

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES
CON AGREGADOS DEL RÍO CHICAMOCHA**

**KAREN DAYANNA PINTO MORENO
ANA MARÍA RAMOS MÉNDEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2019**

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES
CON AGREGADOS DEL RÍO CHICAMOCHA**

**KAREN DAYANNA PINTO MORENO
ANA MARÍA RAMOS MÉNDEZ**

Trabajo de grado como requisito para optar al título de ingeniero civil

Director del trabajo de grado

ING. MSC. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Enero 2019

DEDICATORIA

A Dios, quien me dio la fortaleza y la sabiduría necesaria para la realización de este estudio, por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida y haberme dado salud y bendición para lograr mis propósitos como persona y como profesional.

A mi madre y a mi padre, por haberme apoyado emocional y económicamente en cada momento de mi trayectoria, gracias a su amor incondicional, valores, consejos, fortaleza y motivación que me brindaron para poder culminar mi carrera profesional.

A mi compañera de trabajo de grado, quien siempre estuvo conmigo desde el comienzo de este sueño de ser profesional y hoy estamos acá juntas terminando este camino que comenzamos, gracias a su constancia y perseverancia que siempre me brindo en cada momento compartido.

Karen Pinto

A Dios, por haberme dado la vida y haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional, por sus bendiciones día a día y por ser mi guía en todo momento y nunca abandonarme.

A mis padres, por su amor incondicional, su cariño, su entrega, y sus consejos que me han ayudado a ser una mejor persona; por darme la fortaleza para nunca desistir y finalmente, por haberme dado el estudio y apoyarme en mi decisión de convertirme en ingeniera civil.

A mi hermano, por estar siempre presente, por acompañarme a donde voy y por su apoyo a lo largo de este camino.

A mi compañera de tesis, porque con ella nos hemos apoyado mutuamente en nuestra formación profesional incluso desde el primer día, por su confianza, paciencia y respeto en cada momento y actividad realizada.

Ana María Ramos

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de trabajo de grado, el Ing. Msc Julián André Galvis Flórez por su dedicación, apoyo y tiempo para la realización del presente proyecto.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, y en especial a la facultad de Ingeniería Civil, por prestarnos las instalaciones y permitirnos la realización de los ensayos y pruebas requeridas. Así mismo, a los laboratoristas por su colaboración y acompañamiento en el desarrollo de los ensayos.

A la empresa Multinsa S.A ubicada en la ciudad de Barrancabermeja, Santander, por brindarnos uno de los materiales necesarios para nuestro trabajo.

A la facultad de ingeniería Electrónica por prestarnos la cámara termográfica y permitirnos ejecutar uno de los objetivos presentes en este trabajo.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. JUSTIFICACIÓN	18
4. MARCO TEÓRICO	20
4.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	20
4.1.1 Mezcla asfáltica drenante	21
4.1.2 Ventajas	22
4.1.3 Desventajas	23
4.2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	24
5. METODOLOGÍA.....	28
5.1 FASE I	28
5.1.1 Recopilación bibliográfica	28
5.1.2 Adquisición de material para la elaboración de mezclas	29
5.1.3 Caracterización de los agregados	29
5.1.4 Caracterización del asfalto.....	37
5.1.4.1 Cemento asfáltico convencional (60-70).....	37
5.1.4.2 Cemento asfáltico modificado con Polímeros tipo IIB.....	40
5.2 FASE II	41
5.2.1 Elaboración de probetas tipo Marshall.....	41
5.2.2 Ensayo Marshall	43
5.3 FASE III	45
5.3.1 Elaboración de probetas drenantes	45
5.3.2 Ensayo Marshall	47
5.4 FASE IV.....	48
5.4.1 Elaboración de probetas	48

5.4.2	Comparación de temperaturas entre las muestras convencionales y drenantes	50
5.4.3	Ensayo de permeabilidad.	50
5.4.4	Ensayo Cántabro de pérdida por desgaste.....	51
5.4.5	Ensayo Marshall	52
5.4.6	Ensayo GMM (Gravedad Específica Máxima)	53
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
6.1	FASE I	55
6.1.1	Caracterización del agregado	55
6.1.2	Cemento asfáltico convencional (60-70).....	56
6.1.3	Cemento asfáltico modificado con polímeros tipo II b.....	58
6.2	FASE II	59
6.2.1	Elaboración y fallo de probetas tipo Marshall.	59
6.3	FASE III	63
6.3.1	Elaboración y fallo de probetas tipo Marshall	63
6.4	FASE IV.....	68
6.4.1	Comparación de temperaturas de mezclas convencionales y mezclas drenantes	68
6.4.2	Prueba de permeabilidad.....	69
6.4.3	Ensayo cántabro de pérdida por desgaste	70
6.4.4	Fallo de probetas convencionales y drenantes óptimas tipo Marshall	70
6.5	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO.....	72
6.5.1	Estabilidad	72
6.5.2	Flujo	73
6.5.3	Porcentaje de vacíos con aire.....	74
6.6	VERIFICACIÓN DE RESULTADOS	75
7	CONCLUSIONES.....	77
	BIBLIOGRAFIA.....	78
	ANEXOS	79

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Sección transversal de la estructura generalmente de un pavimento	20
Figura 2. Efecto de Hidroplaneo.	21
Figura 3. Aplicación de las mezclas drenantes en algunos países	25
Figura 4. Estructura de los pavimentos de prueba.....	26
Figura 5. Resumen Fases.....	28
Figura 5. Estabilidad y porcentaje de asfalto de probetas convencionales.....	62
Figura 6. Flujo y porcentaje de asfalto de probetas convencionales.....	62
Figura 7. Vacíos con aire y porcentaje de asfalto de probetas convencionales.....	63
Figura 8. Estabilidad vs Porcentaje de asfalto de mezclas drenantes	66
Figura 9. Flujo vs porcentaje de asfalto de mezclas drenantes	66
Figura 10. Porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de asfalto de mezclas drenantes.....	67
Figura 11. Comparación de estabilidad entre las mezclas.....	73
Figura 12. Comparación de flujo entre las mezclas.	74
Figura 13. Comparación de flujo entre las mezclas.	75

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág.
Fotografía 1. Serie de tamices para la granulometría.	29
Fotografía 2. Ensayo Máquina de los ángeles.	30
Fotografía 3. Ensayo en el quipo Micro-Deval	30
Fotografía 4. Ensayo 10% de Finos.....	31
Fotografía 5. Muestras del ensayo de solidez	32
Fotografía 6. Ensayo para hallar el índice de plasticidad.....	33
Fotografía 7. Ensayo para hallar equivalente de arena.	34
Fotografía 8. Ensayo de alargamiento y aplanamiento.....	34
Fotografía 9. Ensayo de angularidad	35
Fotografía 10. Ensayo para hallar densidad del agregado grueso.....	36
Fotografía 11. Ensayo para hallar la densidad del asfalto convencional.	37
Fotografía 12. Ensayo de penetración	38
Fotografía 13. Ensayo punto de ablandamiento	38
Fotografía 14. Ensayo de ductilidad.....	39
Fotografía 15. Ensayo para hallar punto de inflamación	39
Fotografía 16. Punto de inicio de ensayo de ductilidad.....	41
Fotografía 17. Cantidades Separadas	41
Fotografía 18. Mezclado y compactación de las mezclas	42
Fotografía 19. Extracción de probetas.	43
Fotografía 20. Peso muestra seca en el aire.	43
Fotografía 21. Ensayo Marshall	44
Fotografía 22. Muestra de mezcla drenante.	46
Fotografía 23. Comparación muestra convencional (izquierda) y drenante (derecha).	49
Fotografía 24. Toma de temperaturas de las probetas en la sombra.	50
Fotografía 25. Toma de temperaturas de las probetas expuestas al sol.	50
Fotografía 26. Prueba de permeabilidad.....	51
Fotografía 27. Muestras antes (izquierda) y después del ensayo (derecha)	51
Fotografía 28. Muestra desintegrada.	53
Fotografía 29. Ejecución ensayo GMM.....	53
Fotografía 31. Imágenes de luz visible	68
Fotografía 32. Imágenes de luz visible	69

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Franja granulométrica para mezcla drenante.....	22
Tabla 2. Datos del ensayo de desgaste por la máquina de los ángeles.	30
Tabla 3. Datos del ensayo Micro-Deval.	31
Tabla 4. Datos ensayo 10% de finos en condición seca.....	31
Tabla 5. Datos ensayo 10% de finos en condición saturada.	32
Tabla 6. Datos ensayo de solidez para partículas finas.....	32
Tabla 7. Datos ensayo de solidez para partículas gruesas.....	33
Tabla 8. Datos ensayo de impurezas en agregado grueso.....	33
Tabla 9. Datos de ensayo equivalente de arena.....	34
Tabla 10. Datos de ensayo de alargamiento y aplanamiento.	35
Tabla 11. Resultados del ensayo de alargamiento y aplanamiento.	35
Tabla 12. Datos de ensayo caras fracturadas.	35
Tabla 13. Datos de ensayo caras fracturadas.	36
Tabla 14. Datos densidad del agregado grueso	36
Tabla 15. Datos densidad del agregado fino.	37
Tabla 16. Datos para hallar la densidad del asfalto convencional.	37
Tabla 17. Datos ensayo de penetración.	38
Tabla 18. Datos ensayo de ablandamiento.....	38
Tabla 19. Datos ensayo de la Copa Cleveland.....	39
Tabla 20. Datos para hallar la densidad del asfalto modificado.	40
Tabla 21. Datos ensayos de penetración.....	40
Tabla 22. Datos ensayos de ablandamiento.....	40
Tabla 23. Datos de ensayo de la copa Cleveland.....	41
Tabla 24. Tamices para mezclas convencionales.....	42
Tabla 25. Dimensiones y pesos de las probetas convencionales.....	44
Tabla 26. Datos obtenidos en el ensayo Marshall	45
Tabla 27. Tamices para mezclas drenantes.	45
Tabla 28. Dimensiones y pesos de las probetas drenantes.....	47
Tabla 29. Datos obtenidos en el ensayo Marshall.	48
Tabla 30. Dimensiones y pesos de las probetas convencionales óptimas.	49
Tabla 31. Dimensiones y pesos de las probetas drenantes óptimas.	49
Tabla 32. Datos ensayo Cántabro.	52
Tabla 33. Datos ensayo Cántabro luego de 24 horas en agua.	52
Tabla 34. Resultados de ensayo Marshall de las mezclas convencionales óptimas.	52
Tabla 35. Resultados de ensayo Marshall de las mezclas drenantes óptimas.	53
Tabla 36. Datos obtenidos en el ensayo de GMM para mezclas convencionales.	54

Tabla 37. Datos obtenidos en el ensayo de GMM para mezclas drenantes.	54
Tabla 38. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Nivel de tránsito NT2	55
Tabla 39. Requisitos de los agregados para mezclas drenantes.....	56
Tabla 40. Verificación de las especificaciones de cemento asfáltico convencional (60-70).	57
Tabla 41. Verificación de las especificaciones de cemento asfáltico modificado con polímeros tipo IIb.	59
Tabla 42. Datos de peso específico y porcentaje de vacíos de las probetas convencionales.	60
Tabla 43. Resultados de las probetas convencionales de ensayo Marshall	61
Tabla 44. Resultados de Ensayo Marshall para porcentaje óptimo	61
Tabla 45. Datos de peso específico y porcentaje de vacíos de las probetas drenantes.....	64
Tabla 46. Resultados de ensayo Marshall probetas drenantes.	65
Tabla 47. Resultados de Ensayo Marshall para porcentaje óptimo	66
Tabla 48. Comparación de temperaturas iniciales y finales de las probetas	69
Tabla 49. Datos prueba de permeabilidad.	70
Tabla 49. Pesos y dimensiones de las mezclas convencionales óptimas	71
Tabla 50. Datos de pesos específicos y porcentaje de vacíos de las mezclas convencionales óptimas.....	71
Tabla 51. Resultados de ensayo Marshall de las mezclas convencionales óptimas	71
Tabla 52. Pesos y dimensiones de las mezclas drenantes óptimas	71
Tabla 53. Datos de pesos específicos y porcentaje de vacíos de las mezclas convencionales óptimas.....	72
Tabla 54. Resultados de ensayo Marshall de las mezclas drenantes óptimas	72
Tabla 55. Comparación de estabilidad entre las mezclas.	73
Tabla 56. Comparación de flujo entre las mezclas.	74
Tabla 57. Comparación del porcentaje de vacíos entre las mezclas.	74
Tabla 59. Resumen general para las mezclas convencionales	75
Tabla 60. Resumen general para las mezclas drenantes	76

