalto modificado en clima húmedo con estabilización mineral	Cal hidratada	Tracción indirecta y módulo resiliente	Aumento en cohesión y módulo, con mejor desempeño bajo humedad
Mezcla con residuos industriales en zonas áridas	Escoria de cobre y RAP	Ensayo Marshall, tracción indirecta, módulo resiliente	Mejora estructural significativa sin afectar la trabajabilidad
Pavimento con insumos reciclados para reducción ambiental	Material reciclado en mezcla	Análisis de ciclo de vida (LCA)	Disminución en impacto ambiental total, reducción de la huella de carbono
Mezclas drenantes modificadas para entornos tropicales	Fibra sintética y cal	Ensayo de permeabilidad y compresión uniaxial	Mayor durabilidad en zonas húmedas, resistencia mejorada frente a deformación y erosión interna

Fuente: elaboración propia

Además de su capacidad para reducir la deformación, la cal también mejora la resistencia a la humedad de las mezclas asfálticas. Los pavimentos expuestos a condiciones de alta humedad o lluvias intensas suelen ser más propensos al desprendimiento y la fisuración, ya que el agua reduce la adherencia entre los agregados y el asfalto. La cal ayuda a mitigar estos efectos al reaccionar con los componentes del suelo y los agregados, formando compuestos que son menos propensos a ser debilitados por el agua. Esto ha sido ampliamente documentado en estudios como los de Gudmundsson (2010), que destacan la capacidad de la cal para mejorar la resistencia a la tracción indirecta y la fatiga, lo que es particularmente beneficioso en climas húmedos.

Los estudios han demostrado que la adición de cal a las mezclas asfálticas es especialmente eficaz en condiciones climáticas extremas. Por ejemplo, en México, la aplicación de mezclas asfálticas modificadas con cal permitió una reducción significativa del 20% en las deformaciones plásticas en carreteras sometidas a condiciones climáticas adversas (Pérez et al., 2000). Estos resultados indican que la cal no solo mejora las propiedades mecánicas de la mezcla, sino que también prolonga su durabilidad en ambientes donde las temperaturas extremas y la humedad aceleran el desgaste de los pavimentos convencionales.

Otra ventaja clave de la cal es su contribución a la resistencia a la fatiga. Las carreteras sometidas a tráfico pesado suelen desarrollar fisuras debido a la fatiga acumulada con el paso del tiempo, especialmente en las capas superficiales del pavimento. Al mejorar la cohesión y la resistencia interna de las mezclas asfálticas, la cal ayuda a reducir la aparición de estas fisuras, lo que a su vez disminuye los costos de mantenimiento y aumenta la vida útil del pavimento. Esto ha llevado a que el uso de cal sea una práctica estándar en la construcción de carreteras en regiones con condiciones climáticas extremas o con tráfico constante y pesado (Ashford et al., 2019).

El cemento es un aditivo que ha demostrado ser eficaz para mejorar la rigidez y resistencia de las mezclas asfálticas, posicionándose como una alternativa valiosa en proyectos de infraestructura vial que requieren durabilidad a largo plazo. Aunque tradicionalmente el cemento se ha utilizado en la construcción de pavimentos de concreto, su aplicación en mezclas asfálticas ha ganado popularidad en las últimas décadas debido a su capacidad para mejorar las

propiedades mecánicas del pavimento, especialmente en carreteras sometidas a tráfico pesado (Pérez y Silva, 2018).

Uno de los principales beneficios del uso de cemento en mezclas asfálticas es su capacidad para aumentar la resistencia a la compresión. El cemento actúa formando enlaces fuertes entre los agregados, lo que refuerza la estructura interna de la mezcla asfáltica, haciéndola más resistente a las cargas verticales impuestas por el tráfico de vehículos pesados. En un estudio realizado por Gudmundsson (2010), se observó que la adición de cemento en las mezclas asfálticas aumentaba en un 18% la resistencia a la compresión, lo que indica una mayor capacidad del pavimento para soportar cargas extremas sin sufrir deformaciones significativas.

Este aumento en la resistencia a la compresión es especialmente útil en regiones con tráfico pesado, donde las cargas repetitivas tienden a acelerar el deterioro de los pavimentos. Los vehículos de carga, como camiones y autobuses, generan tensiones importantes sobre las carreteras, lo que provoca deformaciones plásticas y el eventual desarrollo de fisuras en la superficie del pavimento. La inclusión de cemento en las mezclas asfálticas ayuda a mitigar estos problemas al aumentar la rigidez de la mezcla y, por lo tanto, su capacidad para soportar las cargas repetitivas sin que se presenten deformaciones permanentes (Parker, 2001).

Además de su capacidad para mejorar la resistencia a la compresión, el cemento también ha demostrado ser eficaz para aumentar la resistencia a la fatiga de los pavimentos asfálticos. La fatiga es un proceso de deterioro gradual que ocurre cuando los pavimentos están sometidos a cargas repetitivas durante largos periodos de tiempo, lo que eventualmente conduce a la aparición de fisuras y grietas. El uso de cemento como aditivo en las mezclas asfálticas refuerza la estructura interna de la mezcla, lo que reduce la propagación de fisuras y mejora la capacidad del pavimento para resistir el daño por fatiga.

En cuanto a la aplicación práctica, diversos estudios han documentado los beneficios del uso de cemento en infraestructuras de tráfico pesado. En países como Brasil, por ejemplo, se ha utilizado cemento en la construcción de carreteras de alto tráfico con excelentes resultados. Un estudio realizado en São Paulo mostró que la adición de cemento en las mezclas asfálticas

mejoró la resistencia a la fatiga en un 25%, lo que permitió una reducción significativa en los costos de mantenimiento a lo largo de un período de cinco años (Silva et al., 2019).

La durabilidad de las infraestructuras viales es uno de los objetivos principales de los ingenieros civiles y planificadores de transporte. A lo largo de los años, se han desarrollado diversas tecnologías para mejorar el desempeño de los pavimentos y asegurar su durabilidad, siendo el uso de aditivos en mezclas asfálticas una de las estrategias más eficaces para prolongar la vida útil de los pavimentos y reducir los costos de mantenimiento. Esta mejora en la durabilidad no solo beneficia la economía de los proyectos de infraestructura, sino que también tiene un impacto positivo en la sostenibilidad de las obras, al disminuir la necesidad de intervenciones repetitivas y el consumo de materiales (Ashford et al., 2020).

Uno de los desafíos más importantes en la construcción de carreteras es garantizar que los pavimentos resistan el envejecimiento causado por factores ambientales, como la exposición a los rayos ultravioleta (UV) y la oxidación. Estos factores degradan las propiedades del asfalto con el tiempo, lo que puede llevar a un pavimento frágil y propenso a fisuras y fallas estructurales prematuras. Estudios recientes han señalado que el uso de emulsiones catiónicas y cemento en las mezclas asfálticas mejora significativamente la resistencia al envejecimiento. Las emulsiones catiónicas actúan como agentes protectores, mejorando la cohesión interna de la mezcla y evitando que el asfalto se degrade rápidamente por la exposición a los rayos UV (Miller et al., 1991; Puertas y Pascal, 2007). Por su parte, el cemento añade rigidez a la mezcla, lo que disminuye la susceptibilidad al envejecimiento y mejora la resistencia a la deformación bajo cargas repetitivas.

Un estudio realizado por Silva et al. (2020) mostró que las mezclas asfálticas modificadas con emulsiones catiónicas y cemento tienen una tasa de envejecimiento un 12% menor que las mezclas convencionales. Este resultado es significativo, ya que implica que los pavimentos construidos con estas mezclas requieren menos intervenciones de mantenimiento durante su ciclo de vida, lo que no solo prolonga su durabilidad, sino que también reduce los costos asociados con las reparaciones. Este tipo de innovación resulta especialmente valioso en zonas donde el tráfico pesado y las condiciones climáticas adversas pueden acelerar el deterioro de las infraestructuras viales.

La sostenibilidad de las infraestructuras viales también se ve directamente influenciada por la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero durante las fases de construcción y mantenimiento de las carreteras. La producción de asfalto y las obras de mantenimiento son actividades que tradicionalmente generan altas emisiones de CO₂, debido al consumo energético necesario para la producción de materiales y el transporte de estos. Sin embargo, varios estudios han resaltado que el uso de mezclas asfálticas modificadas puede reducir hasta en un 25% las emisiones asociadas con la producción de asfalto y la frecuencia de las reparaciones (González y Mendieta, 2018; Silva et al., 2020). Al utilizar aditivos como las emulsiones catiónicas y el cemento, se consigue una mezcla más duradera, lo que minimiza la necesidad de reparaciones frecuentes y reduce el consumo de asfalto nuevo, generando un menor impacto ambiental.

Esta reducción de emisiones es particularmente relevante en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático, que exigen acciones concretas para mitigar el impacto ambiental de la infraestructura de transporte (ONU, 2015). En un entorno donde las emisiones de carbono deben reducirse drásticamente para combatir el cambio climático, la adopción de tecnologías que mejoren la eficiencia y sostenibilidad de los pavimentos es clave. Las mezclas asfálticas modificadas con aditivos no solo mejoran la calidad de las infraestructuras, sino que también contribuyen a los esfuerzos globales por reducir la huella de carbono y fomentar prácticas más respetuosas con el medio ambiente.

El avance de las tecnologías en la construcción de carreteras ha permitido el desarrollo de nuevas formulaciones de mezclas asfálticas modificadas que no solo mejoran la resistencia y durabilidad de los pavimentos, sino que también son más amigables con el medio ambiente. Entre las innovaciones más destacadas en este campo se encuentran el uso de asfalto reciclado y asfalto modificado con polímeros, tecnologías que buscan aprovechar los materiales existentes y reducir la dependencia de recursos vírgenes, alineándose con los objetivos de sostenibilidad (Paterson et al., 2009).

El asfalto reciclado se ha convertido en una opción viable para la construcción de carreteras sostenibles. Este método permite reutilizar los materiales de pavimentos viejos, lo que reduce el

consumo de recursos naturales y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de asfalto nuevo. El proceso consiste en recuperar el asfalto desgastado de las carreteras antiguas y reprocesarlo para ser reincorporado en nuevas mezclas asfálticas. Además de disminuir la cantidad de residuos de construcción, el asfalto reciclado reduce la extracción de materiales vírgenes y el consumo energético (Oliveira, 2004).

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de asfalto reciclado, combinado con aditivos como emulsiones catiónicas y cemento, puede mejorar significativamente las propiedades de las mezclas asfálticas sin comprometer su durabilidad. Por ejemplo, Puertas y Pascal (2007b) encontraron que las mezclas que contienen asfalto reciclado muestran un desempeño similar al de las mezclas asfálticas convencionales, con la ventaja de ser más sostenibles. Este enfoque ha sido particularmente beneficioso en países que buscan minimizar el impacto ambiental de sus infraestructuras, permitiendo la construcción de carreteras más sostenibles y económicas sin sacrificar la calidad de los pavimentos.

Por otro lado, el asfalto modificado con polímeros ha demostrado ser una solución eficaz para mejorar la resistencia a la deformación y la fatiga de los pavimentos, especialmente en regiones con condiciones climáticas extremas. Los polímeros aumentan la elasticidad del asfalto, lo que le permite resistir mejor las cargas cíclicas y las variaciones de temperatura que pueden dañar los pavimentos. Al añadir polímeros, el asfalto puede soportar cambios significativos en la temperatura sin agrietarse o deformarse, lo que es especialmente importante en zonas donde los ciclos de congelación y descongelación son frecuentes (Henderson, 1992).

En un estudio reciente, Ashford et al. (2020) encontraron que el uso de asfalto modificado con polímeros redujo en un 15% las deformaciones plásticas en carreteras expuestas a tráfico pesado. Esta tecnología ha demostrado ser particularmente útil en autopistas y otras infraestructuras sometidas a altos volúmenes de tráfico, donde la resistencia a la deformación es crítica para garantizar una larga vida útil del pavimento. Los polímeros también mejoran la resistencia a la fatiga de los pavimentos, lo que reduce la aparición de grietas y fisuras causadas por el paso constante de vehículos pesados.

Además de los beneficios técnicos, el uso de polímeros y asfalto reciclado tiene un impacto positivo en la sostenibilidad de los proyectos de infraestructura vial. Al reducir la necesidad de materiales nuevos, estas tecnologías disminuyen la huella de carbono de las carreteras, lo que contribuye a los esfuerzos globales por mitigar el cambio climático. Asimismo, la durabilidad mejorada de los pavimentos significa que requieren menos intervenciones de mantenimiento a lo largo de su ciclo de vida, lo que también reduce las emisiones y los costos operativos.

El uso de mezclas asfálticas modificadas se ha expandido a nivel mundial, ofreciendo soluciones efectivas para mejorar la durabilidad y resistencia de los pavimentos en diversos entornos geográficos y climáticos. Estas mezclas, enriquecidas con aditivos como emulsiones catiónicas, cal y cemento, han demostrado ser una herramienta clave para afrontar los desafíos de tráfico pesado y condiciones climáticas adversas, que suelen acelerar el deterioro de las infraestructuras viales.

En España, uno de los casos más destacados es el proyecto de rehabilitación de la carretera A-6, en el que se implementaron mezclas asfálticas modificadas con emulsiones catiónicas. Los resultados fueron notables, con una mejora del 25% en la resistencia a la fatiga del pavimento. Esto se tradujo en una mayor capacidad de la carretera para soportar el tráfico pesado sin sufrir fisuras ni deformaciones prematuras (Fernández & Álvarez, 2019). La resistencia a la fatiga en infraestructuras sometidas a volúmenes constantes de vehículos pesados, ya que el daño por fatiga suele ser una de las principales causas de deterioro en las carreteras. Además de mejorar la resistencia, estas mezclas permitieron extender significativamente la vida útil de la carretera, reduciendo las necesidades de mantenimiento a corto plazo.

En estudios previos, similares se encuentran en Colombia, donde el uso de mezclas asfálticas modificadas con emulsiones catiónicas en la Autopista del Sol permitió reducir los costos de mantenimiento en un 30% durante los primeros cinco años de operación (INVIAS, 2021). Este tipo de ahorro es significativo, no solo en términos económicos, sino también en la minimización de interrupciones al tráfico, un factor que afecta tanto a la eficiencia del transporte como a la calidad de vida de los usuarios. La reducción de la frecuencia de las intervenciones de mantenimiento también implica una menor huella ambiental, alineándose con los objetivos de sostenibilidad ambiental.

En Asia, el uso de mezclas asfálticas modificadas ha sido especialmente útil en regiones con climas extremos, como el sudeste asiático, donde las fuertes lluvias y la humedad constante son factores que aceleran el deterioro de los pavimentos. En un estudio realizado por Kim & Lee (2020), se observó que las carreteras construidas con mezclas asfálticas modificadas con emulsiones catiónicas y cemento mostraron una mayor resistencia al desprendimiento y una reducción significativa en las fisuras causadas por la acción del agua. Este tipo de daño es común en regiones con precipitaciones intensas, donde la infiltración de agua en las capas del pavimento puede debilitar su cohesión interna, llevando al desprendimiento de los agregados y a una rápida degradación del pavimento.

Según lo anterior, podemos inferir que el uso de mezclas asfálticas modificadas ha revolucionado el sector de la construcción vial, permitiendo el desarrollo de infraestructuras más duraderas, sostenibles y resistentes a las condiciones adversas. Los avances en el uso de emulsiones catiónicas, cal y cemento han mejorado significativamente las propiedades mecánicas de los pavimentos, lo que se traduce en una mayor vida útil y menores costos de mantenimiento. Además, estas tecnologías contribuyen a la reducción del impacto ambiental asociado con la construcción y el mantenimiento de carreteras, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y mitigación del cambio climático (ONU, 2015).

Un estudio realizado por Rondón & Reyes (2012), denominado evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfaltita concluye que; las mezclas asfálticas modificadas con asfaltita tienden a poseer un comportamiento rígido en climas cálidos, puesto que a bajas temperaturas estas mezclas pueden ser frágiles. Los valores de estabilidad y rigidez Marshall de las mezclas modificadas son mayores para cualquier porcentaje de CA utilizado con adición de asfaltita, en comparación con la mezcla convencional. Así mismo, los módulos de las mezclas modificadas son superiores a aquellos alcanzados por las convencionales, y los mayores incrementos se obtienen cuando la temperatura del ensayo aumenta. Finalmente se puede evidenciar que la asfaltita como modificador de asfaltos puede ser un material que mejore las características de rigidez y resistencia a las deformaciones permanentes de mezclas que sean utilizadas en climas cálidos.