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO 1	79
ANEXO 2	80

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES CON AGREGADOS DEL RÍO CHICAMOCHA

AUTOR(ES): Karen Dayanna Pinto Moreno
Ana María Ramos Méndez

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Ing. MSc. Julián Andrés Galvis Flórez

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad realizar un estudio del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas drenantes, las cuales tienen buena permeabilidad, ya que posee un alto porcentaje de vacíos con aire en su estructura permitiendo el paso del agua, comparándolas con el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas convencionales, para así, indagar más a fondo acerca de sus propiedades. Por consecuencia, se realizaron 4 fases. En la fase 1, se realizó la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico. En la fase 2, se elaboraron y fallaron el primer grupo de probetas convencionales tipo Marshall, tres por cada porcentaje (4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%) con los cuales se estableció el porcentaje óptimo de asfalto 5.3%. En la fase 3, se elaboraron probetas drenantes tipo Marshall siguiendo el diseño especificado para el ensayo del cántabro (INV E 760-13), se usaron porcentajes (4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%) con los cuales se estableció el porcentaje óptimo de asfalto 5.6%. Y por último en la fase 4, se fabricaron nuevas probetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico encontrado en la fase 2 y fase 3, con el fin de comparar sus propiedades mecánicas (Estabilidad y Flujo), temperatura y verificar el cumplimiento de las especificaciones (% vacíos con aire, pérdida por desgaste, y permeabilidad), de los ensayos ejecutados se puede determinar que las mezclas asfálticas convencionales presentan un mejor comportamiento frente a cargas de tránsito altas debido a que tienen más resistencia y menos deformación que las mezclas asfálticas drenantes.

PALABRAS CLAVE:

Mezcla asfáltica convencional, Mezcla asfáltica drenante, Asfalto, cemento asfáltico modificado

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: MECHANICAL BEHAVIOR OF DRAINING ASPHALT MIXES WITH AGGREGATES OF THE CHICAMOCOA RIVER

AUTHOR(S): Karen Dayanna Pinto Moreno
Ana María Ramos Méndez

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ing. MSc. Julián Andrés Galvis Flórez

ABSTRACT

The purpose of this work is to perform a study of the mechanical behavior of asphaltic drainage mixes, which have good permeability, since it has a high percentage of voids with air in its structure allowing the passage of water, comparing them with the mechanical behavior of conventional asphalt mixtures, in order to investigate more thoroughly about their properties. Consequently, 4 phases were performed. In phase 1, the characterization of aggregates and asphalt cement was carried out. In phase 2, the first group of conventional Marshall-type specimens were made and failed, three for each percentage (4%, 4.5%, 5%, 5.5% and 6%) with which the optimum percentage of asphalt 5.3% was established. In phase 3, draining samples were made Marshall type following the design specified for the trial of the Cantabrian (INV E 760-13), percentages were used (4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5% and 7%) with which the optimum percentage of asphalt 5.6% was established. And finally in phase 4, new specimens were made with the optimum percentage of asphalt cement found in phase 2 and phase 3, in order to compare their mechanical properties (Stability and Flow), temperature and verify compliance with specifications (percentage of Air voids, loss by wear, and permeability), from the tests carried out, it can be determined that conventional asphalt mixes have a better performance against high traffic loads because they have more strength and less deformation than the draining asphalt mixes.

KEYWORDS:

Conventional asphalt mix, Asphaltic drainage mix, Asphalt, modified asphalt cement

INTRODUCCIÓN

Actualmente, una de las principales causas de accidentes de tránsito en la mayoría de los países es el efecto de hidroplaneo, el cual se desarrolla cuando hay presencia de lluvia debido a la gran acumulación de agua que se genera en la superficie de un pavimento convencional, ya que su estructura está conformada por una carpeta de rodadura asfáltica, densa e impermeable, la cual evita el desgaste temprano en la estructura. Por consiguiente, se debe asegurar la evacuación del agua a través de sistemas de drenaje. Además, se ha evidenciado que el proceso de evacuación hacia los sistemas de drenaje es un poco lento y en algunos casos no se evacua completamente el agua, por tal motivo se generan dichos accidentes. [1]

Por esta razón, el presente trabajo tiene como finalidad realizar un estudio del comportamiento de mezclas asfálticas drenantes, la cual presenta una característica permeable mayor en comparación con una mezcla asfáltica convencional, ya que permite el paso del agua a través de su estructura para posteriormente ser evacuada hacia los sistemas de drenaje. Por tal motivo, el uso adecuado de este tipo de mezclas drenantes genera mejores resultados para el control y disminución de algunos factores tales como los accidentes causados por el hidroplaneo y el ruido.

En consecuencia, se buscó información a través de una serie de ensayos para el diseño de las mezclas asfálticas drenantes y convencionales según las Especificaciones generales de construcción y carreteras. De igual forma, se obtuvieron resultados que permitieron el cálculo de cada una de las propiedades del comportamiento mecánico según dicha norma, y posteriormente se hizo un análisis y una comparación para determinar la viabilidad y la eficiencia de cada una de estas mezclas en presencia del agua.

Finalmente, este trabajo está conformado por una serie de capítulos en donde se presenta la problemática existente, la metodología con la cual se abordó este estudio, y, por último, los resultados que se obtuvieron al final del trabajo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la estructura de un pavimento flexible se debe tener en cuenta que una de sus capas principales es la carpeta de rodadura, ya que sobre ella circula el tráfico de vehículos. Sin embargo, una de las principales características del diseño de un pavimento convencional flexible es impedir el paso del agua a través de su estructura, por lo que puede generar daños en el mismo, ya sea en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, y otros, como es el desplazamiento de la película de asfalto, presión de poros, ruptura de la película de asfalto con el agregado, pérdida de cohesión interna del asfalto y los agregados, entre otros.

Por consiguiente, cuando hay presencia de lluvia, se genera una película de agua en la superficie de esta, hasta desarrollar un efecto de hidroplaneo, el cual se caracteriza por ser una de las causantes vitales de los accidentes vehiculares en el mundo. De hecho, durante el año 2017 se presentaron 225 accidentes por esta causa, que lamentablemente les causó la muerte a 22 colombianos y generó lesiones graves a 332 más. [2]

De acuerdo con lo anterior, se tomó la iniciativa de realizar un estudio de un pavimento que este constituido por una carpeta de rodadura asfáltica drenante, la cual puede ayudar a bajar los índices de accidentalidad y disminuir el ruido del tráfico causado por los neumáticos de los vehículos, ya que la superficie porosa se encarga de absorber el sonido y permitir que una determinada cantidad del aire presente alrededor de los neumáticos sea presionado dentro de los poros.

Como solución a los problemas mencionados en los pavimentos con presencia de agua, se buscó aplicar este tipo de mezcla drenante, con el fin de conseguir un alto porcentaje de vacíos, utilizando mayor cantidad y tamaño de agregados gruesos, que permitan el drenaje del agua superficial y su adecuada evacuación hacia las zonas laterales de la vía.

¿Si se evaluará el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas drenantes, entonces se podría determinar si son válidas para su uso en Santander?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas drenantes usando agregados del Río Chicamocha, tomando como referencia una mezcla asfáltica convencional.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar las propiedades de una mezcla asfáltica drenante con una mezcla asfáltica convencional.
- Establecer las condiciones óptimas de comportamiento de la mezcla propuesta, basado en sus capacidades mecánicas.
- Analizar las temperaturas de una mezcla asfáltica drenante y una convencional mediante la utilización de una cámara termográfica.

3. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo se desarrolló con el propósito de analizar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas drenantes, para así, evaluar la posibilidad de emplear este tipo de metodología, debido a los problemas cotidianos de seguridad vial en los pavimentos de nuestro país tales como el ruido generado por los neumáticos, los accidentes y otros, los cuales son causados por agua retenida en la superficie de estos. Además, fue útil establecer un diseño de mezclas con la utilización de materiales de nuestra región, y así, confirmar que las ventajas generadas de estas mezclas contribuyen al mejoramiento de nuestros pavimentos.

Este tipo de mezclas drenante fueron desarrolladas principalmente en Estados Unidos desde la década de 1950, las cuales se empleaban como capas de menor espesor con el fin de mejorar la textura superficial del pavimento deslizante. En Europa, fueron desarrolladas en Francia en 1968 con mucho éxito, pues notaban que años siguientes, la estructura de pavimento mantenía una buena rugosidad superficial y un adecuado drenaje. Pero posteriormente, Francia dejó de practicar esta alternativa y fue retomada en España en el año 1985 donde se estudió con profundidad este tipo de mezclas. [3]

En Colombia, se evidencia un desarrollo académico e investigativo en la modificación de asfaltos y mezclas asfálticas, pero, su aplicación ha sido inferior debido a la falta de caracterización de las propiedades que posee cada región en cuanto a materiales y al suelo. Por lo general, los estudios realizados en Colombia se basan en mezclas asfálticas modificadas con la utilización de aditivos (polímeros), los cuales son materiales de desecho o del reciclaje (Caucho, icopor, látex natural, desecho PVC, elastómero, etc.) con el fin de modificar o mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas, siendo esto un gran aporte debido a que esto contribuye de forma significativa en el ambiente y al desarrollo sostenible en el área de pavimentos. De igual forma, al compararse una mezcla convencional y una modificada con policling B-200, se obtiene que la estabilidad máxima aumenta de 3250 lb a 4100 lb, y que el flujo disminuye en un 27%. [4]

Además, en Bogotá, se han hecho algunas investigaciones sobre las propiedades hidráulicas en la Pontificia Universidad Javeriana, así mismo, un trabajo de grado realizado por Polanco y Sánchez, el cual se basó en la utilización de los estudios anteriores de las propiedades hidráulicas de estos, para modificarlas y adaptarlas en la realización de diferentes metodologías de diseño para ser adaptadas en Bogotá [1].

Además, es importante mencionar que se hizo uso de la norma INVIAS 2013, en donde ya se encuentra establecido unas especificaciones técnicas de construcción para el estudio, diseño y construcción de los pavimentos flexibles porosos. Por tal motivo, se buscó fabricar una mezcla asfáltica drenante con el fin de caracterizar sus propiedades por medio de ensayos establecidos según la Norma INVIAS 2013 con la utilización de agregados del Río Chicamocha, siendo este una de las principales fuentes de agregados, ya que no se registran antecedentes de estos pavimentos en la región de Santander, y finalmente, realizar una comparación de la mezcla asfáltica drenante con la mezcla asfáltica convencional.

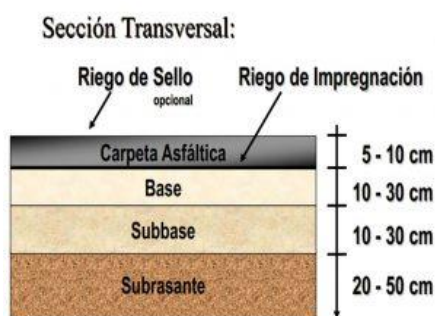
4. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolló un marco teórico, el cual proporciona una información adecuada para que el lector tenga una idea más clara acerca de este tema.