Si bien diversos estudios han descrito los efectos individuales de aditivos como la cal, el cemento y la emulsión catiónica en mezclas asfálticas convencionales, persiste una ausencia de análisis



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

orientados a combinaciones específicas sobre asfaltita natural en contextos climáticos variables y con metodologías normalizadas. Las investigaciones revisadas, centradas en propiedades aisladas o en condiciones experimentales no comparables, no han explorado configuraciones que integren simultáneamente estos tres componentes en formulaciones adaptadas a materiales disponibles localmente. Esta ausencia de referencias aplicadas a diseños compuestos con asfaltita justifica la necesidad de ensayos que permitan evaluar el comportamiento mecánico y la estabilidad frente a factores ambientales utilizando protocolos técnicos nacionales como los definidos por el INVIAS.

6. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio se estructuró en dos etapas principales:

1. Etapa teórica
2. Etapa experimental

En la etapa teórica, se conceptualizaron temas relacionados con las mezclas de asfalto natural y mezclas modificadas con adición de emulsión asfáltica, cal y cemento; así como los métodos de diseño y los requisitos exigidos por la normativa INVIAS. También se definieron los ensayos de laboratorio a realizar, el número de briquetas a ensayar y las proporciones de cada uno de los materiales utilizados.

En cuanto a la etapa experimental, se inició con la caracterización de los materiales empleados para la elaboración de la mezcla asfáltica natural. Se caracterizó la asfaltita tal como fue extraída de la mina, determinando su contenido de asfalto y su clasificación granulométrica. Con base en estos resultados, se procedió a la adición de emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento y de los agregados pétreos requeridos, siguiendo las especificaciones técnicas del INVIAS. Posteriormente, se aplicó el método de inmersión-compresión (INV E-622-13) para determinar el contenido óptimo de emulsión.

Una vez establecido el diseño de mezcla óptimo con la adición de emulsión CRL y, si fue necesario, agregados adicionales, se incorporaron cal y cemento en diferentes proporciones, asegurando que la granulometría permaneciera dentro de las franjas estipuladas por el INVIAS.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

Finalmente, las probetas elaboradas se evaluaron mediante el ensayo de susceptibilidad al agua para mezclas de concreto asfáltico, utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725-13).

6.1 Preparación de las muestras

Las muestras se prepararon según lo indicado en el método de ensayo de Inmersión – compresión (INV E-622-13); que inició con la selección y almacenamiento de los materiales en condiciones controladas. La asfaltita se secó previamente para eliminar la humedad superficial, mientras que los agregados pétreos se clasificaron por tamaño mediante tamizado manual. Posteriormente, se realizó el mezclado de los componentes en caliente a una temperatura de 60°C. Primero se incorporó la asfaltita con los agregados y, una vez alcanzada una temperatura uniforme, se adicionaron la emulsión catiónica, la cal y el cemento. La mezcla se homogeneizó manualmente en recipientes metálicos, asegurando una distribución uniforme de los aditivos. Las probetas se moldearon utilizando un sistema de compactación estática mediante prensa hidráulica, aplicando presión constante hasta conformar cilindros con dimensiones compatibles con los ensayos requeridos.

6.2 Condiciones de curado

Las probetas se sometieron a un proceso de curado en ambiente cerrado, con temperatura y humedad controladas. El propósito de esta etapa fue garantizar la reacción adecuada de los conglomerantes y la estabilización interna de la mezcla. Durante el curado, las muestras permanecieron almacenadas sobre bandejas metálicas, sin contacto directo con la luz solar ni corrientes de aire. En los casos donde se aplicaron ensayos que exigían saturación parcial, se procedió a sumergir las probetas en agua a temperatura ambiente durante un periodo determinado, siguiendo las recomendaciones técnicas para mezclas con contenido de emulsión.

6.3 Número de repeticiones

Se realizaron 6 probetas por contenido de asfalto para asegurar la confiabilidad de los resultados, La repetición de los ensayos permitió identificar posibles variaciones entre probetas elaboradas bajo las mismas condiciones, y facilitó el análisis estadístico de los datos. Esta práctica respondió a la necesidad de validar experimentalmente el comportamiento de las diferentes formulaciones, reduciendo el margen de error asociado a la manipulación manual o a variaciones en el curado.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

6.4 Justificación de los porcentajes de aditivos

Los porcentajes utilizados para la emulsión catiónica, la cal y el cemento se definieron con base en antecedentes técnicos y experiencias documentadas en estudios previos aplicados a mezclas modificadas. La selección se fundamentó en referencias normativas del Instituto Nacional de Vías, así como en literatura especializada sobre estabilización de mezclas en regiones con condiciones climáticas variables. Además, se consideraron criterios de trabajabilidad, cohesión y facilidad de compactación observados durante las pruebas preliminares. La intención fue encontrar un equilibrio entre el desempeño mecánico de la mezcla y su viabilidad técnica en condiciones reales de aplicación.

6.5 Procedimientos de ensayo

Los ensayos de resistencia mecánica se llevaron a cabo conforme a normas técnicas reconocidas, utilizando instrumentos previamente calibrados. Para cada prueba, las probetas se acondicionaron según los lineamientos establecidos, respetando los tiempos de estabilización antes de la aplicación de carga. En el caso de la tracción indirecta, se aplicó una carga diametral de forma progresiva hasta alcanzar la ruptura de la muestra. Para el ensayo de inmersión-compresión, se evaluó el comportamiento de las probetas bajo condiciones de humedad simulada. Cada procedimiento fue registrado en bitácoras de laboratorio, asegurando la trazabilidad de los datos y el control de las variables ambientales durante las pruebas.

6.6 Secuencia experimental

El desarrollo experimental se organizó en etapas consecutivas que permitieron mantener el control sobre cada una de las fases del estudio. Se realizó la caracterización física de los materiales. Luego se llevaron a cabo las mezclas con diferentes proporciones de emulsión y, posteriormente, se integraron los aditivos estabilizantes. Las muestras fueron curadas y almacenadas hasta alcanzar las condiciones requeridas para los ensayos mecánicos. Finalmente, se ejecutaron las pruebas de laboratorio y se recopilaron los resultados para su análisis comparativo. Toda la secuencia se documentó de forma sistemática, lo que facilitó la interpretación técnica de los efectos observados en cada formulación.



7. RESULTADOS

7.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

El análisis inicial se centró en identificar las propiedades técnicas de los materiales en condiciones naturales, lo cual permitió establecer las características esperadas para las mezclas formuladas. La emulsión catiónica tipo CRL fue sometida a ensayos de laboratorio para verificar características como viscosidad, contenido de agua, estabilidad al almacenamiento, contenido de asfalto residual. Estos parámetros resultan fundamentales para definir el grado de adherencia entre los componentes de la mezcla asfáltica. Por otro lado, se examinó la asfaltita, recurso natural extraído de una fuente localizada, que se evaluó en términos de contenido de Bitumen y granulometría. Este último aspecto reveló una desviación respecto a los límites definidos por la norma MAN-19 del INVIAS, motivo por el cual se procedió a incorporar agregados granulares con el objetivo de restituir el equilibrio dentro del intervalo especificado. Estas verificaciones constituyen un paso esencial dentro del proceso de diseño de mezclas, ya que proporcionan información cuantitativa sobre la calidad y compatibilidad de los insumos empleados.

7.1.1 EMULSIÓN ASFÁLTICA

La emulsión asfáltica utilizada corresponde al tipo CRL-1; según las especificaciones técnicas generales del IDU Capítulo 2 Materiales Básicos - Especificación 202-18 correspondientes a emulsiones asfálticas.

Tabla 4. Especificaciones emulsión asfáltica

Ensayo sobre la emulsión	Unidad	Norma Invias	Especificación		Resultado	Verificación
			Min	Máx.		
Viscosidad Saybolt Furol a 50 °C	s	E-763	20	200	20	Cumple
Contenido de agua en volumen	%	E-761	---	43	39	Cumple
Tamizado Retenido Tamiz 20 (850 mm)	%	E-765	---	0,1	0,05	Cumple
PH	---	E-768	---	6	1,5	Cumple
Estabilidad Almacenamiento Sedimentación a los 7 días %	%	E-764	---	5	0,2	Cumple
Destilación Contenido de Asfalto Residual %	%	E-762	57	---	60	Cumple
Contenido de disolventes %	%	E-762	---	3	0	Cumple
Demulsibilidad	%	E-766	---	---	40	Cumple

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Carga Partícula	---	E-767	Positiva	Positiva	Cumple
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE DESTILACIÓN					
Penetración (25 °C ,100g, 5s) - ARD	0,1 mm	E-706	60	100	63,3 Cumple
Penetración (25 °C ,100g, 5s)- ARB	0,1 mm	E-706	100	250	
Ductilidad (25oC,5cm/min)	cm	E-702	40	---	96
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	97,5	---	99,9 Cumple

Fuente: Especificaciones técnicas generales del IDU Capítulo 2 Materiales Básicos - Especificación 202-18

Teniendo en cuenta los ensayos realizados a la muestra de emulsión CRL-1 tenemos que cumple con los criterios estipulados por el INVIAS.

7.1.2 ASFALTITA (ASFALTO NATURAL)

Para la caracterización de la asfaltita se realizó el ensayo (I.N.V. E-732 / 13) MÉTODO A; con el ensayo se busca saber el contenido de asfalto de la muestra en condiciones naturales. La norma indica en la siguiente tabla la masa mínima de la muestra según el tamaño nominal máximo del agregado.

Tabla 5. Tamaño de la muestra según norma INV. E-732

TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO DEL AGREGADO		MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA
mm	pg.	
4.75	No.4	0.5
9.5	3/8"	1.0
12.5	½"	1.5
19.0	¾"	2.0
25.0	1"	3.0
37.5	1-½"	4.0

Fuente: Especificación particular mezcla asfáltica natural ART. 442P

Teniendo en cuenta que el tamaño nominal máximo del agregado encontrado en las muestras de asfaltita en condiciones naturales es 3/8", se opta por generar cada muestra con mínimo un kilogramo de masa. El porcentaje de asfalto en relación con la masa inicial se calcula teniendo en cuenta lo estipulado en la norma técnica del Invias Ecuación 732.5. y la gradación granulométrica debe cumplir con las tolerancias que se indican en la Tabla 442P-2, sin permitir que la curva se salga de la franja adoptada.

Tabla 6. Franjas granulométricas de los agregados combinados para la construcción de capas asfálticas con una mezcla asfáltica natural

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm/ U.S Standard)								
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.36	0.300	0.075
	1½"	1"	¾"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 50	No. 200
	% PASA								
MAN-38	100	80-95	-	62-77	-	45-60	35-50	13-23	3-8
MAN-25	-	100	80-95	-	60-75	47-62	35-50	13-23	3-8
MAN-19	-	-	100	80-95	-	50-65	35-50	13-23	3-8
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	4%						3%	1%	

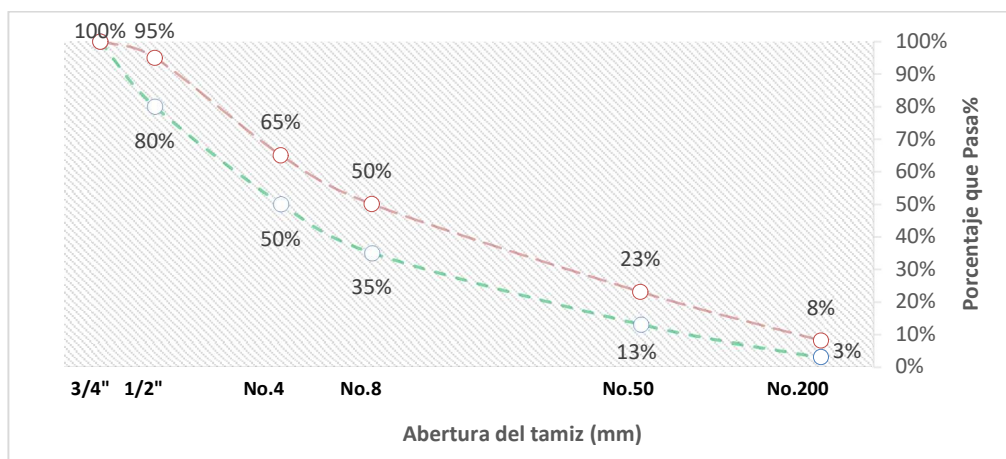
Fuente: Especificación particular mezcla asfáltica natural ART. 442P

Tabla 7. Franjas granulométricas para una MAN-19

Tamiz " (mm)	Curva Inferior %	Curva superior %
¾"	100%	100%
1/2"	12,50	80%
No. 4	4,75	50%
No. 8	2,36	35%
No. 50	0,30	13%
No. 200	0,075	3%

Fuente: Propia; adaptación a especificaciones del INVIAS.

Ilustración 1. Franjas granulométricas de los agregados



Fuente: Propia; adaptación a especificaciones del INVIAS.

- **Muestra 1.**

Masa inicial: 1071,5 g

Masa después de extracción: 956,3 g

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa después de extracción}}{\text{masa inicial}} * 100$$

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = \frac{1071,5g - 956,3g}{1071,5g} * 100$$

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = 10,75\%$$

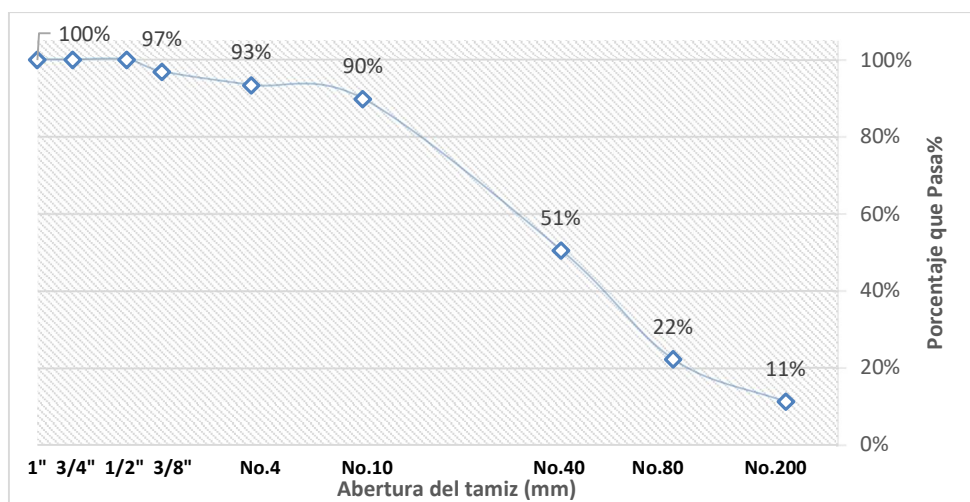
El contenido de asfalto obtenido de los ensayos de la primera muestra fue 10,75%

Tabla 8. Análisis granulométrico INV-782/13 de la muestra N°1

Tamiz " (mm)		Masa retenida en cada tamiz (g)	% Retenido	% Pasa
1"	25,00	0,0	0,0%	100%
3/4"	19,00	0,0	0,0%	100%
1/2"	12,50	0,0	0,0%	100%
3/8"	9,50	29,6	3,1%	96,9%
No. 4	4,75	33,2	3,5%	93,4%
No. 10	2,00	35,1	3,7%	89,7%
No. 40	0,43	375,6	39,3%	50,4%
No. 80	0,18	270,4	28,3%	22,1%
No. 200	0,08	105,6	10,9%	11,2%
FONDO	----	106,8	11,2%	----

Fuente: Propia

Ilustración 2. Curva granulométrica muestra N° 1



Fuente: Propia

- Muestra 2.

Masa inicial: 1025,4 g

Masa después de extracción: 910,6 g

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa después de extracción}}{\text{masa inicial}} * 100$$

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = \frac{1025,4g - 910,6g}{1025,4g} * 100$$

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = 11,20\%$$

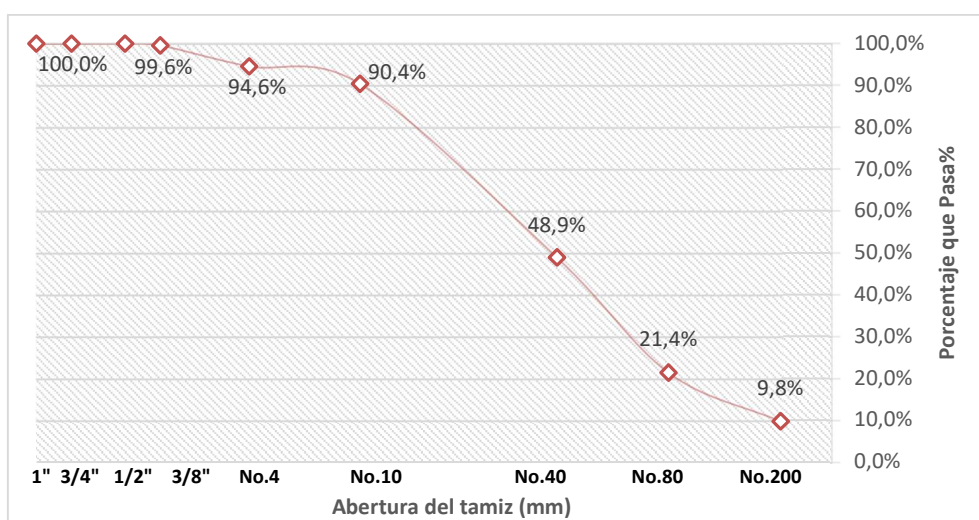
El contenido de asfalto obtenido de los ensayos de la segunda muestra fue 11,20%.

Tabla 9. Análisis granulométrico INV-782/13 de la muestra N°2

Tamiz " (mm)		Masa retenida en cada tamiz (g)	% Retenido	% Pasa
1"	25,00	0,0	0,0%	100,0%
3/4"	19,00	0,0	0,0%	100,0%
1/2"	12,50	0,0	0,0%	100,0%
3/8"	9,50	3,5	0,4%	99,6%
No. 4	4,75	45,9	5,0%	94,6%
No. 10	2,00	38,4	4,2%	90,4%
No. 40	0,43	377,4	41,4%	48,9%
No. 80	0,18	250,1	27,5%	21,4%
No. 200	0,08	106,2	11,7%	9,8%
FONDO	----	89,1	9,8%	----

Fuente: Propia

Ilustración 3. Curva granulométrica muestra N° 2



Fuente: Propia



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.

Autores: Alcides Landínez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

• **Muestra 3.**

Masa inicial: 1005,6 g

Masa después de extracción: 897,8 g

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa después de extracción}}{\text{masa inicial}} * 100$$

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = \frac{1005,6g - 897,8g}{1005,6g} * 100$$

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = 10,72\%$$

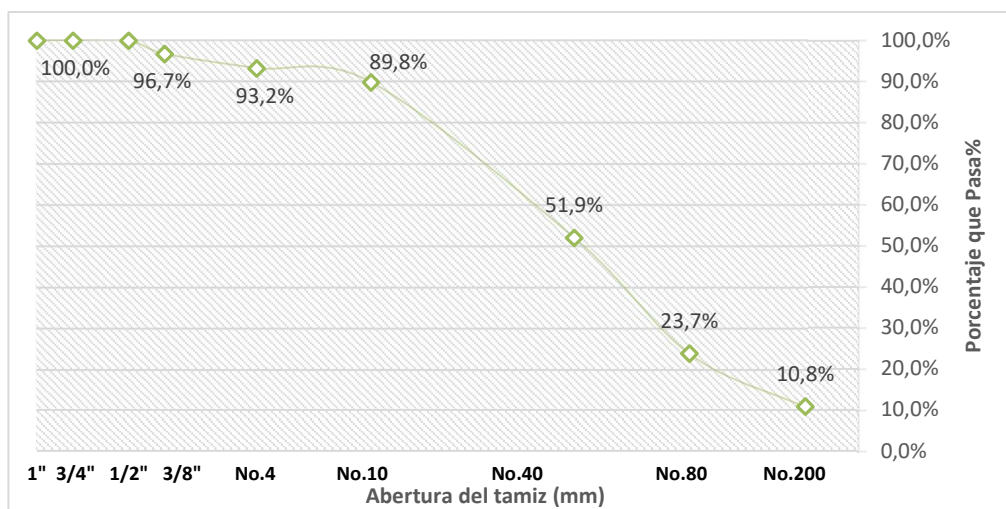
El contenido de asfalto obtenido de los ensayos de la tercera muestra fue 10,72%.

Tabla 10. Análisis granulométrico INV-782/13 de la muestra N°3

Tamiz " (mm)		Masa retenida en cada tamiz (g)	% Retenido	% Pasa
1"	25,00	0,0	0,0%	100,0%
3/4"	19,00	0,0	0,0%	100,0%
1/2"	12,50	0,0	0,0%	100,0%
3/8"	9,50	29,2	3,3%	96,7%
No. 4	4,75	32,1	3,6%	93,2%
No. 10	2,00	30,1	3,4%	89,8%
No. 40	0,43	340,1	37,9%	51,9%
No. 80	0,18	253,8	28,3%	23,7%
No. 200	0,08	115,6	12,9%	10,8%
FONDO	----	96,9	10,8%	----

Fuente: Propia

Ilustración 4. Curva granulométrica muestra N° 3



Fuente: Propia

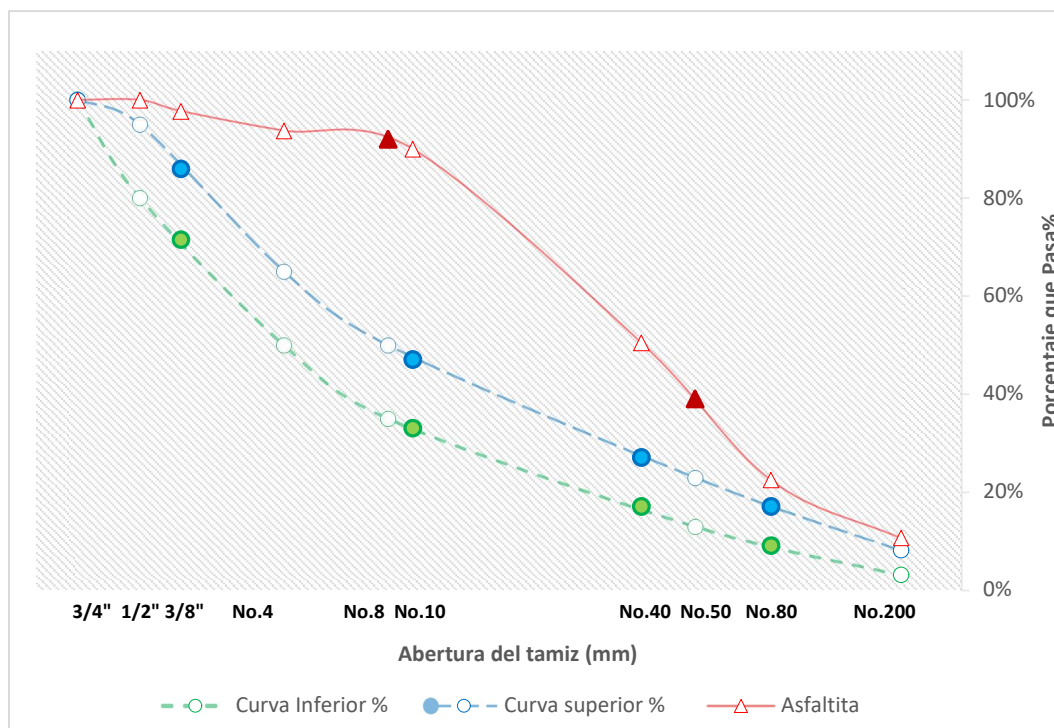
Teniendo en cuenta los ensayos de contenido de asfalto y granulometría realizado a las 3 muestras procedemos a realizar un promedio y graficar un comparativo con las franjas granulométricas contenidas en las especificaciones del INVIAS; también se procede a completar la curva con los tamices faltantes.

Tabla 11. Curvas granulométricas Especificación INVIAS y Asfaltita

Tamiz " (mm)		Curva Inferior % Pasa	Curva superior % Pasa	Asfaltita % Pasa
3/4"	19,00	100%	100%	100%
1/2"	12,50	80%	95%	100%
3/8"	9,50	72%	86%	98%
No. 4	4,75	50%	65%	94%
No. 8	2,36	35%	50%	93%
No. 10	2,00	33%	47%	90%
No. 40	0,43	17%	27%	50%
No. 50	0,30	13%	23%	39%
No. 80	0,18	9%	17%	22%
No. 200	0,075	3%	8%	11%

Fuente: Propia

Ilustración 5. Curva granulométrica Asfaltita natural



 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

Fuente: *Propia*

Como se puede observar en la gráfica anterior la granulometría que pasa es superior a lo permitido en las especificaciones del INVIAS, por tal motivo esto ocasiona una distribución desequilibrada de partículas dificultando la compactación adecuada de la mezcla, lo que resulta en una superficie irregular y propensa a deformaciones, también, la falta de uniformidad en la granulometría puede afectar negativamente la resistencia a la deformación y la estabilidad de la mezcla, lo que compromete su durabilidad, para realizar el diseño de mezclas método Inmersión – Compresión siguiendo el procedimiento definido por la norma de ensayo INV E-622-13 es necesario completar la curva granulométrica y que el tamaño de los granulares de la mezcla este dentro de las especificaciones.

Para este ensayo se elaboran seis probetas por cada contenido de emulsión. Las probetas compactadas tienen un peso mínimo de 1800g, estas se someten a curado, divididas en dos grupos: uno se cura en seco y el otro bajo una combinación de curado seco e inmersión en agua. Finalmente, las probetas se someten a rotura por compresión simple.

7.2 DISEÑO DE MEZCLA CON EL MÉTODO DE ENSAYO INMERSIÓN – COMPRESIÓN

Se establecieron cinco formulaciones experimentales con variaciones en el porcentaje de emulsión catiónica, manteniendo constante la proporción de asfaltita. Cada combinación fue evaluada mediante el ensayo de inmersión-compresión según los lineamientos de la norma INV E-622-13. La aplicación de este procedimiento tuvo como finalidad cuantificar la resistencia mecánica de las probetas bajo condiciones controladas de humedad y determinar el índice de resistencia conservada, lo cual permite conocer el grado de pérdida de cohesión generado por la presencia de agua. Las diferencias obtenidas entre los valores de compresión en estado seco y aquellos obtenidos posterior a la inmersión ofrecieron una visión detallada sobre la capacidad de cada formulación para conservar su integridad estructural. El análisis comparativo de los resultados permitió establecer un punto de equilibrio entre la cantidad de emulsión añadida y la respuesta mecánica observada, lo cual resulta determinante en la elección de una formulación técnicamente adecuada para condiciones climáticas variables.

Elaboración de las probetas método de ensayo de Inmersión - Compresión (INV E-622-13).

Porcentaje de emulsión 3%.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Tabla 12. *Elaboración de mezcla con adición de 3% de emulsión.*

Descripción	%	Peso(g)	Total
Wprobetas	100%	1890,00	100%
Porcentaje de emulsión adición	3,00%	56,70	3,00%
Wasfaltita (g) + adición granulares	97,00%	1833,30	----
Wasfaltita (g)	51,5%	945,00	----
Wbitumen	10,9%	103,01	5,45%
Wgranular(g)	89,10%	842,00	44,55%
adición granulares	48,45%	888,30	47,00%
Wgranulares total	94,4%	1730,30	----

Fuente: Propia

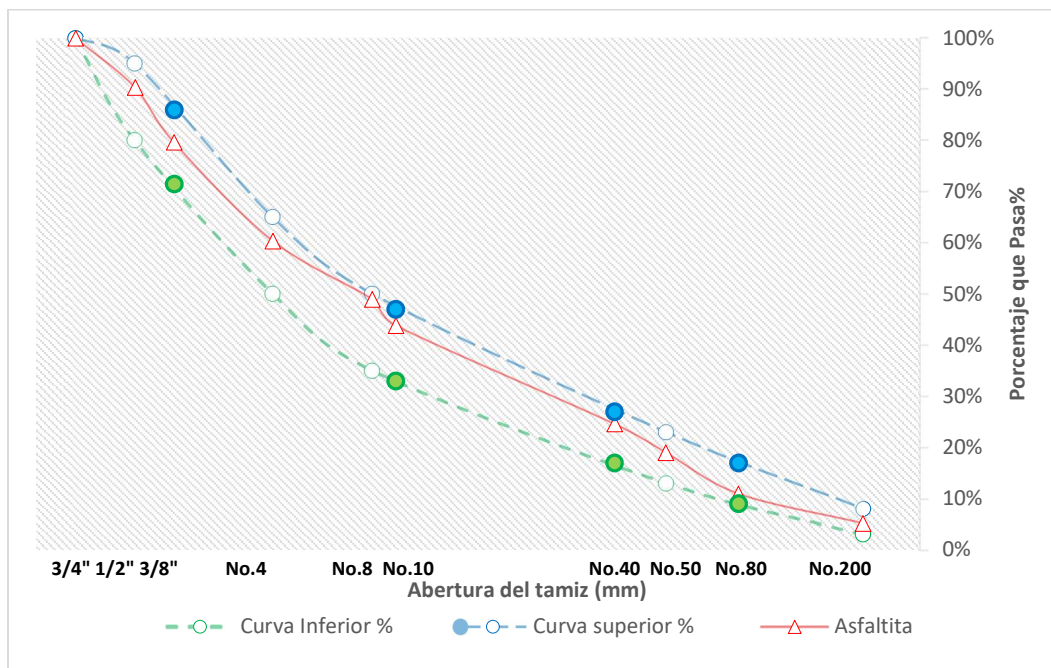
Para elaborar la mezcla se tuvo cuenta un desperdicio del 5% y que los granulares estuvieran dentro de las franjas granulométricas de la especificación del INVIAS, y se trató de utilizar la mayor cantidad de asfaltita en su estado natural.

Tabla 13. *Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 3% de emulsión.*

Tamiz " (mm)		Wagr Asfaltita (g)	Wagr adicionar (g)	Wagr total (g)	Asfaltita % Retenido	Asfaltita % pasa
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	0%	100%
1/2"	12,50	0,00	167,00	167,00	10%	90%
3/8"	9,50	19,09	167,00	186,09	11%	80%
No. 4	4,75	33,68	300,00	333,68	19%	60%
No. 8	2,36	14,59	183,00	197,59	11%	49%
No. 10	2,00	16,84	71,30	88,14	5%	44%
No. 40	0,43	333,15	0,00	333,15	19%	25%
No. 50	0,30	96,27	0,00	96,27	6%	19%
No. 80	0,18	139,49	0,00	139,49	8%	11%
No. 200	0,08	99,64	0,00	99,64	6%	5%
Finos		89,25	0,00	89,25	5%	----
Total		842,00	888,30	1730,30	----	----

Fuente: Propia

Ilustración 6. *Curva granulométrica mezcla con adición del 3% de emulsión asfáltica.*



Fuente: Propia

Una vez elaboradas las probetas se agrupan de tal forma que el promedio de la densidad Bulk de lo más cercano posible y se procede al curado según la especificación del INVIAS para luego realizar el ensayo de resistencia a compresión simple de cada probeta.

Tabla 14. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 3% de emulsión asfáltica.

Descripción	Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)	Peso Sumergido (g)	Peso S.S.S (g)	Densidad Bulk (g/cm ³)	Área (cm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia la comp. (kPa)	Resistencia a la comp. (kg/cm ²)
Probetas en seco	1	100,9	101,6	1835,6	1025,3	1849,6	2,227	81,1	15,22	1877	18,77
	2	101,4	101,6	1840,2	1024,3	1851,7	2,224	81,1	14,44	1781	17,81
	5	100,7	101,6	1809,6	1005,6	1820,1	2,222	81,1	12,46	1537	15,37
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)							2,224	81,1	14,04	1731,67	17,32
Probetas acondicionadas en agua	3	102,3	101,6	1833,8	1021,3	1845,0	2,226	81,1	8,28	1021	10,21
	4	101,8	101,6	1825,4	1017,8	1835,5	2,232	81,1	9,24	1140	11,40
	6	100,8	101,6	1823,6	1012,1	1834,0	2,219	81,1	9,44	1164	11,64
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)							2,226	81,1	8,99	1108,33	11,08

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula el índice de Resistencia Conservada utilizando la siguiente ecuación.



$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{R_2}{R_1} \times 100$$

Donde:

R_1 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas curadas en seco.

R_2 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas sometidas a inmersión en agua.

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{11,08 \text{ kg/cm}^2}{17,32 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = 64,00 \%$$

Porcentaje de emulsión 4%.

Tabla 15.Elaboración de mezcla con adición de 4% de emulsión.