4.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El pavimento es aquel conjunto de capas que se encuentran superpuestas, las cuales se sitúan sobre el terreno natural o nivelado para intensificar la magnitud de su resistencia y funcionar para el tránsito de vehículos en situaciones de continuidad en el tiempo y el espacio, así como se ve evidenciado en la Figura 1. [5]

Figura 1. Sección transversal de la estructura de un pavimento



Fuente: Tipo de mezcla asfáltica para construcción de carretera, TREND, <http://website.mott.pe/72569443/2017/09/02/tipos-mezcla-asfaltica-construccion-carretera/>.

Las irregularidades superficiales surgen en la carpeta de rodadura, la primera capa del pavimento, y se deben principalmente a los materiales utilizados y a la metodología constructiva. Es por lo que, en un pavimento se debe asegurar que estas deformaciones superficiales no impidan la comodidad del conductor y eviten los accidentes en las vías.

Una de las causantes primordiales de los accidentes vehiculares es el fenómeno del Hidroplaneo, el cual es la principal causa del deslizamiento y el volteo de los vehículos. Este fenómeno ocurre cuando se genera una película de agua sobre el neumático, según la velocidad a la que va el vehículo y a la condición en que se encuentran los neumáticos y posteriormente, se pierde el control del vehículo debido a la falta de fricción entre los neumáticos y la superficie del pavimento, así como se evidencia en la Figura 2. [6]

Figura 2. Efecto de Hidroplaneo.



Fuente: Aquaplaning, <http://www.enciclopediadellautomobile.it/it/i-1464-0/aquaplaning>.

4.1.1 Mezcla asfáltica drenante

Es de vital importancia que este tipo de pavimento tengan un considerable porcentaje de vacíos para lograr un drenaje adecuado, el cual dependerá del uso de granulometría especial y de la calidad de los agregados utilizados, que constan de un alto porcentaje de agregados gruesos y pocos finos.

En Colombia las mezclas drenantes son conocidas como MD, según el INVIAS 2013, y para el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) esto se modifica a MDr15, donde el número se refiere a el tamaño máximo aproximado en mm de la partícula del agregado pétreo de la mezcla, y la granulometría de estas es la misma.

Según AASHTO, los pavimentos asfálticos drenantes se encuentran diseñados para cargas de tránsito reducidas, ya que el efecto destructivo de cargas altas y sobrecargas es muy significativo para este tipo de mezclas. Mientras un vehículo mediano le transmite al pavimento una carga por eje del orden de 700 Kg, el eje simple de un vehículo pesado, en el límite de la reglamentación vigente, alcanza hasta 11.000 Kg, es decir, 16 veces más que las de un vehículo liviano y el efecto destructivo sobre la estructura es 60.000 veces mayor. [7]

Conforme a las Especificaciones generales de construcción de carreteras en el artículo 453 – 13, para que una mezcla asfáltica sea drenante debe cumplir con lo siguiente:

- Granulometría definida de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. Franja granulométrica para mezcla drenante

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm / U. S. Standart)						
	19 3/4"	12,5 1/2"	9,5 3/8"	4,75 No. 4	2 No. 10	0,425 No. 40	0,075 No. 200
ÚNICA	100	70-100	50-75	% PASA			
				15-32	9-20	5-12	3-7
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (+ -)		4%			3%		1%

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras Art 453, 2013.

- Deben tener un porcentaje de vacíos mayor que las mezclas asfálticas convencionales para dejar que el agua evacúe con facilidad y pueda ser conducida hacia los sistemas de drenaje.
- El efecto de fricción del neumático al pavimento.
- El ruido generado en el interior y en el exterior del vehículo.
- El deterioro de los neumáticos y los vehículos.

4.1.2 Ventajas

Las mezclas asfálticas drenantes presentan ciertas ventajas las cuales las hace diferentes a las mezclas asfálticas convencionales. Entre ellas encontramos las siguientes:

- **Eliminación de hidroplaneo:** La adherencia en un pavimento drenante es mucho mejor que en una convencional, ya que la primera evacua más rápido el agua de la superficie. Dicho esto, se genera una elevada resistencia al deslizamiento en caso de lluvia, logrando reducir o eliminar notablemente un posible efecto de hidroplaneo.
- **Resistencia al deslizamiento con pavimento en presencia de agua:** Exista o no el efecto de hidroplaneo, la lluvia suele disminuir la resistencia al deslizamiento de la carpeta de rodadura. Las mezclas drenantes pueden disminuir este efecto permitiendo la interacción entre el neumático y el pavimento debido a la macrotextura presente. Consecuentemente, se impide que el conductor pierda el control del vehículo logrando una mayor seguridad incluso a altas velocidades.

- **Reducción de ruido al paso de vehículos:** El 80% de la energía acústica emitida a la atmosfera es proveniente del tráfico vehicular, por lo que la contaminación auditiva de origen vial se convierte en un factor importante de controlar.

Las mezclas asfálticas drenantes absorben el ruido generado por el contacto entre el neumático y la superficie del pavimento cuando el vehículo se encuentra en circulación, ya que los poros interconectados favorecen el paso de aire permitiendo así, disipar los ruidos hacia el interior. Gracias a esta disminución del ruido se logra favorecer a los conductores y al entorno en general, ya que se disminuyen los niveles de ruido entre 3 y 6 decibeles en comparación con una mezcla asfáltica convencional.

- **Evita la reflexión de la luz:** En momentos de lluvia o cuando llega la noche, los usuarios se ven afectados debido al deslumbramiento producido por las de luces de los vehículos que transitan por el sentido contrario, produciendo una reflexión de la luz sobre los pavimentos convencionales, los cuales son lisos e impermeables. En cambio, en los pavimentos drenantes, los cuales presentan una textura rugosa, dispersan la luz mejorando las condiciones de visibilidad del conductor. [8]

4.1.3 Desventajas

Dicho lo anterior, de ente tipo de mezclas también surgen diferentes desventajas o inconvenientes con relación a la mezcla asfáltica convencional:

- **Mayor costo inicial:** Al elaborarse con asfaltos modificados y agregados con mejor calidad que la mezcla asfáltica la convencional, genera un costo directo mayor tanto en construcción como en mantenimiento.
- **Colmatación de poros:** Para lograr un buen drenaje en este tipo de pavimento es necesario emplear mezclas con mínimo un 20% de vacíos. Sin embargo, con el paso del tiempo, los huecos se van colmatando debido a la acumulación de polvo, materia orgánica, arena y otros agentes contaminantes. Por lo que el mantenimiento de estas mezclas se debe realizar periódicamente una vez terminada su construcción ya que de esto depende la durabilidad del pavimento.
- **Drenaje lateral exigente:** la capacidad drenante del pavimento permite evacuar el agua a través de drenes laterales, lo cual exige la construcción

de canales y ductos especializados destinados a la evacuación de estas aguas. [9]

4.2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

A continuación, se van a presentar algunas referencias de antecedentes relacionados a documentos que han contribuido con el tema de las mezclas drenantes para el drenaje de pavimentos. En primer lugar, las primeras apariciones de los pavimentos flexibles drenantes se presentaron en algunos aeropuertos del Reino unido, y luego en Estados unidos en 1950, las cuales se empleaban como capas de menor espesor de 2 cm, con el fin de mejorar la textura superficial del pavimento deslizante. [9]

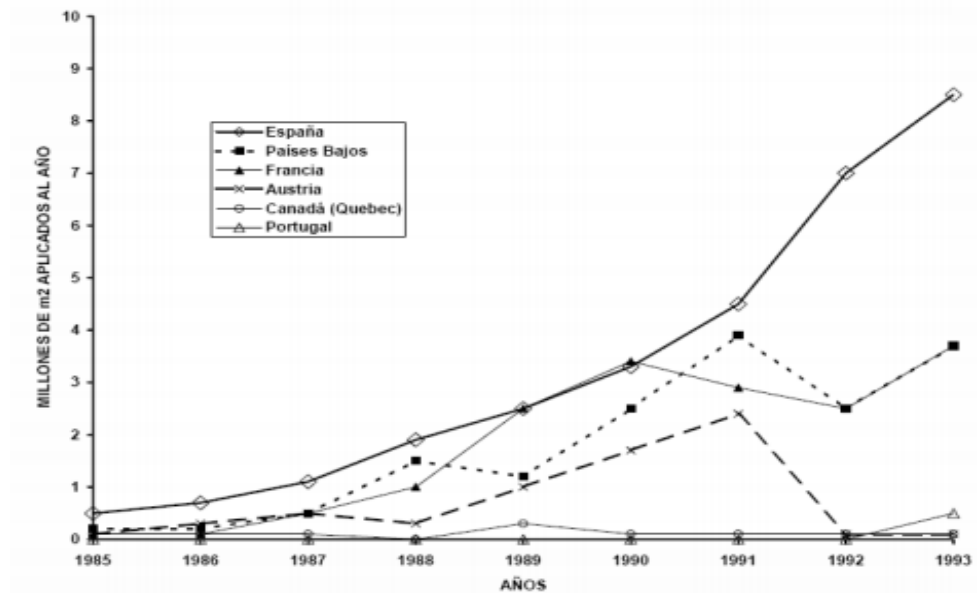
Posteriormente, el uso de estos pavimentos drenantes comenzó a tener una evolución más significativa, ya que la carpeta de rodadura desarrolló la capacidad de absorber y drenar el agua, eliminando la película de agua que se genera entre el pavimento y el neumático de los vehículos. Con el paso del tiempo, se determinó que los pavimentos drenantes también tenían la facultad de absorber el ruido generado por el tránsito de los vehículos, lo que conllevó a tener más ventaja sobre el pavimento convencional y a aumentar su uso.

En Europa, fueron desarrolladas en Francia en 1968 con mucho éxito, pues notaban que años siguientes, la estructura de pavimento mantenía una buena rugosidad superficial y un adecuado drenaje, pero debido al bloqueo por la acumulación de sedimentos entre los vacíos de la mezcla se detuvo su uso. No obstante, fue retomada en España en el año 1985 donde se estudió con profundidad este tipo de mezclas.

De acuerdo con los estudios desarrollados en España por la Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos de Santander, en donde se tenía como objetivo principal mejorar las condiciones del tráfico en situaciones de lluvia, se obtuvo como resultado la implementación de un espesor de 3 a 5 cm y la normalización de dos ensayos los cuales fueron L.S.C (Permeabilidad in situ) y perdida por desgaste con la utilización de la máquina de los ángeles. [3]

Desde esas investigaciones, la aplicación de este tipo de mezclas se ha difundido con más frecuencia por diversas partes del mundo, ajustándose a diferentes condiciones climáticas y técnicas dirigidas a países como Suiza, Japón, Malasia o China, no solo su implementación en carreteras viales sino en otros lugares tales como estacionamientos vehiculares y aeropuertos. Por tal motivo, se evidencia la siguiente Figura 3 en donde se puede observar la popularidad que ha tenido estas mezclas en algunos países.

Figura 3. Aplicación de las mezclas drenantes en algunos países

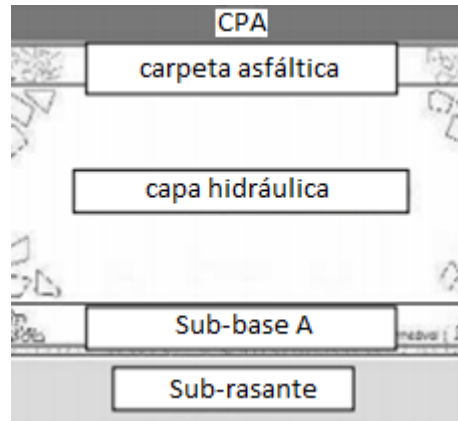


Fuente: Comportamiento mecánico de mezcla asfáltica drenante.