Descripción	%	Peso(g)	Total
Wprobetas	100%	1890,00	100%
Porcentaje de emulsión adición	4,00%	75,60	4,00%
Wasfaltita (g) + adición granulares	96,00%	1814,40	----
Wasfaltita (g)	52,1%	945,00	----
Wbitumen	10,9%	103,01	5,45%
Wgranular(g)	89,10%	842,00	44,55%
adición granulares	47,92%	869,40	46,00%
Wgranulares total	94,3%	1711,40	----

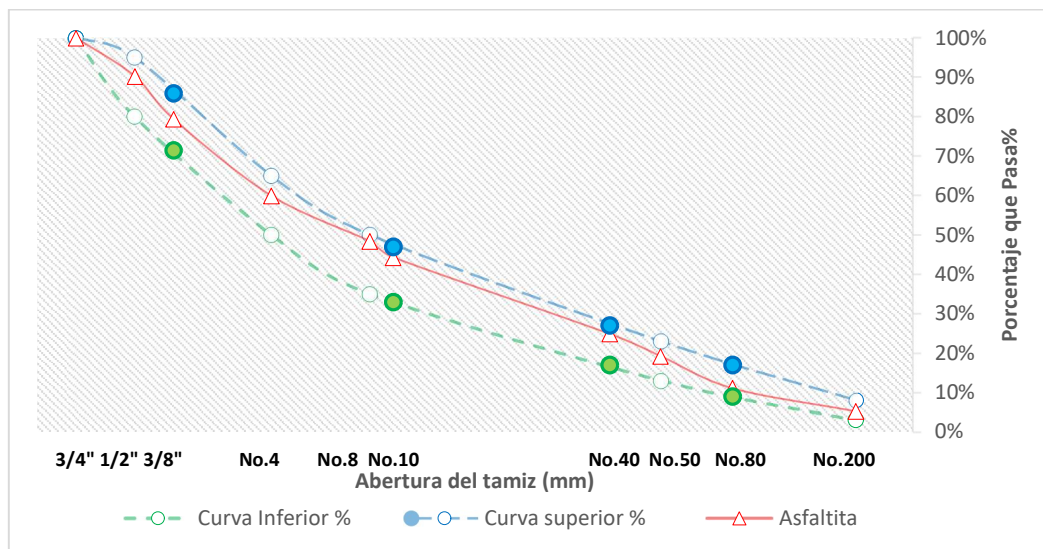
Fuente: Propia

Tabla 16.Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 4% de emulsión.

Tamiz " (mm)	Wagr Asfaltita (g)	Wagr adicionar (g)	Wagr total (g)	Asfaltita % Retenido	Asfaltita % pasa
3/4"	19,00	0,00	0,0	0%	100%
1/2"	12,50	0,00	167,0	10%	90%
3/8"	9,50	19,09	167,0	11%	79%
No. 4	4,75	33,68	300,0	19%	60%
No. 8	2,36	14,59	183,0	12%	48%
No. 10	2,00	16,84	52,4	4%	44%
No. 40	0,43	333,15	0,0	19%	25%
No. 50	0,30	96,27	0,0	6%	19%
No. 80	0,18	139,49	0,0	8%	11%
No. 200	0,08	99,64	0,0	6%	5%
Finos		89,25	0,0	5%	----
Total	842,00	869,40	1711,40	----	----

Fuente: Propia

Ilustración 7.Curva granulométrica mezcla con adición del 4% de emulsión asfáltica.



Fuente: Propia

Tabla 17. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 4% de emulsión asfáltica.

Descripción	Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)	Peso Sumergido (g)	Peso S.S.S (g)	Densidad bulk (g/cm ³)	Área (cm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia la comp. (kPa)	Resistencia a la comp. (kg/cm ²)
Probetas en seco	3	100,6	101,6	1840,2	1020,1	1846,4	2,227	81,1	17,26	2129	21,29
	4	101,0	101,6	1843,6	1026,4	1850,5	2,237	81,1	19,20	2368	23,68
	6	102,0	101,6	1833,5	1021,8	1843,5	2,231	81,1	16,66	2055	20,55
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)							2,232	81,1	17,71	2184,00	21,84
Probetas acondicionadas en agua	1	101,6	101,6	1826,9	1013,5	1834,6	2,225	81,1	12,26	1512	15,12
	2	100,4	101,6	1845,4	1032,5	1856,0	2,241	81,1	12,02	1483	14,83
	5	100,2	101,6	1843,2	1027,8	1853,7	2,232	81,1	13,98	1724	17,24
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)							2,233	81,1	12,75	1573,00	15,73

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula el índice de Resistencia Conservada utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{R_2}{R_1} \times 100$$

Donde:

R_1 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas curadas en seco.

R_2 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas sometidas a inmersión en agua.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{15,73 \text{ kg/cm}^2}{21,84 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = 72,02 \%$$

Porcentaje de emulsión 5%.

Tabla 18.Elaboración de mezcla con adición de 5% de emulsión.

Descripción	%	Peso(g)	Total
Wprobetas	100%	1890,00	100%
Porcentaje de emulsión adición	5,00%	94,50	5,00%
Wasfaltita (g) + adición granulares	95,00%	1795,50	----
Wasfaltita (g)	52,6%	945,00	----
Wbitumen	10,9%	103,01	5,45%
Wgranular(g)	89,10%	842,00	44,55%
adición granulares	47,37%	850,50	45,00%
Wgranulares total	94,3%	1692,50	----

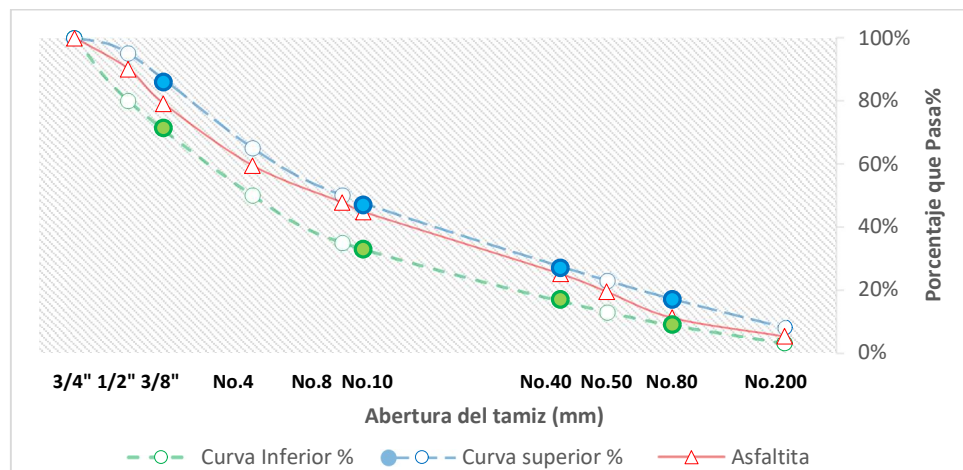
Fuente: Propia

Tabla 19.Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 5% de emulsión.

Tamiz " (mm)		Wagr Asfaltita (g)	Wagr adicionar (g)	Wagr total (g)	Asfaltita % Retenido	Asfaltita % pasa
3/4"	19,00	0,00	0,0	0,0	0%	100%
1/2"	12,50	0,00	167,0	167,0	10%	90%
3/8"	9,50	19,09	167,0	186,1	11%	79%
No. 4	4,75	33,68	300,0	333,7	20%	59%
No. 8	2,36	14,59	183,0	197,6	12%	48%
No. 10	2,00	16,84	33,5	50,3	3%	45%
No. 40	0,43	333,15	0,0	333,1	20%	25%
No. 50	0,30	96,27	0,0	96,3	6%	19%
No. 80	0,18	139,49	0,0	139,5	8%	11%
No. 200	0,08	99,64	0,0	99,6	6%	5%
Finos		89,25	0,0	89,3	5%	----
Total		842,00	850,50	1692,50	----	----

Fuente: Propia

Ilustración 8.Curva granulométrica mezcla con adición del 5% de emulsión asfáltica.



Fuente: Propia

Una vez elaboradas las probetas y el curado según la especificación del INVIAS se proceden a realizar el ensayo de resistencia a compresión simple de cada probeta.

Tabla 20. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 5% de emulsión asfáltica.

Descripción	Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)	Peso Sumergido (g)	Peso S.S.S (g)	Densidad bulk (g/cm ³)	Área (cm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia la comp. (kPa)	Resistencia a la comp. (kg/cm ²)
Probetas en seco	1	99,8	101,6	1839,5	1027,4	1845,1	2,250	81,1	18,22	2247	22,47
	2	99,9	101,6	1840,1	1028,8	1847,0	2,249	81,1	20,24	2497	24,97
	6	99,7	101,6	1847,6	1033,5	1852,3	2,256	81,1	21,14	2608	26,08
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)							2,252	81,1	19,87	2450,67	24,51
Probetas acondicionadas en agua	3	100,1	101,6	1837,4	1028,8	1842,3	2,259	81,1	16,22	2001	20,01
	4	99,2	101,6	1829,5	1024,0	1837,9	2,248	81,1	13,54	1670	16,70
	5	99,8	101,6	1843,3	1029,2	1847,7	2,252	81,1	14,54	1793	17,93
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)							2,253	81,1	14,77	1821,33	18,21

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula el índice de Resistencia Conservada utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{R_2}{R_1} \times 100$$

Donde:

R_1 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas curadas en seco.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

R_2 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas sometidas a inmersión en agua.

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{18,21 \text{ kg/cm}^2}{24,51 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = 74,30 \%$$

Porcentaje de emulsión 6%.

Tabla 21.Elaboración de mezcla con adición de 6% de emulsión.

Descripción	%	Peso(g)	Total
Wprobetas	100%	1890,00	100%
Porcentaje de emulsión adición	6,00%	113,40	6,00%
Wasfaltita (g) + adición granulares	94,00%	1776,60	----
Wasfaltita (g)	53,2%	945,00	----
Wbitumen	10,9%	103,01	5,45%
Wgranular(g)	89,10%	842,00	44,55%
adición granulares	46,81%	831,60	44,00%
Wgranulares total	94,2%	1673,60	----

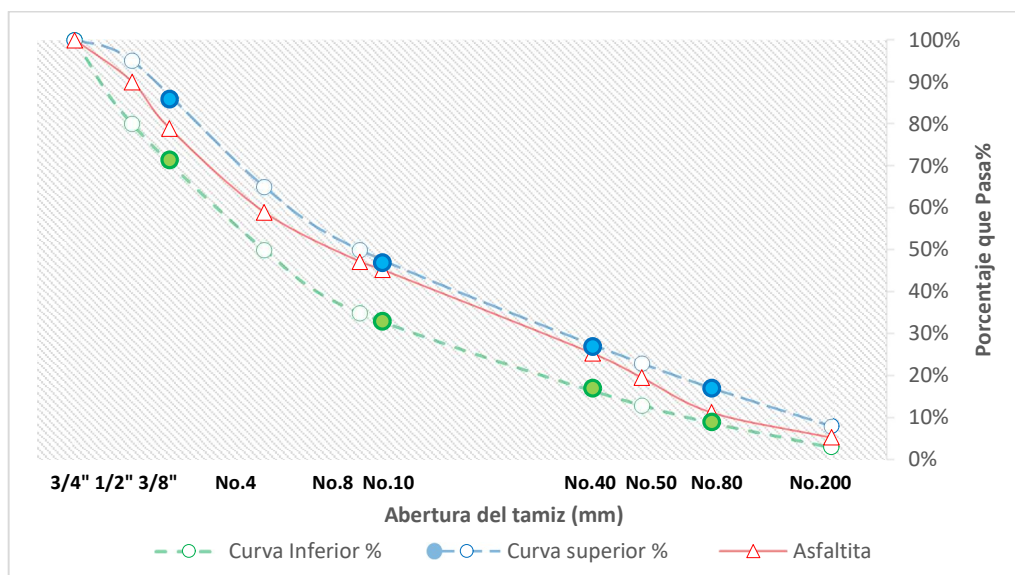
Fuente: Propia

Tabla 22.Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 6% de emulsión.

Tamiz " (mm)	Wagr Asfaltita (g)	Wagr adicionar (g)	Wagr total (g)	Asfaltita % Retenido	Asfaltita % pasa
3/4"	19,00	0,00	0,00	0%	100%
1/2"	12,50	0,00	167,00	10%	90%
3/8"	9,50	19,09	186,09	11%	79%
No. 4	4,75	33,68	333,68	20%	59%
No. 8	2,36	14,59	197,59	12%	47%
No. 10	2,00	16,84	31,44	2%	45%
No. 40	0,43	333,15	333,15	20%	25%
No. 50	0,30	96,27	96,27	6%	20%
No. 80	0,18	139,49	139,49	8%	11%
No. 200	0,08	99,64	99,64	6%	5%
Finos		89,25	89,25	5%	----
Total	842,00	831,60	1673,60	----	----

Fuente: Propia

Ilustración 9.Curva granulométrica mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica.



Fuente: Propia

Una vez elaboradas las probetas y el curado según la especificación del INVIAS se proceden a realizar el ensayo de resistencia a compresión simple de cada probeta.

Tabla 23. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 6% de emulsión asfáltica.

Descripción	Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)	Peso Sumergido (g)	Peso S.S.S (g)	Densidad bulk (g/cm ³)	Área (cm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia la comp. (kPa)	Resistencia a la comp. (kg/cm ²)
Probetas en seco	1	98,8	101,6	1842,1	1031,4	1846,1	2,261	81,1	17,32	2136	21,36
	3	99,6	101,6	1833,9	1027,1	1841,8	2,251	81,1	19,12	2358	23,58
	5	98,7	101,6	1834,7	1028,5	1839,2	2,263	81,1	19,62	2420	24,20
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)							2,258	81,1	18,69	2304,67	23,05
Probetas acondicionadas en agua	2	97,9	101,6	1839,4	1028,9	1843,2	2,259	81,1	13,88	1712	17,12
	4	98,9	101,6	1846,5	1035,9	1851,5	2,264	81,1	14,64	1806	18,06
	6	99,0	101,6	1844,0	1030,0	1847,0	2,257	81,1	15,22	1877	18,77
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)							2,260	81,1	14,58	1798,33	17,98

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula el índice de Resistencia Conservada utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Resistencia conservada}(\%) = \frac{R_2}{R_1} \times 100$$

Donde:

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

R_1 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas curadas en seco.

R_2 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas sometidas a inmersión en agua.

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{23,05 \text{ kg/cm}^2}{17,98 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = 78,00 \%$$

Porcentaje de emulsión 7%.

Tabla 24.Elaboración de mezcla con adición de 7% de emulsión.

Descripción	%	Peso(g)	Total
Wprobetas	100%	1890,00	100%
Porcentaje de emulsión adición	7,00%	132,30	7,00%
Wasfaltita (g) + adición granulares	93,00%	1757,70	----
Wasfaltita (g)	53,8%	945,00	----
Wbitumen	10,9%	103,01	5,45%
Wgranular(g)	89,10%	842,00	44,55%
adición granulares	46,24%	812,70	43,00%
Wgranulares total	94,1%	1654,70	----

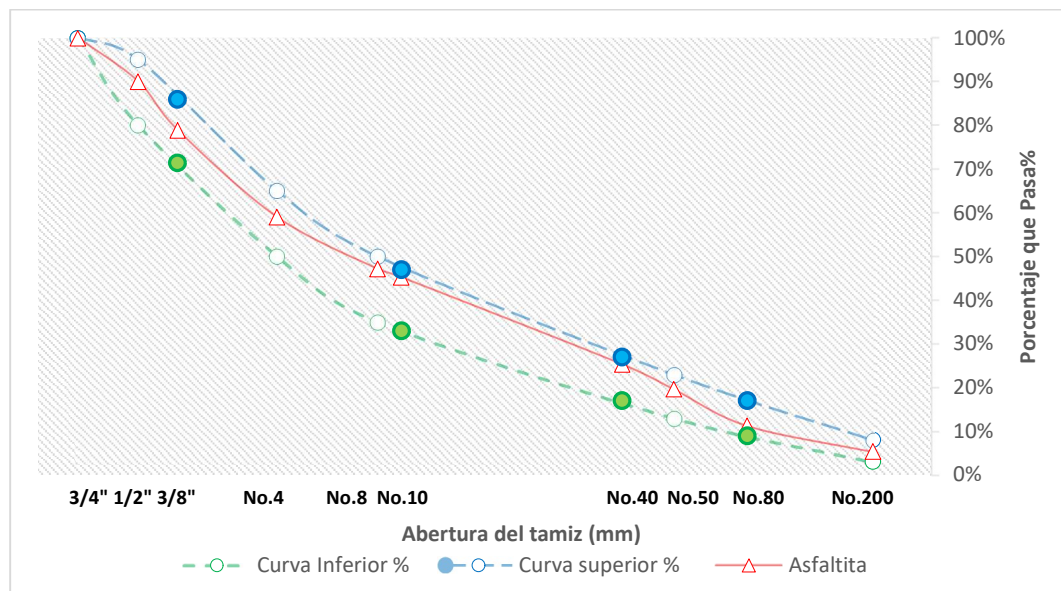
Fuente: Propia

Tabla 25.Granulometría mezcla de asfaltita con adición del 7% de emulsión.