En países como España, Francia y países bajos, se observa el acelerado nivel de aplicación, por ejemplo, en España a partir del año 1986 se empezó a desarrollar obras con este tipo de mezclas no experimentales y finalizando el año de 1990 ya se habían construido 10.000.000 de metros cuadrados, actualmente, se registran más de 100 millones de metros cuadrados.

Por otro lado, en México se ha ejecutado a gran escala el desarrollo de este tipo de mezclas con la implementación de materiales con ligantes hidráulicos, En Brasil se han construido algunas zonas de ensayo y prueba de este tipo de pavimento. Los estudios ejecutados evidenciaron que los asfaltos modificados aumentan el periodo de servicio del pavimento. Las estructuras desarrolladas se muestran en la Figura 4. [10]

Figura 4. Estructura de los pavimentos de prueba de un Concreto asfáltico poroso (CPA).



Fuente: Comportamiento mecánico de mezcla asfáltica drenante, <http://bdigital.unal.edu.co/50603/1/25281594.2013.pdf>.

De acuerdo con la Figura 4, se puede evidenciar que la estructura del pavimento se encuentra compuesta por una capa de concreto asfáltico poroso, una carpeta asfáltica, una capa hidráulica que en este caso sería la base granular, una sub-base A que sería una sub-base granular y finalmente, una subrasante que es el suelo natural.

En Colombia, se han realizado algunos estudios relacionados con mezclas asfálticas, en los cuales se utilizaron asfaltos modificados. Algunas de las observaciones se evidencian a continuación:

- Cuando se modifica o cambia la llenante mineral de este tipo de pavimentos por fino-cemento, se adquiere un aumento de la resistencia por deformación permanente.
- También al incorporarse el elastómero en este tipo de mezclas se evidencio una disminución significativa en el desgaste de la briqueta en la ejecución del ensayo de cántabro.
- Del mismo modo, el comportamiento evidenciado por el asfalto modificado tiene como resultado un módulo complejo mayor que el asfalto sin ninguna modificación. [10]
- Según la Universidad Javeriana de Bogotá, El factor más importante en el funcionamiento de este tipo de mezclas es la colmatación y para que sea eficiente se debe realizar el mantenimiento adecuado y periódico de este

pavimento, lo cual limita la aplicación de este sistema debido a su alto costo de sostenimiento [1]

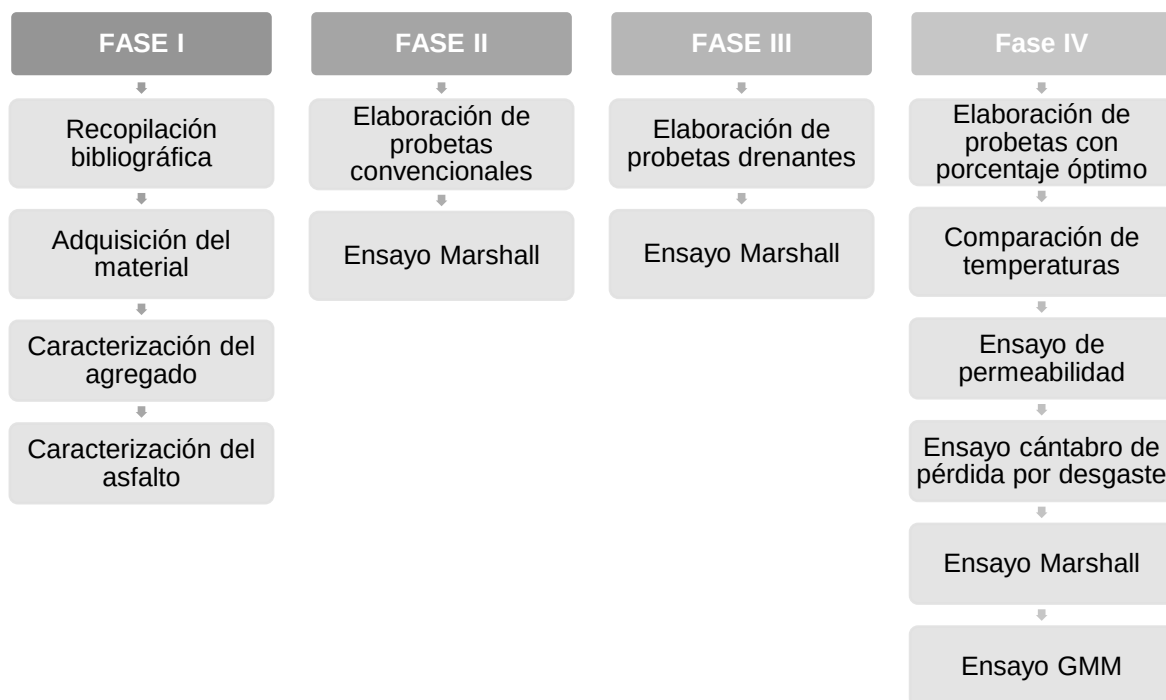
Actualmente en Colombia se tienen algunos tramos de prueba como los siguientes:

- Concesión Autopistas del Café “Dosquebradas – Pereira y Club de Tiro – Pereira en una longitud de 2800 m. Se instaló mezcla asfáltica Drenante”
- Concesión Vial de los Andes Coviandes. Sector PR 50 + 00 – PR 55 + 100 en una longitud de 4900 m. [10]

5. METODOLOGÍA

El plan de desarrollo de este estudio se llevó acabo en cuatro fases como se evidencia en la figura 5, las cuales constan de una clasificación según la perspectiva, ya que se ejecutaron algunos seguimientos y ensayos de laboratorio.

Figura 5. Resumen Fases



Fuente: Elaboración propia

5.1 FASE I

Esta fase consistió en la adquisición del material para la elaboración de las probetas, y, además, se realizó la respectiva caracterización de los agregados y del cemento asfáltico.

5.1.1 Recopilación bibliográfica

Se consultó la información necesaria para la realización de este proyecto en libros como “Ingeniería de Pavimentos para Carreteras” de Alfonso Montejo Fonseca, donde se encuentran algunos datos de referencia de otros países; en revistas científicas, en trabajos de grado de la Pontificia Universidad

Javeriana, Universidad Nacional de Colombia, Universidad del Salvador, entre otras. Además, se realizó la consulta en las normas de ensayos de materiales para carreteras y especificaciones generales de construcción de carreteras registradas en el INVIAS – 2013 para el diseño de las mezclas asfálticas drenantes y convencionales.

5.1.2 Adquisición de material para la elaboración de mezclas

Se utilizaron agregados del río Chicamocha, ya que este agregado presenta grandes usos en la ingeniería civil santandereana debido a su ubicación en la zona. De igual forma, presenta adecuados comportamientos en su uso para la elaboración de mezclas convencionales, también se buscó estudiar el comportamiento mecánico de este agregado. Para la adquisición de dicho material nos trasladamos hasta un depósito llamado Arenera Los Pinos LTDA, el cual se encuentra ubicado en el Km 51 vía San Gil – Bucaramanga. Por consiguiente, se anexa el certificado de procedencia del agregado, en donde se verifica que es del río Chicamocha. VER ANEXO 1.

5.1.3 Caracterización de los agregados

Una vez obtenido el material, se procedió a realizar los respectivos ensayos para su caracterización:

En primer lugar, se pesó y se dejó el material en el horno para que se secase, y posteriormente se tomó una fracción de agregado para tamizarlo, como se observa en la fotografía 1.

Fotografía 1. Serie de tamices para la granulometría.



Fuente: Elaboración propia

Con el material tamizado se realizaron los ensayos mencionados en la tabla 453 - 1 del capítulo 4 de especificaciones generales de construcción de carreteras registradas en el INVIAS – 2013. Los ensayos realizados se

presentan a continuación con sus respectivos resultados y fotografías de ejecución (desde la fotografía 2 hasta la fotografía 10):

- **Máquina de los Ángeles INV E-218.**

Fotografía 2. Ensayo Máquina de los ángeles.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Datos del ensayo de desgaste por la máquina de los ángeles.

Datos iniciales	
Masa tamiz 1/2"	2498 g
Masa tamiz 3/8"	2500 g
Masa de la muestra seca antes del ensayo	4998 g
Masa de la muestra seca después del ensayo	3754 g
Resultados	
% Pérdidas	24,9%

Fuente: Elaboración propia.

- **Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval INV E-238.**

Fotografía 3. Ensayo en el equipo Micro-Deval



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Datos del ensayo Micro-Deval.

Datos iniciales	
Volumen de agua	2 L
Número de esferas	5000
Número de revoluciones	12000
Peso tamiz 5/8"	376 g
Peso tamiz 1/2"	374 g
Peso tamiz 3/8"	750 g
Masa de la muestra seca antes del ensayo	1500 g
Masa de la muestra seca después del ensayo	1389 g
Resultados	
% Pérdidas	7,4%

Fuente: Elaboración propia.

- Resistencia mecánica por el método del 10% de finos INV E-224.

Fotografía 4. Ensayo 10% de Finos



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Especímenes de ensayo en condición seca.

Tabla 4. Datos ensayo 10% de finos en condición seca.

Muestra	M1. Masa inicial (g)	Carga aplicada (N)	M2. Masa pasa (g)	M3. Masa retenida (g)	M2/M1 (%)
1	2660	128687,5	204	2456	7,7
2	2658,8	128890,6	295	2362	11,1
3	2674,2	137515,63	243	2430	9,1

Fuente: Elaboración propia

- ✓ Especímenes de ensayo en condición saturada

Tabla 5. Datos ensayo 10% de finos en condición saturada.

Muestra	M1. Masa inicial (g)	Carga aplicada (N)	M2. Masa pasa (g)	M3. Masa retenida (g)	M2/M1 (%)
1	2653	135218,8	233	2418	8,8
2	2676	140937,5	243	2432	9,1
3	2587	129531,3	254	2332	9,8

Fuente: Elaboración propia

- Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio INV E-220.

Fotografía 5. Muestras del ensayo de solidez



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Partículas finas examen cuantitativo.

Tabla 6. Datos ensayo de solidez para partículas finas.

Tamices	Masa seca (g)	Retenido (g)	Pasa (g)	% Pasa
#50	100	99	1	1
#30	99	96	3	3
#16	99	96	3	3
#8	100	97	3	3
#4	99	87	12	12
Total	497			

Fuente: Elaboración propia

- ✓ Partículas gruesas examen cuantitativo.

Tabla 7. Datos ensayo de solidez para partículas gruesas.

Tamices	Masa seca (g)	Retenido (g)	Pasa (g)	% Pasa
3/4"	510	510	0	0
1/2"	678	678	0	0
3/8"	367	367	0	0
#4	308	308	0	0
Total	1863			

Fuente: Elaboración propia

- ✓ Examen cualitativo.

En general, las partículas no presentaron mayor cambio luego de ser sometidas al ensayo de solidez, además, los porcentajes de pérdida están por debajo del rango óptimo establecido por la norma INVIAS.

- **Impurezas en agregado grueso INV E-237.**

Tabla 8. Datos ensayo de impurezas en agregado grueso

Datos iniciales	
Masa húmeda (mh)	2575 g
Masa seca al horno (ms)	2569 g
Masa húmeda de la porción (mhe)	2576 g
Masa lavada y seca al horno (m)	2564 g
Humedad (w)	0,0027
Cantidad de masa seca (mse)	2569 g
Resultados	
Impurezas (I)	5
Coeficiente de limpieza superficial	0,2%

Fuente: Elaboración propia

- **Índice de plasticidad INV E-126.**

Fotografía 6. Ensayo para hallar el índice de plasticidad



Fuente: Elaboración propia

El ensayo dio como resultado que la muestra de suelo es no plástica (NP).

- **Equivalente de arena INV E-133.**

Fotografía 7. Ensayo para hallar equivalente de arena.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Datos de ensayo equivalente de arena

Datos iniciales		
Material	Probeta 1	Probeta 2
Arcilla	3,8	4,5
Arena	3,2	3,5
Resultados		
EA	84,2%	77,8%
EA Promedio	81%	

Fuente: Elaboración propia

- **Ensayo de alargamiento y aplanamiento INV E-240.**

Fotografía 8. Ensayo de alargamiento y aplanamiento.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Datos de ensayo de alargamiento y aplanamiento.

Tamices	Masa retenida (g)	Retenido alargado (g)	Pasa aplanado (g)
3/4"	1000	108	93
1/2"	1500	139	112
3/8"	300	18	45
1/4"	200	34	36
Total	3000	299	286

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Resultados del ensayo de alargamiento y aplanamiento.

Tamices	Índice de aplanamiento (%)	Índice de alargamiento (%)
3/4"	9,3	10,8
1/2"	7,5	9,3
3/8"	15	6
1/4"	18	17
Global	9,5	9,9

Fuente: Elaboración propia

- **Caras fracturadas INV E-227.**

✓ Una cara

Tabla 12. Datos de ensayo caras fracturadas.

Tamices	Peso retenido (g)	Caras fracturadas (g)	% Caras fracturadas
3/4"	400	360	90
1/2"	450	424	94,2
3/8"	300	285	95
1/4"	300	298	99,3
#4	50	0	0
Masa total	1500		

Fuente: Elaboración propia

✓ Dos caras: 100% caras fracturadas.

- **Angularidad de la fracción fina INV E-239.**

Fotografía 9. Ensayo de angularidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Datos de ensayo caras fracturadas.

Datos iniciales (Método C)	
Peso del material utilizado	190 g
Peso molde	319 g
Diámetro molde	38,9 mm
Altura molde	90,7 mm
Volumen molde	107,8 mm
Peso molde + material después de la prueba	475,4 g
Resultados	
Porcentaje de vacíos	45,7%

Fuente: Elaboración propia

También, se realizaron los ensayos de densidad de agregado fino y grueso, como se muestra en la fotografía 10.

- **Densidad del agregado grueso INV E-223.**

Fotografía 10. Ensayo para hallar densidad del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Datos densidad del agregado grueso

Datos iniciales	
Masa en el aire de la muestra seca al horno	3980 g
Masa en el aire de la muestra saturada y superficialmente seca	4009 g
Masa aparente de la muestra en agua	2455 g
Resultados	
Densidad agregado grueso	2,6 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia

- **Densidad del agregado fino INV E-222.**

Tabla 15. Datos densidad del agregado fino.

Datos iniciales	
Masa inicial	500 g
Masa en el aire de la muestra seca al horno	496 g
Masa picnómetro con tapa	161 g
Masa picnómetro aforado lleno de agua	691 g
Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua	1001 g
Resultados	
Densidad agregado fino	2,7 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Caracterización del asfalto

La universidad Pontificia Bolivariana suministró el cemento asfáltico convencional, al cual se le realizaron los siguientes ensayos, los cuales se presentan con sus respectivos resultados y fotografías (desde la fotografía 11 hasta la fotografía 16):

5.1.4.1 Cemento asfáltico convencional (60-70)

- **Densidad de materiales bituminosos (Método del picnómetro)**

Fotografía 11. Ensayo para hallar la densidad del asfalto convencional.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Datos para hallar la densidad del asfalto convencional.

Datos iniciales	
Peso esfera	8 g
volumen agua	110 ml
volumen agua + esfera	118 ml
Volumen esfera	8 ml
Resultado	
Peso específico	1 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia

- **Penetración de materiales bituminosos INV E-706.**

Fotografía 12. Ensayo de penetración



Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Datos ensayo de penetración.

N° de ensayo	Penetración (Líneas)	Penetración (mm)
1	59	5,9
2	60	6
3	63	6,3
4	62	6,2
Promedio	61	6,1

Fuente: Elaboración propia

- **Punto de ablandamiento INV E-712**

Fotografía 13. Ensayo punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Datos ensayo de ablandamiento.

Datos iniciales	
Temperatura esfera 1	48° C
Temperatura esfera 2	48° C
Resultado	
Punto de ablandamiento	48° C

Fuente: Elaboración propia

- **Ductilidad INV E- 702**

Fotografía 14. Ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

La ductilidad del cemento asfáltico obtenida fue de $L=150\text{cm}$

- **Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland INV-709**

Fotografía 15. Ensayo para hallar punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Datos ensayo de la Copa Cleveland.

Chispa	Llama
245° C	330° C

Fuente: Elaboración propia

5.1.4.2 Cemento asfáltico modificado con Polímeros tipo IIB.

- **Densidad de materiales bituminosos (Método del picnómetro)**

Tabla 20. Datos para hallar la densidad del asfalto modificado.

Datos iniciales	
Peso esfera	7,29 g
volumen agua	110 ml
volumen agua + esfera	118 ml
Volumen esfera	8 ml
Resultado	
Peso específico	0,9 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia

- **Penetración de materiales bituminosos INV E-706.**

Tabla 21. Datos ensayos de penetración

Nº de ensayo	Penetración (Líneas)	Penetración (mm)
1	57	5,7
2	59	5,9
3	56	5,6
4	58	5,8
Promedio	57,5	5,8

Fuente: Elaboración propia

- **Punto de ablandamiento INV E-712**

Tabla 22. Datos ensayos de ablandamiento.

Datos iniciales	
Temperatura esfera 1	58° C
Temperatura esfera 2	61° C
Resultado	
Punto de ablandamiento	59,5° C

Fuente: Elaboración propia

- **Ductilidad INV E-702**

Fotografía 16. Punto de inicio de ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

La ductilidad obtenida del asfalto fue de $L = 82$ cm

- **Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland INV E-709**

Tabla 23. Datos de ensayo de la copa Cleveland.

Chispa	Llama
280° C	340° C

Fuente: Elaboración propia

5.2 FASE II

En esta fase se elaboró el primer grupo de probetas convencionales tipo Marshall con las cuales se estableció el porcentaje óptimo.

5.2.1 Elaboración de probetas tipo Marshall

En primer lugar, se separaron las cantidades de agregado, según la granulometría (ver tabla 24) para cada una de las 15 probetas convencionales y se secaron a masa constante, para posteriormente hacer el mezclado, como se evidencia en la fotografía 17.

Fotografía 17. Cantidades Separadas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Tamices para mezclas convencionales.

Tamices	% Pasa
1"	100
3/4"	80-95
1/2"	65-80
3/8"	55-70
#4	40-55
#10	24-38
#40	9-20
#80	6-12
#200	3-7

Fuente: Elaboración propia

Para fabricar las mezclas convencionales se utilizó cemento asfáltico de tipo 60-70 suministrado por la Universidad Pontificia Bolivariana.

Luego de mezclar el agregado con el cemento asfáltico, se procedió a la compactación de la mezcla con el martillo automático como se muestra en la fotografía 18. Cada probeta se compactó a 75 golpes en cada cara.

Fotografía 18. Mezclado y compactación de las mezclas



Fuente: Elaboración propia

Una vez compactadas las 15 probetas convencionales, se desencofraron una por una al siguiente día como se presenta en la fotografía 19.

Fotografía 19. Extracción de probetas.



Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Ensayo Marshall

Antes de realizar el ensayo en el aparato Marshall, se tomaron medidas de cada probeta para hallar su diámetro y altura respectiva (Ver tabla 25), así mismo, se tomaron los pesos con la muestra seca, sumergida en agua y superficialmente seca como se muestra en la fotografía 20.

Fotografía 20. Peso muestra seca en el aire.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Dimensiones y pesos de las probetas convencionales.

% De asfalto	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Peso en gramos			Volumen (cm ³)
			Seca en aire (g)	SSS (g)	Peso sumergido (g)	
4%	10,2	6,3	1167,3	1171,7	677,2	514,9
4%	10,2	6,4	1179,7	1184,7	685,5	517,1
4%	10,2	6,4	1181,8	1185,3	688,5	516,9
4,5%	10,1	6,3	1174,5	1176,2	681,9	511,8
4,5%	10,2	6,4	1205	1206,4	704	522,6
4,5%	10,2	6,3	1184,1	1186,1	690,7	509,9
5%	10,2	6,3	1172,4	1174,2	680,6	515,0
5%	10,2	6,2	1160,2	1162,1	674,8	504,1
5%	10,2	6,3	1166,3	1167,5	682	510,9
5,5%	10,3	6,1	1166,6	1167,4	681,9	510,3
5,5%	10,2	6,3	1183,5	1184,2	692,2	513,2
5,5%	10,1	6,3	1153,7	1155,9	673,6	501,9
6%	10,2	6,1	1156,9	1157,2	678	490,0
6%	10,1	6,2	1175,9	1176,5	688	500,2
6%	10,2	6,2	1171,7	1172,2	685,6	499,7

Fuente: Elaboración propia

Una vez tomados los datos, se ensayaron las probetas en el equipo Marshall como se evidencia en la fotografía 21 y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 26.

Fotografía 21. Ensayo Marshall



Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Datos obtenidos en el ensayo Marshall

Porcentaje	Estabilidad (KN)	Factor corrección	Estabilidad corregida (KN)	Flujo (mm)
4%	14,6	1,0	14,7	3,5
	14,6	0,9	14,4	3,8
	16,2	1,0	16,2	3,6
4,5%	12,3	1,0	12,3	3,9
	17,8	0,9	17,8	3,4
	13,7	1,0	13,9	5,3
5%	13,2	1,0	13,2	3,5
	11,4	1,0	11,8	3,5
	13,8	1,0	14,1	3,7
5,5%	12,4	1,1	13,0	4,5
	15,4	1,0	15,7	3,9
	11,9	1,0	12,2	3,9
6%	10,7	1,0	11,4	4,0
	13,4	1,0	13,9	4,1
	10,7	1,0	11,2	4,9

Fuente: Elaboración propia

5.3FASE III

En esta fase se hicieron probetas tipo Marshall siguiendo el diseño especificado para el ensayo del cántabro (INV E 760-13).

5.3.1 Elaboración de probetas drenantes

Se fabricaron 18 probetas tipo Marshall siguiendo la granulometría requerida (ver tabla 27) y lo especificado en el ensayo del cántabro (INV E 760-13), el cual exige una compactación con 50 golpes en cada cara de la muestra. Para esto se usaron porcentajes de 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5% y 7%.

Tabla 27. Tamices para mezclas drenantes.

Tamices	% Pasa
3/4"	100
1/2"	70-100
3/8"	50-75
#4	15-32
#10	9-20
#40	5-12
#200	3-7

Fuente: Elaboración propia

El material bituminoso empleado para elaborar mezclas drenantes fue cemento asfáltico modificado con polímeros tipo IIb de acuerdo con lo indicado en el numeral 453.2.2 de las especificaciones generales de construcción de carreteras, el cual fue aportado por la empresa Multinsa S.A., ubicada en Barrancabermeja, Santander. Por consiguiente, se anexa el certificado de calidad del asfalto utilizado. VER ANEXO 2.

Fotografía 22. Muestra de mezcla drenante.



Fuente: Elaboración propia

Una muestra representativa de las probetas realizadas se puede evidenciar en la fotografía 22. Además, se presenta cada uno de los porcentajes utilizados de cemento asfáltico para la fabricación de las probetas con sus respectivas dimensiones y pesos (ver tabla 28).

Tabla 28. Dimensiones y pesos de las probetas drenantes.