Tamiz " (mm)		Wagr Asfaltita (g)	Wagr adicionar (g)	Wagr total (g)	Asfaltita % Retenido	Asfaltita % pasa
3/4"	19,00	0,00	0,0	0,0	0%	100%
1/2"	12,50	0,00	167,0	167,0	10%	90%
3/8"	9,50	19,09	167,0	186,1	11%	79%
No. 4	4,75	33,68	300,0	333,7	20%	58%
No. 8	2,36	14,59	178,7	193,3	12%	47%
No. 10	2,00	16,84	0,0	16,8	1%	46%
No. 40	0,43	333,15	0,0	333,1	20%	26%
No. 50	0,30	96,27	0,0	96,3	6%	20%
No. 80	0,18	139,49	0,0	139,5	8%	11%
No. 200	0,08	99,64	0,0	99,6	6%	5%
Finos		89,25	0,0	89,3	5%	----
Total		842,00	812,70	1654,70	----	----

Fuente: Propia

Ilustración 10.Curva granulométrica mezcla con adición del 7% de emulsión asfáltica.



Fuente: Propia

Una vez elaboradas las probetas y el curado según la especificación del INVIAS se proceden a realizar el ensayo de resistencia a compresión simple de cada probeta.

Tabla 26. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 7% de emulsión asfáltica.

Descripción	Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)	Peso Sumergido (g)	Peso S.S.S (g)	Densidad bulk (g/cm ³)	Área (cm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia la comp. (kPa)	Resistencia a la comp. (kg/cm ²)
Probetas en seco	2	97,9	101,6	1846,5	1036,8	1850,0	2,271	81,1	17,26	2129	21,29
	3	98,2	101,6	1842,3	1036,7	1845,2	2,279	81,1	19,24	2373	23,73
	6	98,6	101,6	1844,9	1035,4	1848,4	2,269	81,1	20,14	2484	24,84
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)							2,273	81,1	18,88	2328,67	23,29
Probetas acondicionadas en agua	1	98,7	101,6	1846,7	1037,9	1850,2	2,273	81,1	13,66	1685	16,85
	4	98,3	101,6	1840,7	1034,5	1842,5	2,278	81,1	16,14	1991	19,91
	5	97,7	101,6	1849,0	1038,0	1852,6	2,270	81,1	14,80	1826	18,26
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)							2,274	81,1	14,87	1834,00	18,34

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula el índice de Resistencia Conservada utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Resistencia conservada}(\%) = \frac{R_2}{R_1} \times 100$$

Donde:

R_1 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas curadas en seco.

R_2 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas sometidas a inmersión en agua.

$$\text{Resistencia conservada}(\%) = \frac{18,34 \text{ kg/cm}^2}{23,29 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$\text{Resistencia conservada}(\%) = 78,75 \%$$

Representación gráfica de los resultados obtenidos a partir del diseño de mezcla variando el porcentaje de asfalto, El contenido óptimo de emulsión de la mezcla se establece cuando la resistencia de las probetas en seco es 2,5 Mpa y el índice de resistencia conservada es $\geq 75\%$.

Tabla 27. Criterios de resistencia para la determinación del contenido óptimo de ligante

PARÁMETRO	NORMA DE ENSAYO INV	VALOR
Resistencia seca R_s , mínimo (MPa)	E-622-13	2.5
Resistencia húmeda R_h , mínimo (MPa)		2.0
Resistencia conservada $R_c = R_h/R_s$, mínimo (%)		75

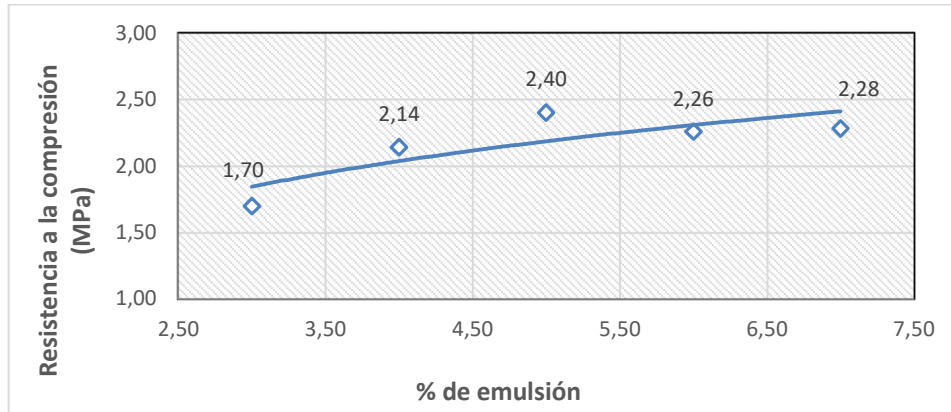
Fuente: Tabla 442P-12 ARTÍCULO 442P – 17 – INVIAS

Tabla 28. Resultados obtenidos variando el porcentaje de asfalto

% de emulsion	% asfalto residual	Resistencia a la comp. (MPa) - Curadas en seco	Resistencia a la comp. (MPa) - inmersión en agua	resistencia conservada (%)
3,00	1,80	1,70	1,09	64,00
4,00	2,40	2,14	1,54	72,02
5,00	3,00	2,40	1,79	74,32
6,00	3,60	2,26	1,76	78,03
7,00	4,20	2,28	1,80	78,76

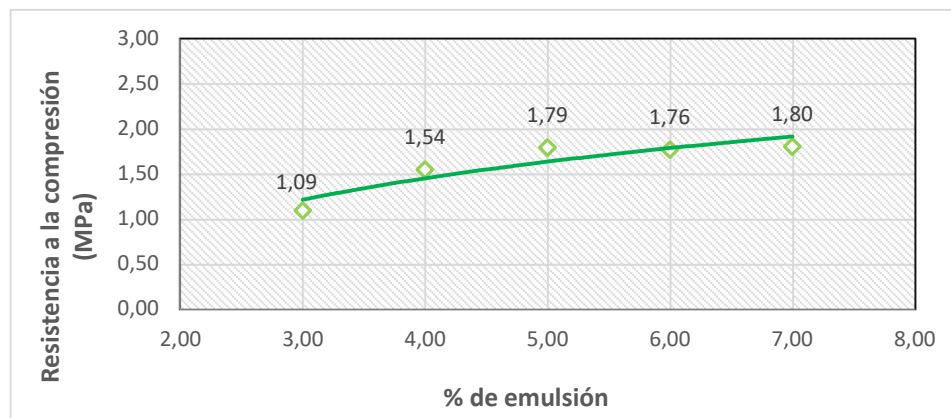
Fuente: Propia

Ilustración 11. Porcentaje de emulsión vs resistencia a la compresión simple para las probetas curadas en seco.



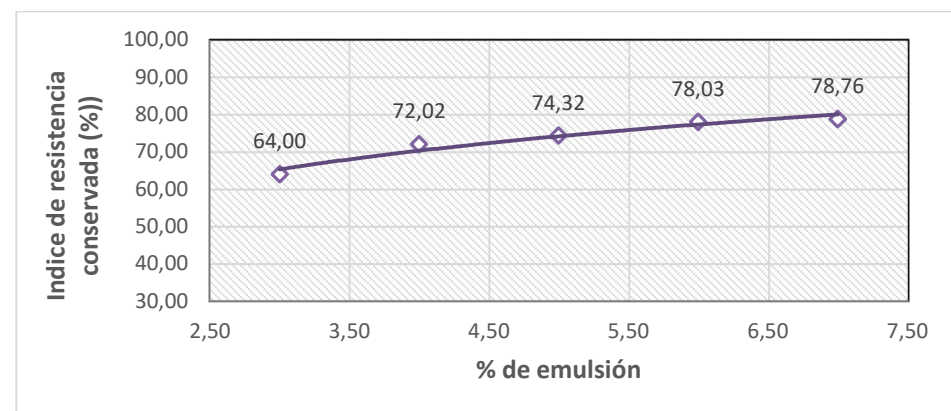
Fuente: Propia

Ilustración 12. Porcentaje de emulsión vs resistencia a la compresión simple para las probetas sometidas a inmersión.



Fuente: Propia

Ilustración 13. Porcentaje de emulsión vs resistencia conservada



Fuente: Propia



Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la resistencia a la compresión simple de las probetas no cumple con lo requerido según la especificación INVIAS según Tabla 442P-12 ARTÍCULO 442P – 17; por lo tanto, se procede a utilizar un porcentaje de emulsión del 6% donde se cumple con el índice de resistencia conservada; se adiciono cal y Cemento con el fin de evaluar el comportamiento de la mezcla.

7.3 ADICIÓN DE CONGLOMERANTES

A partir del comportamiento observado en las mezclas con distintos porcentajes de emulsión, se seleccionó la formulación con 6% como referencia para una segunda etapa experimental. En esta fase, se introdujeron tres combinaciones de conglomerantes minerales: cal, cemento y una mezcla equitativa de ambos. Las nuevas formulaciones se evaluaron bajo el mismo protocolo de ensayo de inmersión-compresión, con el propósito de observar el efecto que estos aditivos generan sobre la cohesión y la resistencia a la humedad. Se analizaron las variaciones en la resistencia a la compresión simple tanto en estado seco como tras la inmersión en agua, permitiendo calcular un nuevo índice de conservación para cada mezcla modificada. Los resultados pusieron en evidencia diferencias notables entre las combinaciones evaluadas, lo que permitió identificar comportamientos específicos vinculados a las propiedades fisicoquímicas de los conglomerantes. Esta etapa representó un paso clave para establecer interacciones entre los componentes y determinar la influencia relativa de cada aditivo en la respuesta estructural de la mezcla.

Para continuar con el análisis se propuso adicionar el 1,5% de conglomerantes del total de la mezcla, de esta forma observar el comportamiento y el efecto causado en las propiedades mecánicas de la asfaltita natural.

Tabla 29. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 6% de emulsión asfáltica y 1,5% de Cemento.

Descripción	Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)	Peso S.S.S (g)	Peso Sumergido (g)	M de vol. agua a 25°C (g)	Densidad bulk a 25°C (g/cm ³)	Carga máx (kN)	Resistencia a la comp. (kg/cm ²)
Probetas en seco	1	100,6	101,7	1829,6	1836,8	1043,2	793,6	2,305	29,30	36,07
	3	101,2	101,6	1833,4	1842,1	1049,5	792,6	2,313	27,56	33,99
	5	100,9	101,6	1816,6	1829,2	1039,8	789,4	2,301	27,80	34,29
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)								2,31	28,22	34,78

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Probetas acondicionadas en agua)	2	100,6	101,7	1826,8	1834,5	1043,2	791,3	2,309	18,14	22,33
	4	99,5	101,6	1819,9	1825,4	1039,2	786,2	2,315	17,64	21,76
	6	102,0	101,6	1831,7	1839,7	1043,2	796,5	2,300	21,44	26,45
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)								2,31	19,07	23,51

Fuente: *Propia*

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula el índice de Resistencia Conservada utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Resistencia conservada}(\%) = \frac{R_2}{R_1} \times 100$$

Donde:

R_1 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas curadas en seco.

R_2 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas sometidas a inmersión en agua.

$$\text{Resistencia conservada}(\%) = \frac{23,51 \text{ kg/cm}^2}{34,78 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$\text{Resistencia conservada}(\%) = 67,60 \%$$

Se obtuvo mayor resistencia a la compresión simple pero no se cumple con lo requerido para el índice de resistencia conservada.

Tabla 30. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 6% de emulsión asfáltica y 1,5% de Cal.

Descripción	Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)	Peso S.S.S (g)	Peso Sumergido (g)	M de vol. agua a 25°C (g)	Densidad bulk a 25°C (g/cm³)	Carga máx (kN)	Resistencia a la comp. (kg/cm²)
Probetas en seco	1	100,2	101,6	1800,6	1808,7	1031,2	777,5	2,316	25,64	31,63
	2	100,5	101,8	1823,4	1832,1	1043,5	788,6	2,312	24,02	29,51
	6	99,8	101,7	1819,5	1830,4	1046,5	783,9	2,321	27,02	33,26
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)								2,316	25,56	31,47
Probetas acondicionadas en agua)	3	100,4	101,7	1806,6	1815,7	1033,9	781,8	2,311	22,12	27,23
	4	100,8	101,8	1805,4	1813,9	1037,8	776,1	2,326	19,54	24,01
	5	101,0	101,6	1816,4	1826,0	1041,2	784,8	2,314	20,58	25,38
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)								2,317	20,75	25,54

Fuente: *Propia*

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula el índice de Resistencia Conservada utilizando la siguiente ecuación.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{R_2}{R_1} \times 100$$

Donde:

R_1 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas curadas en seco.

R_2 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas sometidas a inmersión en agua.

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{25,54 \text{ kg/cm}^2}{31,47 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = 81,12 \%$$

Se obtuvo mayor resistencia a la compresión simple y se cumple con lo requerido para el índice de resistencia conservada.

Tabla 31. Resistencia a compresión simple probetas con adición del 6% de emulsión asfáltica, 0,75% de Cemento y 0,75% de Cal.

Descripción	Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Peso (g)	Peso S.S.S (g)	Peso Sumergido (g)	M de vol. agua a 25°C (g)	Densidad bulk a 25°C (g/cm³)	Carga máx (kN)	Resistencia a la comp. (kg/cm²)
Probetas en seco	2	101,2	101,6	1824,1	1830,7	1039,6	791,1	2,306	27,56	33,99
	4	99,6	101,7	1800,6	1809,9	1030,2	779,7	2,309	26,58	32,72
	5	99,7	101,8	1803,9	1812,4	1032,8	779,6	2,314	28,22	34,67
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)								2,310	27,45	33,80
Probetas acondicionadas en agua	1	99,8	101,6	1799,6	1806,9	1026,3	780,6	2,305	18,12	22,35
	3	100,4	101,7	1800,8	1808,0	1030,5	777,5	2,316	22,18	27,30
	6	101,4	101,8	1813,7	1821,9	1037,5	784,4	2,312	20,12	24,72
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)								2,311	20,14	24,79

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula el índice de Resistencia Conservada utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{R_2}{R_1} \times 100$$

Donde:

R_1 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas curadas en seco.

R_2 : Promedio de la resistencia a la compresión simple probetas sometidas a inmersión en agua.

$$\text{Resistencia conservada(\%)} = \frac{24,79 \text{ kg/cm}^2}{33,80 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landínez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

$$\text{Resistencia conservada}(\%) = 73,34 \%$$

Se obtuvo mayor resistencia a la compresión simple pero no se cumple con lo requerido para el índice de resistencia conservada.

Tabla 32. Resultados obtenidos con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.

Conglomerante	Resistencia a la comp. (MPa) - Curadas en seco	Resistencia a la comp. (MPa) - inmersión en agua	resistencia conservada (%)
Asfaltita + agregado granular	2,26	1,76	78,00
Cemento – 1,5%	3,41	2,31	67,68
Cal - 1,5%	3,09	2,50	81,12
Cemento- 0,75% + Cal - 0,75%	3,31	2,43	73,34

Fuente: Propia

Analizando los resultados se obtiene como parámetro que al adicionar cemento a la mezcla permite obtener una mayor resistencia a la compresión simple de las probetas, pero afecta el valor del índice de resistencia conservada, por otro lado, el adicionar la Cal si fue positivo para la mezcla obteniendo los valores deseados conforme a la especificación del INVIAS.