% De asfalto	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Peso en gramos			Volumen (cm ³)
			Seca en aire (g)	SSS (g)	Peso sumergido (g)	
4,5%	10,1	6,9	1172,4	1233,2	656,5	560,8
4,5%	10,2	6,9	1180	1245	670,3	559,5
4,5%	10,2	6,9	1180,6	1258,9	678	566,6
5%	10,1	6,8	1178,9	1224,9	657,3	550,4
5%	10,1	6,9	1185,5	1269,8	677,9	565,5
5%	10,1	6,7	1184	1252,8	677,6	539,5
5,5%	10,1	6,9	1183,8	1222,4	651	554,3
5,5%	10,1	6,9	1180,5	1254	670,5	556,1
5,5%	10,1	7,1	1186,2	1260,9	677,6	562,9
6%	10,1	6,5	1130,4	1184,8	629,5	524,7
6%	10,1	6,8	1185,7	1257,8	663,1	547,5
6%	10,1	6,9	1181,7	1237,8	649,2	549,3
6,5%	10,1	6,8	1174	1224,2	650,4	546,2
6,5%	10,1	6,7	1179,4	1227,5	653,2	538,7
6,5%	10,1	6,8	1174,3	1230,4	647	548,7
7%	10,1	6,6	1157,7	1192	627,3	523,5
7%	10,1	6,6	1127,8	1152	607,8	523,4
7%	10,1	6,7	1181,8	1239,8	668,3	539,1

Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Ensayo Marshall

Una vez tomadas las dimensiones y pesos, se ensayaron las probetas en el equipo Marshall y se arrojaron los resultados mostrados en la tabla 29.

Tabla 29. Datos obtenidos en el ensayo Marshall.

Porcentaje	Estabilidad (KN)	Factor corrección	Estabilidad corregida (KN)	Flujo (mm)
4,5%	7,9	0,9	7,0	5,2
	8,3	0,9	7,3	4,5
	8,2	0,9	7,2	4,3
5%	12,0	0,9	10,8	4,3
	10,6	0,9	9,9	7,8
5,5%	5,9	0,9	5,2	4,5
	7,5	0,9	6,6	5,4
	5,8	0,9	4,9	4,6
6%	7,1	0,9	6,9	6,9
	8,7	0,9	7,9	7,8
	9,5	0,9	8,4	8,8
6,5%	8,6	0,9	7,9	5,3
	7,1	0,9	6,5	4,4
	7,5	0,9	6,8	5,8
7%	6,9	0,9	6,6	8,3
	4,6	0,9	4,3	4,2
	6,9	0,9	6,4	4,6

Fuente: Elaboración propia

5.4 FASE IV

En esta última fase se fabricaron nuevas probetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico encontrado en la fase 2 y fase 3 para mezclas convencionales y mezclas drenantes, respectivamente. Con el porcentaje óptimo se realizó nuevamente el ensayo Marshall para verificar el cumplimiento de las especificaciones. Posteriormente, se realizó el ensayo GMM para INV E 735-13 hallar la gravedad específica máxima. Así mismo, se fabricaron probetas para determinar la permeabilidad, la pérdida por desgaste en la máquina de los ángeles y con la ayuda de una cámara termográfica, se tomaron las temperaturas de ambas mezclas con el fin de compararlas entre sí.

5.4.1 Elaboración de probetas

En total se fabricaron 10 probetas, de las cuales 7 fueron drenantes y 3 convencionales. En las primeras 7 se usó cemento asfáltico modificado con polímeros tipo IIb y fueron compactadas a 50 golpes como lo indica el ensayo del cántabro. Luego, se fabricaron las 3 probetas convencionales con cemento asfáltico de tipo 60-70 y se compactaron a 75 golpes.

Del mismo modo, se presenta a continuación en la fotografía 23 una comparación visual entre una probeta convencional y una probeta drenante.

Fotografía 23. Comparación muestra convencional (izquierda) y drenante (derecha).



Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones y los pesos de las nuevas probetas fabricadas, se evidencian en las tablas 30 y 31.

Tabla 30. Dimensiones y pesos de las probetas convencionales óptimas.

% De asfalto	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Peso en gramos			Volumen (cm ³)
			Seca en aire (g)	SSS (g)	Peso sumergido (g)	
5,3	10,2	6,2	1125,4	1130,9	652,2	502,9
5,3	10,1	6,1	1159,4	1160,6	679,7	493,3
5,3	10,0	6,0	1147,6	1148,7	671	475,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Dimensiones y pesos de las probetas drenantes óptimas.

% De asfalto	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Peso en gramos			Volumen (cm ³)
			Seca en aire (g)	SSS (g)	Seca en aire (g)	
5,6	10,1	6,3	1014,5	1040,1	563,6	504,8
5,6	10,1	6,2	1035,4	1056,9	574,1	502,9
5,6	10,1	6,4	1040,2	1066	578,6	513,0

Fuente: Elaboración propia

5.4.2 Comparación de temperaturas entre las muestras convencionales y drenantes

Con la ayuda de una cámara termográfica facilitada por la facultada de ingeniería electrónica, se tomaron las temperaturas de las probetas fabricadas con el porcentaje óptimo.

Para este ensayo se tomaron temperaturas de 3 probetas convencionales y 3 probetas drenantes en las mismas condiciones a las 8:40 am como se evidencia en la fotografía 24 y 25, se dejaron expuestas al sol por 3 horas y se tomaron nuevamente los datos.

Fotografía 24. Toma de temperaturas de las probetas en la sombra.



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 25. Toma de temperaturas de las probetas expuestas al sol.



Fuente: Elaboración propia

5.4.3 Ensayo de permeabilidad.

Antes de realizar el ensayo Cántabro se realizó una prueba de permeabilidad a las mezclas drenantes el cual consistió en colocar 100 ml de agua en un molde conteniendo la probeta prehumedecida y el tiempo que debía tardar el agua en atravesar la muestra no debía exceder los 15 segundos. En la fotografía 26 se evidencia con mayor facilidad el ensayo.

Fotografía 26. Prueba de permeabilidad



Fuente: Elaboración propia

5.4.4 Ensayo Cántabro de pérdida por desgaste INV E-760.

Para la realización de este ensayo se tomaron 2 probetas drenantes en condición seca y se introdujeron en la máquina de los ángeles sin la carga abrasiva de las esferas durante 300 vueltas, para esto, se tomó el peso de la probeta antes y después del ensayo y se calculó la pérdida por desgaste. Este ensayo se realizó con el fin de comprobar la adhesividad entre el agregado y el ligante, la cual tiene un porcentaje de aceptación según las especificaciones de generales de construcción de carreteras ART 453. En consecuencia, se presenta en la fotografía 27 una comparación visual de la muestra antes y después del ensayo.

Fotografía 27. Muestras antes (izquierda) y después del ensayo (derecha)



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 32 se muestran los pesos de cada una de las probetas antes y después del ensayo.

Tabla 32. Datos ensayo Cántabro.

Muestra	Peso antes de ensayo (g)	Peso después de ensayo (g)	% Pérdidas
1	1058,3	1025,6	3,1%
2	1029,6	1011	1,8%

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, para calcular la adhesividad entre el agregado y el cemento asfáltico en estado sumergido, se tomaron 2 probetas en presencia de agua, para ello se dejaron sumergidas 24 horas a 60°C antes de realizar el ensayo Cántabro, el cual arrojó los siguientes resultados mostrados en la tabla 33.

Tabla 33. Datos ensayo Cántabro luego de 24 horas en agua.

Muestra	Peso antes de ensayo (g)	Peso después de ensayo (g)	% Pérdidas
1	1036,9	966	6,8%
2	1056,1	1002,3	5,1%

Fuente: Elaboración propia

5.4.5 Ensayo Marshall

Luego de haber tomado las dimensiones y pesos de cada una de las probetas, se ejecutó el fallo de cada una en el equipo Marshall (Prensa Pinzuar) y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 34 y 35.

Tabla 34. Resultados de ensayo Marshall de las mezclas convencionales óptimas.

% De asfalto	Estabilidad corregida (KN)	Flujo (mm)
5,3	14,2	4,0
5,3	13,8	3,9
5,3	12,9	3,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35. Resultados de ensayo Marshall de las mezclas drenantes óptimas.

% De asfalto	Estabilidad corregida (KN)	Flujo (mm)
5,6	7,2	4,9
5,6	8,4	5,6
5,6	8,8	5,2

Fuente: Elaboración propia

5.4.6 Ensayo GMM (Gravedad Específica Máxima)

Luego de haber realizado el ensayo Marshall, se tomaron 3 muestras convencionales óptimas y 3 muestras drenantes óptimas y se desintegraron para realizar el ensayo, como se puede observar en las fotografías 28 y 29.

Fotografía 28. Muestra desintegrada.



Fuente: Elaboración propia

La muestra desintegrada se introdujo en el equipo Rice, se cubrió con agua en 3 capas y se extrajo el aire presente con la ayuda de una bomba de vacíos y una base vibratoria.

Fotografía 29. Ejecución ensayo GMM.



Fuente: Elaboración propia

Se tomaron datos de la muestra, del recipiente lleno de agua y del recipiente lleno de agua más el material como se evidencia en las tablas 36 y 37.

Tabla 36. Datos obtenidos en el ensayo de GMM para mezclas convencionales.

Mezcla convencional (Ensayo GMM)			
% De asfalto	Peso seco (g)	Peso con agua (g)	Peso agua y recipiente (g)
5,3	1118	20305	19640
5,3	1155	20335	19640
5,3	1137	20325	19640

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Datos obtenidos en el ensayo de GMM para mezclas drenantes.

Mezcla Drenante (Ensayo GMM)			
% De asfalto	Peso seco (g)	Peso con agua (g)	Peso agua y recipiente (g)
5,6	1006	20240	19640
5,6	1028	20290	19640
5,6	1030	20290	19640

Fuente: Elaboración propia

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 FASE I

6.1.1 Caracterización del agregado

Se llevaron a cabo los ensayos nombrados en las tablas 450-3 y 453-1 de las especificaciones generales de construcción de carreteras los cuales cumplen en su totalidad como se muestra en las tablas 38 y 39.

Tabla 38. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Nivel de tránsito NT2

Característica	Norma de ensayo INV	Solicitado	Reportado	Verificación
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%) - 500 revoluciones	E-218	25	24,9	CUMPLE
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	25	7,4	CUMPLE
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos. Valor en seco, mínimo (KN)	E-224	NA	NA	NA
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	12	CUMPLE
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0,5	0,2	CUMPLE
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	CUMPLE
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	50	81%	CUMPLE
Partículas planas y alargadas, máximo (%)	E-240	10	9,9	CUMPLE
Caras fracturadas, mínimo (%)	E-227			CUMPLE
- Una cara		75	90	
- Dos caras		60	100	
Angularidad de la fracción fina, mínimo (%)	E-239	45	45,7	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Requisitos de los agregados para mezclas drenantes.

Característica	Norma de ensayo INV	Solicitado	Reportado	Verificación
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%) - 500 revoluciones	E-218	25	24,9	CUMPLE
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	20	7,4	CUMPLE
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos. Valor en seco, mínimo (KN)	E-224	131.698	NA	NA
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	12	CUMPLE
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0,5	0,2	CUMPLE
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	CUMPLE
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	50	81%	CUMPLE
Partículas planas y alargadas, máximo (%)	E-240	10	9,9	CUMPLE
Caras fracturadas, mínimo (%) Dos caras	E-227	100	100	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

6.1.2 Cemento asfáltico convencional (60-70)

Para la caracterización del cemento asfáltico convencional se realizaron los ensayos de penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y punto de inflamación los cuales arrojaron los resultados mostrados a continuación.

- **Penetración del material bituminoso.**

En la tabla 17 se muestra un promedio entre los 4 datos obtenidos, el cual dio como resultado 61 mm, este valor cumple con el rango establecido en la norma INV E 706-13.

- **Punto de ablandamiento.**

El punto de ablandamiento del material bituminoso fue de 48°C, el cual cumple con el rango establecido en la norma INV E 712-13.

- **Ductilidad.**

Durante la realización de este ensayo no se presentó rotura de la probeta, es por esto por lo que se considera como resultado una longitud de 150 cm, la cual es aceptable según la norma INV E 702-13.

- **Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland.**

Este ensayo tuvo como finalidad determinar los puntos de ignición y llama mediante la copa abierta de Cleveland para observar la respuesta que tiene el material bajo condiciones de laboratorio controladas.

Los puntos de ignición y llama obtenidos en el ensayo fueron 254°C y 330°C respectivamente y cumplen lo especificado en la norma INV E 709-13.

Para mayor claridad, en la siguiente tabla 40 se muestra la verificación de las especificaciones del cemento asfáltico utilizado.

Tabla 40. Verificación de las especificaciones de cemento asfáltico convencional (60-70).

Característica	Norma de ensayo INV	Mínimo	Máximo	Unidad	Reportado	Verificación
Penetración (25°C, 100 g, 5s)	E- 706	60	70	0.1 mm	61	CUMPLE
Punto de ablandamiento	E- 712	48	54	°C	48	CUMPLE
Ductilidad (5°C, 5cm/min)	E-702	100	-	cm	150	CUMPLE
Punto de inflamación mediante copa abierta Cleveland, °C	E-709	230	-	°C	245	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Cemento asfáltico modificado con polímeros tipo II b.

Para la caracterización del cemento asfáltico modificado, suministrado por Multinsa SA, se realizaron los mismos ensayos que el cemento asfáltico convencional, cuyos resultados se muestran a continuación:

- **Penetración del material bituminoso.**

La tabla 21 muestra el promedio entre los 4 datos obtenidos en este ensayo, el cual dio como resultado 57,5 mm. Este valor cumple con el rango establecido en la norma INV E 706-13 para asfaltos modificados con Polímeros.

- **Punto de ablandamiento.**

El punto de ablandamiento del asfalto modificado con polímeros fue de 59,5°C, el cual cumple con el valor mínimo indicado en la norma INV E 712-13.

- **Ductilidad.**

El punto de rotura de la probeta fue de 82 cm, el cual se encuentra por encima del punto mínimo indicado en la norma INV E 702-13 para asfaltos modificados con polímeros.

- **Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland.**

Los puntos de ignición y llama obtenidos en el ensayo fueron 280°C, este valor cumple con el mínimo establecido en la norma INV E 709-13. En la siguiente tabla se muestra la verificación de las especificaciones del cemento asfáltico utilizado.

Para mayor claridad, en la tabla 41 se muestra la verificación de las especificaciones del cemento asfáltico utilizado.

Tabla 41. Verificación de las especificaciones de cemento asfáltico modificado con polímeros tipo IIb.

Característica	Norma de ensayo INV	Mínimo	Máximo	Unidad	Reportado	Verificación
Penetración (25°C, 100 g, 5s)	E- 706	55	70	0.1 mm	57,5	CUMPLE
Punto de ablandamiento	E- 712	58	-	°C	59,5	CUMPLE
Ductilidad (5°C, 5cm/min)	E-702	15	-	cm	82	CUMPLE
Punto de inflamación mediante copa abierta Cleveland, °C	E-709	230	-	°C	280	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

6.2 FASE II

6.2.1 Elaboración y fallo de probetas tipo Marshall.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos después de la elaboración de las probetas convencionales. En las Tablas 42 y 43 Se presentan los resultados obtenidos después de elaborar y fallar las probetas tipo Marshall de la mezcla convencional.

Tabla 42. Datos de peso específico y porcentaje de vacíos de las probetas convencionales.

% De asfalto	Peso específico			Asfalto absorbido %	Volumen - % Total			Vacíos en agregados minerales
	G (Bulk)	Máx teórico (gmt)	Máx medido (gmm)		Agregado	Vacíos con aire	Asfalto efectivo	
4%	2,4	2,5	2,5	0,8	86,9	5,6	7,6	13,1
4%	2,4	2,5	2,5	0,8	86,9	5,5	7,6	13,1
4%	2,4	2,5	2,5	0,8	87,5	4,9	7,6	12,5
Promedio	2,4	2,5	2,5	0,8	87,1	5,3	7,6	12,9
4,5%	2,4	2,4	2,5	1,2	86,9	4,9	8,1	13,0
4,5%	2,4	2,4	2,5	1,2	87,8	4,1	8,2	12,2
4,5%	2,4	2,4	2,5	1,2	87,5	4,4	8,1	12,5
Promedio	2,4	2,4	2,5	1,2	87,4	4,5	8,1	12,6
5%	2,4	2,4	2,5	1,5	86,5	4,9	8,5	13,5
5%	2,4	2,4	2,5	1,5	86,7	4,8	8,5	13,3
5%	2,4	2,4	2,5	1,5	87,5	3,9	8,6	12,5
Promedio	2,4	2,4	2,5	1,5	86,9	4,6	8,6	13,1
5,5%	2,4	2,4	2,5	1,8	87,0	3,9	9,1	12,9
5,5%	2,4	2,4	2,5	1,8	87,1	3,8	9,1	12,9
5,5%	2,4	2,4	2,5	1,8	86,6	4,3	9,0	13,4
Promedio	2,4	2,4	2,5	1,8	86,9	3,9	9,1	13,1
6%	2,4	2,4	2,5	2,2	86,9	3,4	9,6	13,0
6%	2,4	2,4	2,5	2,2	86,7	3,7	9,6	13,3
6%	2,4	2,4	2,5	2,2	86,8	3,7	9,6	13,2
Promedio	2,4	2,4	2,5	2,2	86,8	3,6	9,6	13,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43. Resultados de las probetas convencionales de ensayo Marshall

% De asfalto	% De asfalto efectivo	Peso unitario (lb/pulg3)	Estabilidad corregida(KN)	Flujo(mm)	Relación estabilidad y flujo (KN/mm)	%VFA
4%	3,2	147,3	14,7	3,5	4,3	57,6
4%	3,2	147,5	14,4	3,8	3,8	58,1
4%	3,2	148,4	16,2	3,6	4,5	61,1
Promedio	3,2	147,7	15,1	3,6	4,2	58,9
4,5%	3,4	148,3	12,3	3,9	3,1	61,9
4,5%	3,4	149,7	17,8	3,4	5,2	66,7
4,5%	3,4	149,2	13,9	5,3	2,6	64,9
Promedio	3,4	149,0	14,7	4,2	3,5	64,5
5%	3,6	148,2	13,2	3,5	3,8	63,1
5%	3,6	148,6	11,8	3,5	3,4	64,2
5%	3,6	149,9	14,1	3,7	3,8	68,8
Promedio	3,6	148,9	13,0	3,6	3,7	65,3
5,5%	3,8	149,9	13,0	4,5	2,9	70,0
5,5%	3,8	150,1	15,7	3,9	4,0	70,6
5,5%	3,8	149,3	12,2	3,9	3,1	67,7
Promedio	3,8	149,8	13,6	4,1	3,3	69,4
6%	3,9	150,7	11,4	4,1	2,8	73,7
6%	3,9	150,2	13,9	4,1	3,4	72,0
6%	3,9	150,3	11,2	4,9	2,3	72,2
Promedio	3,9	150,4	12,2	4,3	2,8	72,6

Fuente: Elaboración propia

Para cálculo del porcentaje óptimo del asfalto convencional, se utilizó los valores indicados en la siguiente Tabla 44, ya que algunos valores no cumplían con la tendencia de los mismos porcentajes, por lo tanto, se descartaron.

Tabla 44. Resultados de Ensayo Marshall para porcentaje óptimo

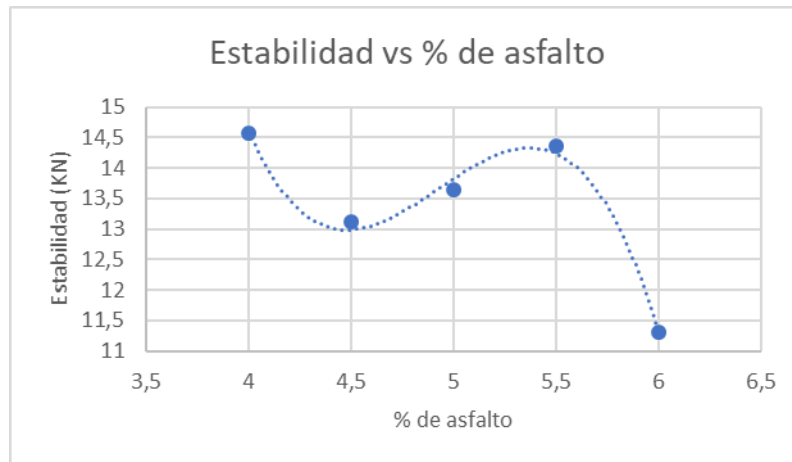
% De asfalto	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	% Vacíos con aire
4	14,6	3,6	5,3
4,5	13,1	4,6	4,5
5	13,6	3,6	4,6
5,5	14,4	4,2	3,9
6	11,3	4,5	3,6

Fuente: Elaboración propia

- **Gráficas**

Se evidencia cada una de las gráficas de la fase 2 para el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto

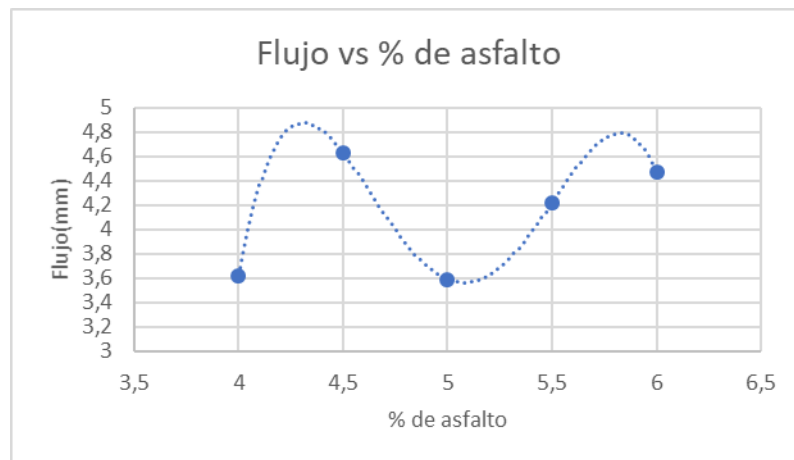
Figura 5. Estabilidad y porcentaje de asfalto de probetas convencionales



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 5, se escogió el valor de porcentaje de asfalto que diera la mayor estabilidad que para este caso sería del 5,5% debido a que el de 4% no sigue la tendencia de los otros valores y no cumple con el comportamiento de la estabilidad que debe aumentar con el porcentaje de asfalto y luego disminuir.