7.4 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Con el objetivo de ampliar la caracterización mecánica de las mezclas, se desarrolló una evaluación basada en el ensayo de tracción indirecta conforme a los requerimientos de la norma INV E-725-13. Esta prueba permitió estimar la capacidad de resistencia a esfuerzos de tracción que se presentan en condiciones reales de circulación vehicular. Se prepararon briquetas compactadas en laboratorio bajo cuatro configuraciones distintas: mezcla control sin aditivos, mezcla con adición de cal, mezcla con adición de cemento, y mezcla combinada. Cada una de estas formulaciones fue sometida a condiciones secas e inmersas, replicando escenarios que podrían presentarse en ambientes húmedos o con presencia de agua estancada. A partir de los datos obtenidos se calcularon los valores de resistencia en ambos estados, así como el porcentaje de conservación de la capacidad estructural. Esta etapa de análisis mecánico permitió observar el comportamiento frente a cargas indirectas y contribuyó a identificar la formulación con mayor estabilidad frente a ciclos de humedad, aportando información relevante sobre la interacción entre cohesión interna y resistencia del material compuesto.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Se realizó el ensayo de tracción indirecta teniendo en cuenta la norma INV E 725-13, con el fin de medir el efecto del agua. El método es aplicable sobre mezclas elaboradas con o sin aditivos como la cal hidratada y el cemento, para establecer el potencial de daño por humedad, así como para determinar si un aditivo mejorador de adherencia es efectivo o no.

Según las especificaciones del INVIAS se deben elaborar, por lo menos, seis especímenes para cada prueba, se deben agrupar con contenidos de vacíos aproximadamente iguales, tres para ser probados en seco y tres para ser probados después de saturación parcial y acondicionamiento en un baño con agua.

Tabla 33. *Elaboración de Briquetas ensayo de tracción indirecta para la mezcla de Asfaltita sin adiciones.*

COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS						
Briqueta No.	1	2	3	4	5	6
Diámetro (mm.)	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6
Altura (mm.)	65,1	64,2	64,3	63,9	64,5	64,3
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1106,5	1100,2	1098,5	1097,6	1103,5	1105,4
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1113,2	1106,4	1108,1	1106,4	1110,1	1113
Masa del espécimen en agua (g)	622,3	620,4	621,5	620,4	621,8	624
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	490,9	486,0	486,6	486,0	488,3	489,0
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C	2,254	2,264	2,258	2,258	2,260	2,261
% DE VACIOS DE AIRE EN LA BRIQUETA (%)	7,09	6,69	6,95	6,91	6,85	6,82
VOLUMEN DE VACIOS EN LA BRIQUETA (cm³)	34,8	32,5	33,8	33,6	33,4	33,4

Fuente: Propia

Se agrupan de tal forma que el promedio del porcentaje de vacíos de aire en los dos subgrupos sea aproximadamente igual. Se guarda a temperatura ambiente el subgrupo que va ser probado en seco; y se procede a la saturación del subgrupo que va ser probado húmedo.

Tabla 34. *Saturación parcial de las probetas Mezcla asfáltica sin adiciones.*

SATURACIÓN PARCIAL (55-80%)			
Briqueta No.	1	2	5
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1106,5	1100,2	1103,5
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1133,5	1125,1	1124
Masa del espécimen en agua (g)	637,4	635,2	632,1
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	496,1	489,9	491,9
Volumen absorbido de agua (cm³)	27,0	24,9	20,5
Volumen de vacíos en la briqueta (cm³)	34,8	32,5	33,4
GRADO DE SATURACIÓN (%)	77,6	76,6	61,3
% HINCHAMIENTO (%)	1,1	0,8	0,7

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Fuente: Propia

Se calcula el grado de saturación y el resultado se expresa en porcentaje, Si está entre 55 y 80 % del volumen de aire, se continúa con el procedimiento sumergiendo las probetas en agua, Si es menor de 55 %, se repite el procedimiento, y si es mayor de 80 %, el espécimen se debe descartar.

Tabla 35. Saturación de las probetas Mezcla asfáltica sin adiciones.

ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60°C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACIÓN >80%)			
Briqueta No.	1	2	5
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1106,5	1100,2	1103,5
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1138,9	1132,5	1134,5
Masa del espécimen en agua (g)	642,1	641,0	639,7
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	496,8	491,5	494,8
Volumen absorbido de agua (cm³)	32,4	32,3	31,0
GRADO DE SATURACIÓN (%)	93,1	99,4	92,7
% HINCHAMIENTO (%)	1,2	1,1	1,3

Fuente: Propia

Se determina la resistencia a la tensión de ambos subgrupos a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$).

Tabla 36. Resistencia a la tensión probetas con mezcla de asfaltita.

Grupo	Probeta (No.)	Altura (Mm.)	Diámetro (Mm.)	Carga máxima (N)	Resistencia a tensión (Kpa)	Resistencia a tensión (PSI)
Probetas en seco	3	64,3	101,6	6240	596,5	86,5
	4	63,9	101,6	5820	559,9	81,2
	6	64,3	101,6	6210	593,7	86,1
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)					583,3	84,6
Probetas acondicionadas en agua	1	65,1	101,6	4640	438,1	63,5
	2	64,2	101,6	4380	419,4	60,8
	5	64,5	101,6	4420	421,2	61,1
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)					426,2	61,8

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula la relación de resistencias a la tensión utilizando la siguiente ecuación.

$$RRT(\%) = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} \times 100$$

Donde:

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

R_{TH} : Resistencia promedio a la tensión de probetas acondicionadas en agua.

R_{TS} : Resistencia promedio a la tensión de probetas en seco.

$$RRT(\%) = \frac{61,8 \text{ kg/cm}^2}{84,6 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$RRT(\%) = 73,1 \%$$

Tabla 37. Elaboración de Briquetas ensayo de tracción indirecta para la mezcla de Asfaltita con 1,5% de cemento.

COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS						
Briqueta No.	1	2	3	4	5	6
Diámetro (mm.)	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6
Altura (mm.)	64,8	64,5	64,6	64,6	64,9	65,2
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1106,6	1100,2	1103,5	1105,4	1106,4	1109,4
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1115,4	1108,7	1112,2	1116,0	1113,1	1118,2
Masa del espécimen en agua (g)	625,5	620,8	624,8	628,0	626,1	629,0
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	489,9	487,9	487,4	488,0	487,0	489,2
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
% DE VACIOS DE AIRE EN LA BRIQUETA (%)	6,9	7,1	6,7	6,6	6,4	6,5
VOLUMEN DE VACIOS EN LA BRIQUETA (cm³)	33,8	34,4	32,5	32,4	30,9	31,9

Fuente: Propia

Se agrupan de tal forma que el promedio del porcentaje de vacíos de aire en los dos subgrupos sea aproximadamente igual. Se guarda a temperatura ambiente el subgrupo que va ser probado en seco; y se procede a la saturación del subgrupo que va ser probado húmedo.

Tabla 38. Saturación parcial de las probetas Mezcla asfáltica con 1,5% de cemento.

SATURACIÓN PARCIAL (55-80%)			
Briqueta No.	2	4	5
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1100,2	1105,4	1106,4
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1123,6	1130,2	1130,5
Masa del espécimen en agua (g)	633,6	640,2	642,5
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	490	490	488
Volumen absorbido de agua (cm³)	23,4	24,8	24,1
Volumen de vacíos en la briqueta (cm³)	34,4	32,4	30,9
GRADO DE SATURACIÓN (%)	68,0	76,7	77,9
% HINCHAMIENTO (%)	0,4	0,4	0,2

Fuente: Propia

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Se calcula el grado de saturación y el resultado se expresa en porcentaje, Si está entre 55 y 80 % del volumen de aire, se continúa con el procedimiento sumergiendo las probetas en agua, Si es menor de 55 %, se repite el procedimiento, y si es mayor de 80 %, el espécimen se debe descartar.

Tabla 39. Saturación de las probetas Mezcla asfáltica con 1,5% de cemento.

ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60°C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACIÓN >80%)			
Briqueta No.	2	4	5
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1100,2	1105,4	1106,4
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1132,4	1136,8	1135,7
Masa del espécimen en agua (g)	640,2	646,3	646,0
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	492,2	490,5	489,7
Volumen absorbido de agua (cm³)	32,2	31,4	29,3
GRADO DE SATURACIÓN (%)	93,6	97,1	94,7
% HINCHAMIENTO (%)	0,9	0,5	0,6

Fuente: Propia

Se determina la resistencia a la tensión de ambos subgrupos a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$).

Tabla 40. Resistencia a la tensión probetas mezcla de asfaltita con 1,5% de cemento.

Grupo	Probet a (No.)	Altura (Mm.)	Diámetr o (Mm.)	Carga máxima (N)	Resisten cia a tensión (Kpa)	Resistencia a tensión (PSI)
Probetas en seco	1	64,8	101,6	6120	580,5	84,2
	3	64,6	101,6	6240	593,8	86,1
	6	65,2	101,6	6190	583,6	84,6
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)					586,0	85,0
Probetas acondicionadas en agua)	2	64,5	101,6	4670	445,1	64,5
	4	64,6	101,6	4740	451,0	65,4
	5	64,9	101,6	4520	428,1	62,1
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)					441,4	64,0

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula la relación de resistencias a la tensión utilizando la siguiente ecuación.

$$RRT(\%) = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} \times 100$$

Donde:

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

R_{TH} : Resistencia promedio a la tensión de probetas acondicionadas en agua.

R_{TS} : Resistencia promedio a la tensión de probetas en seco.

$$RRT(\%) = \frac{64,0 \text{ kg/cm}^2}{85,0 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$RRT(\%) = 75,3 \%$$

Tabla 41. Elaboración de Briquetas ensayo de tracción indirecta para la mezcla de Asfaltita con 1,5% de cal.

COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS						
Briqueta No.	1	2	3	4	5	6
Diámetro (mm.)	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6
Altura (mm.)	64,1	63,9	64,5	64,3	64,2	64,0
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1103,5	1106,4	1108,8	1105,1	1105,7	1105,4
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1109,5	1111,2	1115,6	1112,3	1114,2	1113,7
Masa del espécimen en agua (g)	623,5	622,5	625,4	622	622,6	626,1
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	486,0	488,7	490,2	490,3	491,6	487,6
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C	2,271	2,264	2,262	2,254	2,249	2,267
% DE VACIOS DE AIRE EN LA BRIQUETA (%)	6,41	6,68	6,76	7,09	7,29	6,55
VOLUMEN DE VACIOS EN LA BRIQUETA (cm³)	31,1	32,6	33,2	34,8	35,8	32,0

Fuente: Propia

Se agrupan de tal forma que el promedio del porcentaje de vacíos de aire en los dos subgrupos sea aproximadamente igual. Se guarda a temperatura ambiente el subgrupo que va ser probado en seco; y se procede a la saturación del subgrupo que va ser probado húmedo.

Tabla 42. Saturación parcial de las probetas Mezcla asfáltica con 1,5% de Cal.

SATURACIÓN PARCIAL (55-80%)			
Briqueta No.	1	2	5
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1103,5	1106,4	1105,7
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1126,9	1130,2	1134,5
Masa del espécimen en agua (g)	638,5	639,0	640,8
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	488,4	491,2	493,7
Volumen absorbido de agua (cm³)	23,4	23,8	28,8
Volumen de vacíos en la briqueta (cm³)	31,1	32,6	35,8
GRADO DE SATURACIÓN (%)	75,2	72,9	80,4
% HINCHAMIENTO (%)	0,5	0,5	0,4

Fuente: Propia

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Se calcula el grado de saturación y el resultado se expresa en porcentaje, Si está entre 55 y 80 % del volumen de aire, se continúa con el procedimiento sumergiendo las probetas en agua, Si es menor de 55 %, se repite el procedimiento, y si es mayor de 80 %, el espécimen se debe descartar.

Tabla 43. Saturación de las probetas Mezcla asfáltica con 1,5% de Cal.

ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60°C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACIÓN >80%)			
Briqueta No.	1	2	5
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1103,5	1106,4	1105,7
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1133,4	1138,4	1140,2
Masa del espécimen en agua (g)	644,0	645,2	644,7
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	489,4	493,2	495,5
Volumen absorbido de agua (cm³)	29,9	32,0	34,5
GRADO DE SATURACIÓN (%)	96,0	98,0	96,3
% HINCHAMIENTO (%)	0,7	0,9	0,8

Fuente: Propia

Se determina la resistencia a la tensión de ambos subgrupos a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$).

Tabla 44. Resistencia a la tensión probetas en seco mezcla de asfaltita con 1,5% de Cal.

Grupo	Probeta (No.)	Altura (Mm.)	Diámetro (Mm.)	Carga máxima (N)	Resistencia a tensión (Kpa)	Resistencia a tensión (PSI)
Probetas en seco	3	64,5	101,6	6090	580,4	84,2
	4	64,3	101,6	6140	587,0	85,1
	6	64,0	101,6	5980	574,4	83,3
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)					580,6	84,2
Probetas acondicionadas en agua)	1	64,1	101,6	4910	470,8	68,3
	2	63,9	101,6	4830	464,6	67,4
	5	64,2	101,6	4980	476,8	69,2
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)					470,8	68,3

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula la relación de resistencias a la tensión utilizando la siguiente ecuación.

$$RRT(\%) = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} \times 100$$

Donde:

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

R_{TH} : Resistencia promedio a la tensión de probetas acondicionadas en agua.

R_{TS} : Resistencia promedio a la tensión de probetas en seco.

$$RRT(\%) = \frac{68,3 \text{ kg/cm}^2}{84,2 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$RRT(\%) = 81,1 \%$$

Tabla 45.Elaboración de Briquetas ensayo de tracción indirecta para la mezcla de Asfaltita con 0,75% de Cemento + 0,75 Cal.

COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS						
Briqueta No.	1	2	3	4	5	6
Diámetro (mm.)	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6
Altura (mm.)	64,2	64,4	64,7	64,5	64,3	64,5
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1100,2	1105,4	1099,5	1103,4	1108,4	1101,5
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1109,5	1120,1	1106,9	1120,4	1116,5	1109,6
Masa del espécimen en agua (g)	620,5	626,8	620,1	627,5	623,7	622,7
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	489,0	493,3	486,8	492,9	492,8	486,9
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C	2,250	2,241	2,259	2,239	2,249	2,262
% DE VACIOS DE AIRE EN LA BRIQUETA (%)	7,26	7,63	6,90	7,73	7,29	6,75
VOLUMEN DE VACIOS EN LA BRIQUETA (cm ³)	35,5	37,7	33,6	38,1	35,9	32,9

Fuente: Propia

Se agrupan de tal forma que el promedio del porcentaje de vacíos de aire en los dos subgrupos sea aproximadamente igual. Se guarda a temperatura ambiente el subgrupo que va ser probado en seco; y se procede a la saturación del subgrupo que va ser probado húmedo.

Tabla 46. Saturación parcial de las probetas Mezcla asfáltica con 0,75% de Cemento + 0,75 Cal.

SATURACIÓN PARCIAL (55-80%)			
Briqueta No.	1	4	6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1100,2	1103,4	1101,5
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1125,7	1129,5	1127,1
Masa del espécimen en agua (g)	632,5	633,0	635,4
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	493,2	496,5	491,7
Volumen absorbido de agua (cm ³)	25,5	26,1	25,6
Volumen de vacíos en la briqueta (cm ³)	35,5	38,1	32,9
GRADO DE SATURACIÓN (%)	71,8	68,5	77,9
% HINCHAMIENTO (%)	0,9	0,7	1,0

Fuente: Propia

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Se calcula el grado de saturación y el resultado se expresa en porcentaje, Si está entre 55 y 80 % del volumen de aire, se continúa con el procedimiento sumergiendo las probetas en agua, Si es menor de 55 %, se repite el procedimiento, y si es mayor de 80 %, el espécimen se debe descartar.

Tabla 47. Saturación de las probetas Mezcla asfáltica con 0,75% de Cemento + 0,75% Cal.

ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD EN AGUA A 60°C DURANTE 24h (GRADO DE SATURACIÓN >80%)			
Briqueta No.	1	4	6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1100,2	1103,4	1101,5
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1134,6	1136,9	1133,4
Masa del espécimen en agua (g)	639,3	639,6	641,8
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	495,3	497,3	491,6
Volumen absorbido de agua (cm³)	34,4	33,5	31,9
GRADO DE SATURACIÓN (%)	96,9	88,0	97,1
% HINCHAMIENTO (%)	1,3	0,9	1,0

Fuente: Propia

Se determina la resistencia a la tensión de ambos subgrupos a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$).

Tabla 48. Resistencia a la tensión probetas mezcla asfáltica con 0,75% de Cemento + 0,75% Cal.

Grupo	Probeta (No.)	Altura (Mm.)	Diámetro (Mm.)	Carga máxima (N)	Resistencia a tensión (Kpa)	Resistencia a tensión (PSI)
Probetas en seco	2	64,4	101,6	6120	584,1	84,7
	3	64,7	101,6	6060	575,7	83,5
	5	64,3	101,6	6180	590,8	85,7
Promedio Grupo 1 (Probetas al aire)					583,6	84,6
Probetas acondicionadas en agua)	1	64,2	101,6	4970	475,9	69,0
	4	64,5	101,6	4730	450,8	65,4
	6	64,5	101,6	4620	440,3	63,9
Promedio Grupo 2 (Probetas acondicionadas en agua)					455,6	66,1

Fuente: Propia

Teniendo los resultados de cada probeta se calcula la relación de resistencias a la tensión utilizando la siguiente ecuación.

$$RRT(\%) = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} \times 100$$

Donde:

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

R_{TH} : Resistencia promedio a la tensión de probetas acondicionadas en agua.

R_{TS} : Resistencia promedio a la tensión de probetas en seco.

$$RRT(\%) = \frac{66,1 \text{ kg/cm}^2}{84,6 \text{ kg/cm}^2} \times 100$$

$$RRT(\%) = 78,1 \%$$

Tabla 49. Resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta, Mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.

Conglomerante	Carga máxima (N) - Curadas en seco	Carga máxima (N) - inmersión en agua	Resistencia a la Tensión. (PSI) - Curadas en seco	Resistencia a la Tensión. (PSI) - inmersión en agua	Resistencia tracción indirecta (%)
Asfaltita + agregado granular	609,0	448,0	84,6	61,8	73,1%
Cemento - 1,5%	618,3	464,3	85,0	64,0	75,3%
Cal - 1,5%	607,0	490,7	84,2	68,3	81,1%
Cemento- 0,75% + Cal - 0,75%	612,0	477,3	84,6	66,1	78,1%

Fuente: Propia

7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante el desarrollo se recolectaron datos adicionales derivados de la manipulación y caracterización de las mezclas, los cuales no formaron parte de los objetivos principales, pero aportaron elementos de interés técnico. Entre estos se encuentran observaciones relacionadas con la trabajabilidad de las mezclas, tiempos de curado, homogeneidad durante el proceso de compactación y variaciones en la absorción de agua por parte de los materiales tratados. Asimismo, se documentaron particularidades en la textura superficial de las briquetas elaboradas, lo que permitió establecer una correlación cualitativa entre el tipo de conglomerante y la cohesión visual observada durante las fases de preparación. Estos elementos complementarios enriquecen la lectura de los resultados principales y ofrecen un panorama más amplio sobre las implicaciones técnicas del diseño y producción de mezclas asfálticas estabilizadas con aditivos minerales.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

Los ensayos realizados a la emulsión catiónica de rompimiento lento CRL-1 permitieron identificar sus propiedades fisicoquímicas, las cuales fueron evaluadas conforme a los criterios técnicos definidos por la normativa del Instituto Nacional de Vías. Los resultados obtenidos confirmaron que el material analizado cumple con las condiciones necesarias para su utilización como ligante en mezclas estabilizadas, permitiendo avanzar hacia la integración de asfaltita como componente principal en formulaciones experimentales.

El contenido de asfalto presente en la asfaltita se determinó mediante el método INV E-732/13, obteniéndose porcentajes de 10,75 %, 11,20 % y 10,72 %. Con base en estos valores, se estableció un promedio de 10,9 %, que sirvió como punto de referencia para calcular la proporción efectiva de ligante aportado por el mineral durante el proceso de mezcla. Esta información fue esencial para ajustar el porcentaje adicional de emulsión a incorporar.

El análisis granulométrico aplicado a la asfaltita reveló que las muestras, en su estado natural, no cumplían con las franjas granulométricas requeridas por la especificación MAN-19 del INVIAS. Para corregir esta situación, se incorporó material granular complementario hasta lograr una distribución compatible con la normativa. Este ajuste fue clave para garantizar la estabilidad mecánica de las mezclas elaboradas, facilitando su posterior compactación y resistencia en campo.

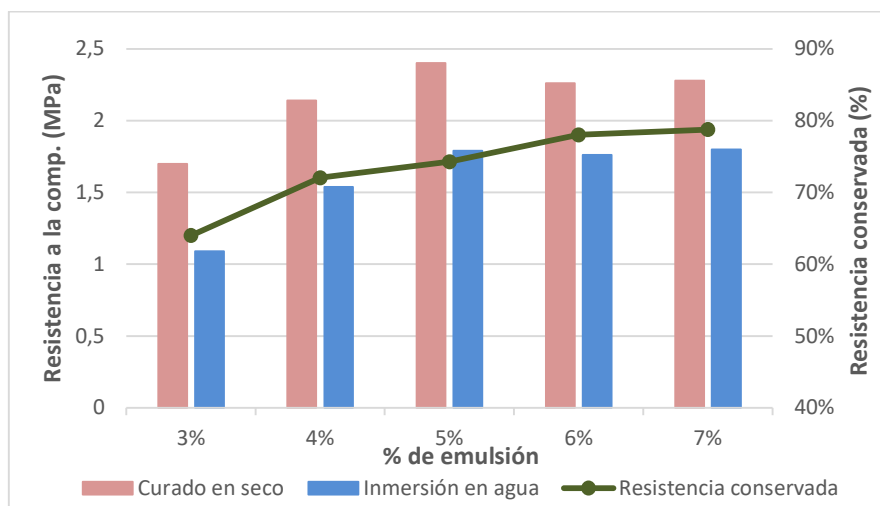
Se prepararon mezclas con diferentes proporciones de emulsión (3 %, 4 %, 5 %, 6 % y 7 %), y se sometieron al ensayo de inmersión-compresión, siguiendo el procedimiento INV E-622-13. La mezcla con 6 % de emulsión fue la que presentó un mayor equilibrio entre cohesión y resistencia al agua.

Tabla 50. Resultados ensayo de inmersión-compresión obtenidos variando el porcentaje de asfalto

% de emulsión	% asfalto residual	Resistencia a la comp. (MPa) - Curadas en seco	Resistencia a la comp. (MPa) - inmersión en agua	resistencia conservada (%)
3,00	1,80	1,70	1,09	64,00
4,00	2,40	2,14	1,54	72,02
5,00	3,00	2,40	1,79	74,32
6,00	3,60	2,26	1,76	78,03
7,00	4,20	2,28	1,80	78,76

Fuente: Propia

Ilustración 14. Resultado ensayo Inmersión - Compresión



Fuente: Propia

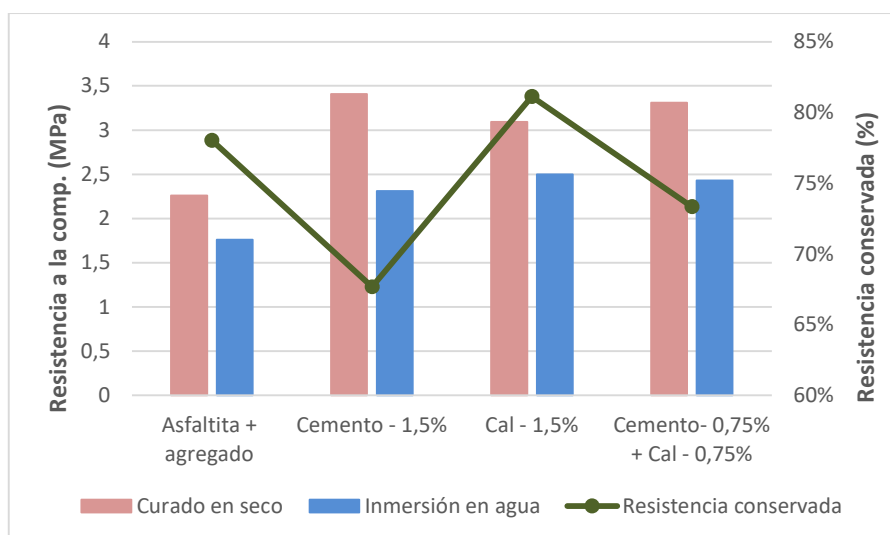
En una etapa posterior, se evaluaron las propiedades mecánicas de mezclas con 6 % de emulsión combinada con adición de conglomerantes. Se probaron tres formulaciones distintas: 1,5 % de cal, 1,5 % de cemento, y una mezcla de ambos al 0,75 %. Los resultados mostraron que la resistencia aumentó en todos los casos, siendo la formulación con 1,5 % de cal la que presentó mayor cohesión frente a la acción del agua.

Tabla 51. Resultados obtenidos de los ensayos inmersión-compresión de la mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.

Conglomerante	Resistencia (MPa) - Curadas en seco	Resistencia (MPa) - inmersión en agua	Resistencia conservada (%)	Observaciones
Asfaltita + agregado granular	2,26	1,76	78,00	Baja resistencia inicial, buena estabilidad en agua. No es óptima no cumple con la resistencia a la compresión simple.
Cemento – 1,5%	3,41	2,31	67,68	Alta resistencia inicial, pero pobre rendimiento en agua. No recomendable en entornos con mucha humedad no cumple con la resistencia conservada.
Cal - 1,5%	3,09	2,50	81,12	Alta resistencia inicial y la mejor estabilidad en agua. Mejor opción de las mezclas realizadas.
Cemento- 0,75% + Cal - 0,75%	3,31	2,43	73,34	Buen equilibrio, pero no supera a la cal pura en estabilidad en agua, no cumple con la resistencia conservada

Fuente: Propia

Ilustración 15. Resultado ensayo Inmersión – Comprensión de la mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.



Fuente: Propia

La resistencia a la tracción indirecta se evaluó mediante el método INV E-725-13, utilizando probetas compactadas elaboradas con mezclas que contenían 6 % de emulsión catiónica combinada con diferentes proporciones de conglomerantes. Se analizaron tres formulaciones: una con 1,5 % de cal, otra con 1,5 % de cemento y una tercera con una mezcla en partes iguales de cal y cemento al 0,75 %. Las muestras se sometieron a saturación controlada antes del ensayo, con el fin de simular condiciones de humedad presentes en capas de rodadura. La carga se aplicó de manera diametral, generando esfuerzos de tracción perpendiculares a la compresión hasta alcanzar la rotura del material. Los resultados evidenciaron que la combinación de cal y cemento produjo los valores más altos de resistencia a la tracción indirecta, indicando una mayor cohesión interna frente a esfuerzos transversales.

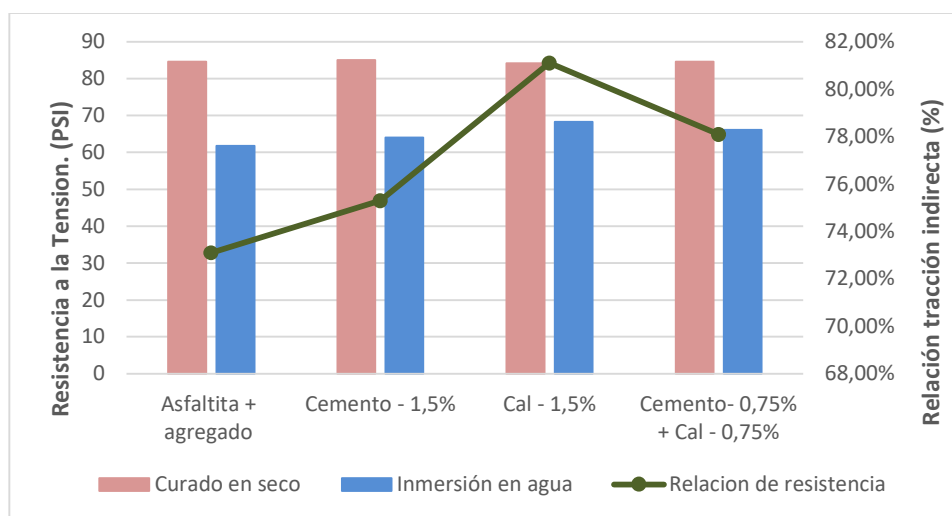
Tabla 52. Resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta, Mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.

Conglomerante	Carga máxima (N) - Curadas en seco	Carga máxima (N) - inmersión en agua	Resistencia a la Tensión. (PSI) - Curadas en seco	Resistencia a la Tensión. (PSI) - inmersión en agua	Resistencia tracción indirecta (%)
Asfaltita + agregado granular	609,0	448,0	84,6	61,8	73,1%
Cemento - 1,5%	618,3	464,3	85,0	64,0	75,3%

Cal - 1,5%	607,0	490,7	84,2	68,3	81,1%
Cemento- 0,75% + Cal - 0,75%	612,0	477,3	84,6	66,1	78,1%

Fuente: Propia

Ilustración 16. Resultado ensayo de Tracción indirecta de la mezcla con adición del 6% de emulsión asfáltica más conglomerantes.



Fuente: Propia

8. DISCUSIÓN

Una vez se adicionaron conglomerantes a la mezcla de asfaltita, se evidenció que el cemento al 1,5% presentó la mayor resistencia en condiciones secas. Sin embargo, su desempeño disminuyó considerablemente bajo inmersión, conservando únicamente el 67,68% de la resistencia inicial. Este comportamiento sugiere que el cemento es más susceptible a procesos de degradación en ambientes húmedos, lo cual ha sido reportado por Zhu y Wang (2018), quienes indican que, si bien el cemento incrementa la rigidez estructural, su interacción con la humedad puede afectar la cohesión a largo plazo.

Por otro lado, la cal al 1,5% exhibió una resistencia en seco ligeramente inferior, pero conservó un 81,12% de su resistencia en condiciones de inmersión, indicando una mayor estabilidad frente a la acción del agua. Esta observación coincide con los hallazgos de González et al. (2017), quienes destacan la capacidad de la cal para reducir la permeabilidad de la mezcla y formar compuestos cementantes estables que incrementan su resistencia hídrica.



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

De los ensayos de tracción indirecta se observa que tanto la cal como el cemento contribuyen a una mejora en la cohesión entre el ligante y los agregados, lo que favorece la adherencia del asfalto a los materiales pétreos. Esta mejoría, en principio, podría asociarse con un aumento en la resistencia a la tracción indirecta (RTI). No obstante, los resultados experimentales reflejan un comportamiento inestable en la resistencia conservada, lo que indica que una mayor cohesión no necesariamente garantiza un rendimiento homogéneo bajo condiciones húmedas, aspecto crítico para la integridad estructural del pavimento (García et al., 2020).

Es importante recordar que la relación de resistencia conservada (R_{TH}/R_{TS}) se calcula como el cociente entre la resistencia a la tracción de probetas acondicionadas en agua (R_{TH}) y la resistencia de aquellas curadas en seco (R_{TS}). Así, si R_{TH} disminuye significativamente por efectos de la humedad o deficiencias en la cohesión, esta relación se verá afectada negativamente, incluso si R_{TS} es elevada. Esta situación puede generar una interpretación contradictoria de los datos, dado que el incremento en RTI no se traduce necesariamente en un mejor comportamiento de la mezcla bajo inmersión.

En cifras, la adición de cemento mostró una mejora en la resistencia a la tracción indirecta (75,3%) respecto a la asfaltita sin adiciones (73,1%). No obstante, dicha mejora no se reflejó proporcionalmente bajo inmersión. En cambio, la mezcla con cal destacó por su alta relación de resistencia conservada (81,1%) y su mejor comportamiento frente al agua, presentando la menor pérdida en la carga máxima requerida para inducir la falla. Esto sugiere que la cal proporciona una mayor cohesión interna y resistencia hídrica, posicionándola como el conglomerante con mejor desempeño, lo cual coincide con lo reportado por Pérez et al. (2018), quienes encontraron mejoras del 20% en la resistencia a la tracción.

Los hallazgos obtenidos muestran que la incorporación de conglomerantes en la modificación de la asfaltita natural incide de manera significativa en sus propiedades mecánicas. Las pruebas de laboratorio evidenciaron un incremento en la resistencia a la compresión simple y a la tracción indirecta, atribuible a una mayor cohesión interna del material. Esta mejora se relaciona directamente con la interacción química entre los aditivos empleados, cuya sinergia fortalece la estructura de la mezcla y reduce su vulnerabilidad frente al deterioro por humedad, tal como lo han documentado Fernández et al. (2021) y Liu et al. (2020).

8.1 CONCLUSIONES

Objetivo 1: Caracterizar el asfalto natural extraído de la mina, la emulsión asfáltica y el material granular requerido para el diseño de la mezcla, teniendo en cuenta las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS

El análisis del asfalto natural permitió identificar un contenido de ligante asfáltico cercano al 11%, con variaciones mínimas entre las muestras. Estos valores se alinean con lo establecido por el artículo Art. 442P del INVIAS, lo cual facilitó la selección de una muestra representativa para su posterior modificación. Adicionalmente, el material granular de la asfaltita mostró una distribución fuera de los rangos estipulados por las especificaciones de INVIAS, esto ocasiona una distribución desequilibrada de partículas dificultando la compactación adecuada de la mezcla, lo que resulta en una superficie irregular y propensa a deformaciones, por tal motivo fue necesario adicionar un agregado de aporte con el fin de cumplir las Franjas granulométricas para la elaboración de una mezcla asfáltica natural. Por su parte, la emulsión catiónica de rompimiento lento utilizada presentó características de estabilidad adecuadas para su incorporación en la mezcla con la asfaltita. Esta fase de caracterización permitió establecer un punto de partida confiable, definiendo parámetros físicos y químicos acordes con los requerimientos técnicos del diseño experimental.

Objetivo 2: Determinar las proporciones óptimas de emulsión catiónica de rompimiento lento, en la mezcla de asfalto natural mediante un diseño experimental en laboratorio.

El proceso de dosificación de la emulsión asfáltica consideró un intervalo entre 3% y 7%, determinando mediante ensayo de inmersión-compresión que el 6% correspondía al contenido óptimo cumpliendo con la resistencia conservada exigida en el artículo Art. 442P del INVIAS. Este valor ofreció un balance entre cohesión y trabajabilidad sin alterar la curva granulométrica establecida. Las mezclas con porcentajes superiores (6% y 7%) cumplieron con lo exigido en cuanto a la resistencia conservada, pero no con lo mínimo requerido en la resistencia a la compresión simple para condiciones húmedas y seca, mientras que las de porcentajes inferiores (3%, 4% y 5%) no alcanzaron ninguno de los parámetros mínimos de desempeño mecánico.

Objetivo 3: Evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas modificadas mediante ensayos estándar de resistencia a la compresión y tracción indirecta.

Las pruebas de compresión simple mediante el ensayo de inmersión-compresión evidenciaron un comportamiento mecánico más favorable en las mezclas tratadas con estabilizantes, en comparación con aquellas sin modificación. Las probetas con 6% de emulsión y 1.5% de cal obtuvieron los valores más altos de resistencia tras inmersión, y supero el 75% de resistencia conservada exigida en el artículo Art. 442P del INVIAS. Este desempeño es especialmente relevante para zonas expuestas a condiciones de alta pluviosidad, donde la acción del agua suele comprometer la estabilidad de los pavimentos. En relación con la tracción indirecta, las briquetas modificadas exhibieron una mayor resistencia al agrietamiento bajo tensiones transversales en condiciones húmedas, la formulación con Cal logró un desempeño superior, particularmente en escenarios con humedad elevada. Este comportamiento sugiere que el uso de Cal como aditivo mejora la capacidad del material para resistir la pérdida de integridad estructural ante ciclos térmicos y de carga repetida, contribuyendo a una mayor durabilidad del pavimento.

Objetivo 4: Analizar el aporte generado por los materiales adicionados a la mezcla asfáltica diseñada, y realizar recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas al tema

Los materiales añadidos a la mezcla base contribuyeron significativamente a mejorar las propiedades mecánicas, Las combinaciones evaluadas incrementaron la capacidad de la mezcla para mantener su resistencia bajo condiciones de humedad, El desempeño observado posiciona a estos aditivos como opciones viables para mejorar mezclas con asfaltita, particularmente en regiones donde este recurso se encuentra disponible de forma natural. Se sugiere ampliar los estudios hacia condiciones reales de tránsito, incorporando variables como temperatura fluctuante, tiempos de curado extendidos y cargas cíclicas. Asimismo, sería pertinente incluir análisis de costos y estimaciones de vida útil comparada entre formulaciones de mezclas asfálticas tradicionales y modificadas. Una línea complementaria de investigación podría orientarse a evaluar el impacto ambiental del uso de estos aditivos, con énfasis en su ciclo de vida y su comportamiento en pavimentos reciclables o reutilizables.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

La hipótesis formulada establecía que la adición conjunta de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento en mezclas formuladas con asfalto natural mejoraría su comportamiento mecánico y resistencia frente a la humedad. Los resultados experimentales confirmaron esta premisa, al demostrar incrementos sostenidos en resistencia a la compresión y tracción indirecta, así como una mayor estabilidad estructural bajo inmersión en agua. La mezcla con 6% de emulsión y 1.5% de cal fue la que presentó mayor desempeño general. La combinación de aditivos demostró tener efectos complementarios: mientras la emulsión fortaleció la adherencia entre partículas, la cal mejoró la cohesión interna y la resistencia a la humedad, y el cemento aumentó la rigidez de la mezcla. Por tanto, se confirma que la hipótesis se respaldó empíricamente, con datos consistentes obtenidos bajo normas técnicas del INVIAS, lo que valida el planteamiento inicial del estudio.

8.2 TRABAJOS FUTUROS

En futuras investigaciones relacionadas con el presente trabajo de grado se recomienda, realizar pruebas con diferentes proporciones de cemento y cal para encontrar la combinación óptima que maximice tanto la resistencia en seco como la conservación de la resistencia en agua. Se recomienda llevar a cabo ensayos adicionales evaluando el comportamiento a largo plazo de estas mezclas, incluyendo ensayos de fatiga y envejecimiento acelerado.

Adicionalmente, se propone analizar el comportamiento de las mezclas en relación con su huella ambiental. Un estudio comparativo que considere el ciclo de vida de los materiales, desde la extracción hasta la disposición final, permitiría establecer diferencias entre el uso de asfaltita modificada y mezclas convencionales. Para ello, sería necesario evaluar parámetros como el consumo energético, las emisiones derivadas del proceso constructivo y las posibilidades de reutilización o reciclaje del material empleado, de esta manera explorar alternativas sostenibles que puedan complementar estos materiales en aplicaciones futuras.

Por otra parte, se puede plantear la posibilidad de introducir aditivos emergentes que amplíen el rango funcional del diseño propuesto en vías de mayor tránsito. La inclusión de polímeros reciclados, compuestos industriales o nanomateriales en porcentajes controlados podría

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	---

evaluarse mediante técnicas avanzadas de caracterización, tales como espectroscopía de infrarrojo, análisis térmico diferencial o microscopía electrónica de barrido. La finalidad de esta propuesta es explorar cómo influyen estos materiales en la reología del ligante, la adhesividad con los agregados y la resistencia frente a la humedad.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ALARCÓN, L. (2014) Uso de la asfaltita para pavimentos en vías terciarias en Boyacá y Cundinamarca en la república de Colombia. Bogotá, Universidad Militar Nueva Granada - Facultad de Ingeniería. Recuperado de:
<http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12013/1/Monograf%C3%ADa%20de%20Grado%20Luis%20Fernando%20Alarc%C3%B3n%20Mayo%20de%202014.pdf>
- ALMANSA, A. (29 de agosto de 2016). *Universidad Cooperativa*. Obtenido de Universidad Cooperativa: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/1558f0f3-2afd-4a1b-879c-dd265f98c7e1/content#page=16&zoom=100,92,428>
- ARIMILLI, S. (2016). Optimization of Recycled Asphalt Pavement in Cold Emulsified Mixtures by Mechanistic Characterization. *ASCE*, 28(2), 1-4.
doi:<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001412>
- ASOPAC (2004) Cartilla del pavimento asfáltico. Bogotá D. C.: Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia.
- Bacca, I. y Piragauta, A. (2015) Análisis dinámico de una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC19) modificada con desechos de caucho-cuero provenientes de una remontadora de calzado - cemento asfáltico 60-70 y agregado de peña. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería.
- Ballester, F.; Muñoz, D.; Castro, M. y Gil, M. (2000) Definición, función y clasificación de los geotextiles. *Revista Arte y Cemento*. (30)10, 122-130. Recuperado de:
<http://www.giteco.unican.es/pdf/publicaciones/AYC30-X-2000.pdf>

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓNICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

BEDOYA, J. (2012). Asfalto Natural Modificado (Tesis de Pregrado), Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C.

Bernardo, S. (2017). Tecnologías para vías terceras. *Universidad de los Andes*, 45(1), 12-21.

Botasso, P. (2008). Reciclado de pavimentos asfálticos en frío, una forma de utilizar totalmente el R.A.P para el mantenimiento y rehabilitación de la red caminera. *Revista minera*, 23(1), 1-11.

Camacho, J. y Reyes, O. (2006). Influencia de la Temperatura y Nivel de Energía de Compactación en las Propiedades Dinámicas de una mezcla Asfáltica. Medellín: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 36, 121-130.

CORASFALTOS, (2004) "Informe técnico propiedades fisicoquímica y grado de desempeño de un asfalto recuperado de una asfáltita".

El País (2013) Mal estado de vías en Colombia genera 35% en sobrecostos a transportadores. Recuperado de: <http://www.elpais.com.co/economia/mal-estado-de-vias-en-colombiageneran-35-en-sobrecostos-a-transportadores.html>

GONZALES D., SEGRERA C. (2007) Tecnología en caliente de asfaltos naturales, para pavimentación en vías de primer orden. INVIAS (2013) Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogotá: Instituto

Nacional de Vías. INVIAS (2016) Estado de la Red Vial. Recuperado de: <https://www.invias.gov.co/index.php/redvial-nacional/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>

Lanchas, S. y Núñez, R. (2013) Fibras de celulosa aditivas para mezclas tipo SMA con propiedades mejoradas. VIII Jornada Nacional ASEFMA, p. 3-13. Recuperado de: http://www.proyectosma.eu/modules/mastop_publish/files/files_5232d2905a737.pdf pp313

Landinez, A. y Tovar, D. (2015) Mezclas densas en caliente a partir de asfalto natural con adición de fibra de coco. Tesis de Ingeniería Civil. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia, Programa de Ingeniería Civil.



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO
NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIÓICA DE
ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO.**

Autores: Alcides Landinez & John Montenegro
Maestría en Infraestructura Vial
Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.

LUNA, R. Y SANTOS, R. (2015) Asfaltos naturales: La "Mapia" y "Asfaltita" alternativas de construcción en obras de infraestructura vial en el contrato ruta del sol tramo I. Recuperado de: <http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/handle/123456789/2067>

Martínez, J y Abella, J. (2008). Comportamiento de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2 sometidas a cambios de temperatura. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil.

MIRAVETE, A. (2002) Los nuevos materiales en la construcción. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.

PALIT, S. K., SUDHAKAR REDDY, T, K. Y PANDEY, B.B. (2004), Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes.

PRANOWO, S.; JACHRIZAL, R. & JAYANTI, P. (2013) Contribución de la fibra de cococorta a la resistencia al deslizamiento del pavimento. Boletín Inteligencia Tecnológica, Núm. 6 –julio, pp.8-9. Recuperado de: http://www.alianzaafidem.org/pdfs/Inteligencia_Tecnologica_num_6_julio_2014.pdf p.8

PRANOWO S. JACHRIZAL R. & JAYANTI P. (2013) Contribution of short coconut fiber to pavement skid resistance. Recuperado de: <http://www.scientific.net/AMR.789.248>

Rondón, H. y Reyes, F. (2012) Evaluación de los parámetros mecánicos de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C. Revista Ingeniería de Construcción. 27(1), 57-74.

Rondón, H., y Reyes, F. (2015) Pavimentos, materiales, construcción y diseño. Bogotá: ECOE Ediciones.

Rosario, S.; Flores, C. y Araujo, R. (2005) Los residuos agroindustriales en la construcción civil en Brasil. Tesis de Ingeniería Industrial. Sao Paulo (Brasil): Universidad de Sao Paulo.

Savastano, H.; Rosario, S.; Flores, C. y Araujo, R. (2005) Los residuos agroindustriales en la construcción civil en Brasil, Universidad de Sao Paulo, Ingeniería Industrial.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE PRINCIPAL	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA DE ASFALTO NATURAL CON ADICIÓN DE EMULSIÓN CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO, CAL Y CEMENTO. Autores: Alcides Landinez & John Montenegro Maestría en Infraestructura Vial Universidad Santo Tomás Sede Principal. Bogotá D.C., 2025.
--	--

Yilmaz, M., Vural, B., & Kuloğlu, N. (11 de noviembre de 2011). Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt. El Servier , 25(11), 12.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.072>

ANEXO

Anexo1. Registro fotográfico.

Universidad Santo Tomás	Anexo1- Registro fotográfico	
	Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento	
	Maestría en infraestructura vial	

Anexo1. Registro fotográfico.

Universidad Santo Tomás	Anexo1- Registro fotográfico	
	Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento	
	Maestría en infraestructura vial	

EXTRACCIÓN CUANTITATIVA DEL ASFALTO (I.N.V. E-732 / 13) MÉTODO A

	
Fotografía 1. Asfaltita Natural.	Fotografía 2. Muestra dentro de la taza.
	
Fotografía 3. Muestra dentro de la taza.	Fotografía 4. Muestra con disolvente.
	
Fotografía 5. Muestra con disolvente.	Fotografía 6. Aparato de extracción.

Universidad Santo Tomás	Anexo1- Registro fotográfico	
	Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento	
	Maestría en infraestructura vial	



Fotografía 7. Aparato de extracción.



Fotografía 8. Anillo de filtro.



Fotografía 9. Extracto después de centrifugado.



Fotografía 10. Granulares después de extracción.

ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN (INV E-622-13)



Fotografía 11. Mezcla de asfaltita más agregados adicionados.



Fotografía 12. Mezcla de asfaltita más agregados adicionados.

Universidad Santo Tomás	Anexo1- Registro fotográfico	
	Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento	
	Maestría en infraestructura vial	



Fotografía 13. Mezcla de asfaltita más agregados adicionados.



Fotografía 14. Mezcla de asfaltita más agregados y emulsión.



Fotografía 15. Elaboración de las probetas.



Fotografía 16. Elaboración de las probetas.



Fotografía 17. Probetas elaboradas 3% de emulsión.



Fotografía 18. Probetas elaboradas 4% de emulsión.

Universidad Santo Tomás	Anexo1- Registro fotográfico	
	Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento	
	Maestría en infraestructura vial	



Fotografía 19. Probetas elaboradas 5% de emulsión.



Fotografía 20. Probetas elaboradas 6% de emulsión.



Fotografía 21. Probetas elaboradas 7% de emulsión.



Fotografía 22. Método para obtener la densidad.



Fotografía 23. Inmersión de las probetas en agua.



Fotografía 24. Inmersión de las probetas en agua.

Universidad Santo Tomás	Anexo1- Registro fotográfico	
	Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento	
	Maestría en infraestructura vial	



Fotografía 25. Probeta 3% de emulsión.



Fotografía 26. Probeta 4% de emulsión.



Fotografía 27. Probeta 5% de emulsión.



Fotografía 28. Probeta 6% de emulsión.



Fotografía 29. Probeta 7% de emulsión.



Fotografía 30. Probeta 7% de emulsión.

Universidad Santo Tomás	Anexo1- Registro fotográfico	
	Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento	
	Maestría en infraestructura vial	

ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA (I.N.V. E-725-13)

	
Fotografía 31. Muestra de asfaltita natural + agregados + 6% emulsión.	Fotografía 32. Muestra de asfaltita natural + agregados + 6% emulsión + 1,5% de Cemento.
	
Fotografía 33. Muestra de asfaltita natural + agregados + 6% emulsión + 1,5% de Cal.	Fotografía 34. Muestra de asfaltita natural + agregados + 6% emulsión + 0,75% de Cemento + 0,75% de Cal.
	
Fotografía 35. Especímenes curados en seco.	Fotografía 36. Especímenes curados en seco.

Universidad Santo Tomás	Anexo1- Registro fotográfico	
	Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento	
	Maestría en infraestructura vial	



Fotografía 37. Acondicionamiento de los especímenes saturados.



Fotografía 38. Acondicionamiento de los especímenes saturados.



Fotografía 39. Probeta sometida al ensayo de tracción indirecta.



Fotografía 40. Probeta sometida al ensayo de tracción indirecta.



Fotografía 41. Probeta sometida al ensayo de tracción indirecta.



Fotografía 42. Probeta sometida al ensayo de tracción indirecta.

Universidad Santo Tomás	Anexo1- Registro fotográfico	
	Diseño y evaluación de una mezcla de asfalto natural con adición de emulsión catiónica de rompimiento lento, cal y cemento	
	Maestría en infraestructura vial	



Fotografía 43. Probeta sometida al ensayo de tracción indirecta.



Fotografía 44. Probeta sometida al ensayo de tracción indirecta.



Fotografía 45. Probeta abierta luego del ensayo.



Fotografía 46. Probeta abierta luego del ensayo.



Fotografía 47. Probeta abierta luego del ensayo.



Fotografía 48. Probeta abierta luego del ensayo.