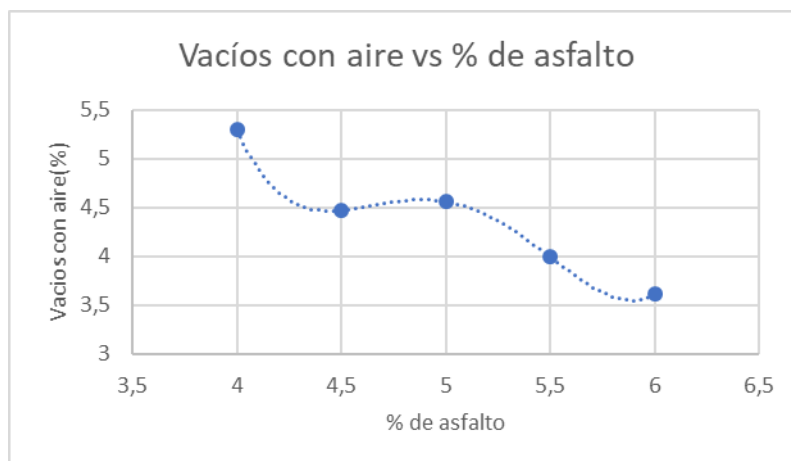
Figura 6. Flujo y porcentaje de asfalto de probetas convencionales



Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, en la figura 6 se escogió el porcentaje de asfalto que diera el menor flujo que para este caso sería del 5%

Figura 7. Vacíos con aire y porcentaje de asfalto de probetas convencionales



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se revisó la figura 7, en donde se determinó el porcentaje de asfalto para el cual el porcentaje de vacíos con aire correspondía al valor medio entre 3% a 5% que es del 4% para este caso sería el 5,5% de asfalto.

En consecuencia, para determinar el porcentaje óptimo se realizaron los respectivos cálculos a briquetas con diferente contenido de asfalto (4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%), en donde se realizó el promedio entre la estabilidad máxima, el flujo mínimo y el valor medio de vacíos con aire evidenciado anteriormente como lo indica la norma INV E 748-13, y así, se obtuvo que el porcentaje óptimo del diseño convencional es del 5,3%.

6.3 FASE III

6.3.1 Elaboración y fallo de probetas tipo Marshall

En esta fase se fabricaron probetas tipo Marshall drenantes de acuerdo con el ensayo cántabro de la INV E 760-13, con el fin de determinar su porcentaje óptimo de asfalto. A continuación, se presentan los resultados de la elaboración y el fallo de las probetas en las tablas 45 y 46.

Tabla 45. Datos de peso específico y porcentaje de vacíos de las probetas drenantes.

% De asfalto	Peso específico			Asfalto absorbido %	Volumen - % Total			Vacíos en agregado mineral
	G (Bulk)	Máx teórico (gmt)	Máx medido (gmm)		Agregado	Vacíos con aire	Asfalto efectivo	
4,5%	1,9	2,4	2,5	1,2	73,1	20,1	6,8	26,9
4,5%	2,0	2,4	2,5	1,2	74,5	18,6	6,9	25,5
4,5%	2,0	2,4	2,5	1,2	74,4	18,7	6,9	25,6
Promedio	2,0	2,4	2,5	1,2	74,0	19,1	6,9	25,9
5%	2,0	2,4	2,5	1,5	73,7	19,0	7,3	26,3
5%	2,0	2,4	2,5	1,5	72,9	19,9	7,2	27,1
5%	2,1	2,4	2,5	1,5	74,9	17,7	7,4	25,1
Promedio	2,0	2,4	2,5	1,5	73,9	18,9	7,3	26,1
5,5%	2,0	2,4	2,5	1,8	72,5	19,9	7,6	27,5
5,5%	2,0	2,4	2,5	1,8	73,3	19,1	7,7	26,7
5,5%	2,0	2,4	2,5	1,8	73,7	18,7	7,7	26,3
Promedio	2,0	2,4	2,5	1,8	73,2	19,2	7,6	26,9
6%	2,0	2,4	2,5	2,2	72,1	20,0	7,9	27,9
6%	1,9	2,4	2,5	2,2	71,2	20,9	7,9	28,8
6%	1,9	2,4	2,5	2,2	70,5	21,7	7,8	29,5
Promedio	1,9	2,4	2,5	2,2	71,3	20,9	7,9	28,7
6,5%	2,0	2,4	2,5	2,5	72,1	19,6	8,4	27,9
6,5%	2,0	2,4	2,5	2,5	72,4	19,3	8,4	27,7
6,5%	1,9	2,4	2,5	2,5	70,9	20,9	8,2	29,1
Promedio	2,0	2,4	2,5	2,5	71,8	19,9	8,3	28,2
7%	1,9	2,3	2,5	2,8	70,6	20,8	8,6	29,5
7%	1,9	2,3	2,5	2,8	70,6	20,8	8,6	29,4
7%	2,1	2,3	2,5	2,8	73,7	17,3	9,0	26,3
Promedio	2,0	2,3	2,5	2,8	71,6	19,6	8,8	28,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46. Resultados de ensayo Marshall probetas drenantes.

% De asfalto	% de asfalto efectivo	Peso unitario (lb/pie3)	Estabilidad corregida (KN)	Flujo (mm)	Relación estabilidad y flujo (KN/mm)	%VFA
4,5%	3,4	124,7	7,0	5,2	1,4	25,3
4,5%	3,4	127,0	7,3	4,5	1,6	27,1
4,5%	3,4	126,8	7,2	4,3	1,7	26,9
Promedio	3,4	126,2	7,2	4,7	1,5	26,4
5%	3,6	126,3	10,8	4,3	2,5	27,6
5%	3,6	124,9	-	-	-	-
5%	3,6	128,5	9,9	7,8	1,3	29,5
Promedio	3,6	126,6	10,4	6,1	1,7	27,8
5,5%	3,8	124,9	5,2	4,5	1,2	27,5
5,5%	3,8	126,2	6,6	5,4	1,2	28,6
5,5%	3,8	126,9	4,9	4,6	1,1	29,1
Promedio	3,7	126,0	5,6	4,9	1,2	28,4
6%	3,9	124,8	6,9	6,9	0,9	28,4
6%	3,9	123,4	7,9	7,8	1,0	27,3
6%	3,9	122,1	8,4	8,8	0,9	26,3
Promedio	3,9	123,4	7,8	7,8	0,9	27,3
6,5%	4,2	125,5	7,9	5,3	1,5	29,9
6,5%	4,2	125,9	6,5	4,4	1,5	30,4
6,5%	4,2	123,5	6,8	5,8	1,2	28,3
Promedio	4,2	124,9	7,1	5,2	1,4	29,5
7%	4,3	123,5	6,6	8,3	0,8	29,3
7%	4,3	123,6	4,4	4,2	1,0	29,3
7%	4,3	129,0	6,4	4,6	1,4	34,3
Promedio	4,3	125,4	5,8	5,7	1,0	30,8

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del porcentaje óptimo de la mezcla drenante, se utilizó los valores indicados en la tabla 47, ya que algunos valores no cumplían con las especificaciones del INVIAS y con la tendencia de los mismos porcentajes, por lo tanto, se descartaron.

Tabla 47. Resultados de Ensayo Marshall para porcentaje óptimo

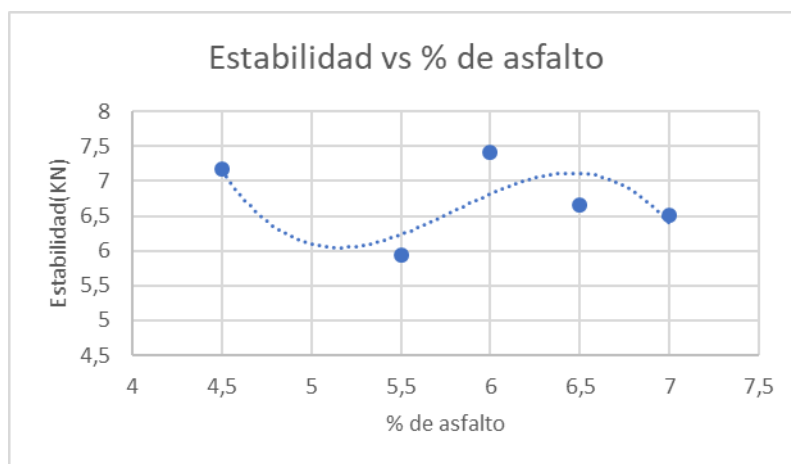
% De asfalto	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	%Vacíos con aire
4,50	7,2	4,7	19,1
5,50	5,9	4,9	19,5
6,00	7,4	7,4	20,5
6,50	6,7	5,1	20,1
7,00	6,5	6,4	19,1

Fuente: Elaboración propia

- **Gráficas**

Se evidencia cada una de las gráficas de la fase 3 para el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto

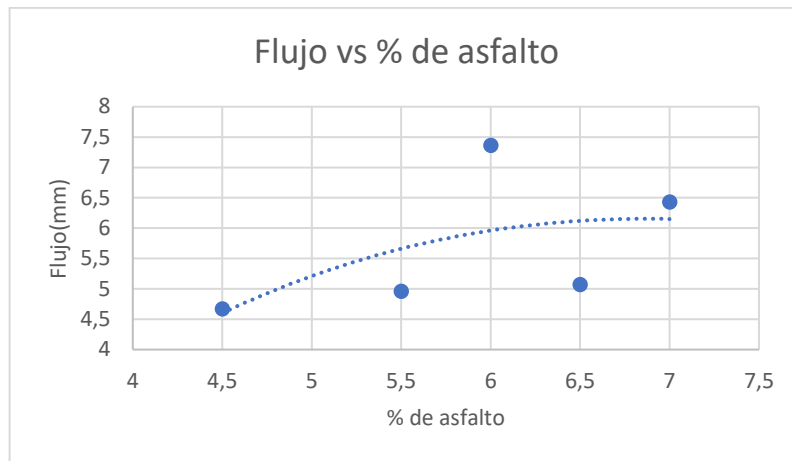
Figura 8. Estabilidad vs Porcentaje de asfalto de mezclas drenantes



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 8, se escogió el valor de porcentaje de asfalto que diera la mayor estabilidad que para este caso sería del 6,5% debido a que el de 4,5% no sigue la tendencia de los otros valores y no cumple con el comportamiento de la estabilidad que debe aumentar con el porcentaje de asfalto y luego disminuir.

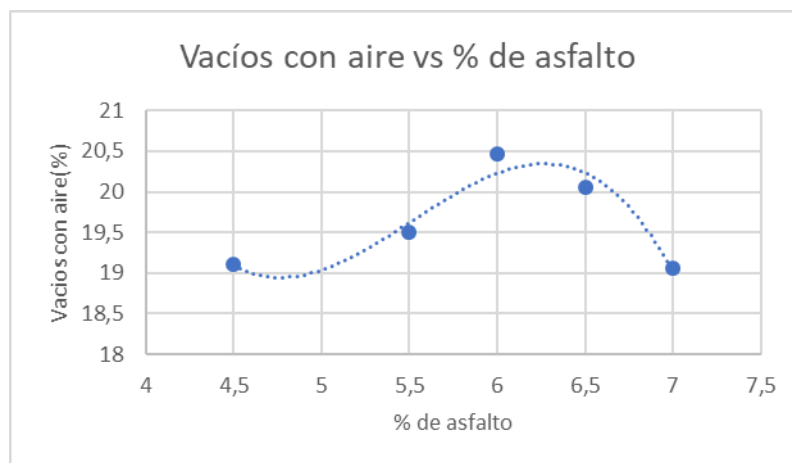
Figura 9. Flujo vs porcentaje de asfalto de mezclas drenantes



Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, en la figura 9 se escogió el porcentaje de asfalto que diera el menor flujo que para este caso sería del 4,5 %

Figura 10. Porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de asfalto de mezclas drenantes



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se revisó la figura 10, en donde se determinó el porcentaje de asfalto para el cual se obtuviera un porcentaje de vacíos con aire entre 20 % y 25%, para este caso sería el 6%.

En consecuencia, para determinar el porcentaje óptimo se realizaron los respectivos cálculos a briquetas con diferente contenido de asfalto (4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%), en donde se realizó el promedio entre la estabilidad máxima, el flujo mínimo y el valor medio de vacíos con aire evidenciado anteriormente como lo indica la norma INV E 748-13, y así, se obtuvo que el porcentaje óptimo del diseño drenante es del 5,6%. De igual forma, este porcentaje óptimo debe cumplir con lo estipulado en las especificaciones generales de construcción de carreteras ART. 453, en donde se

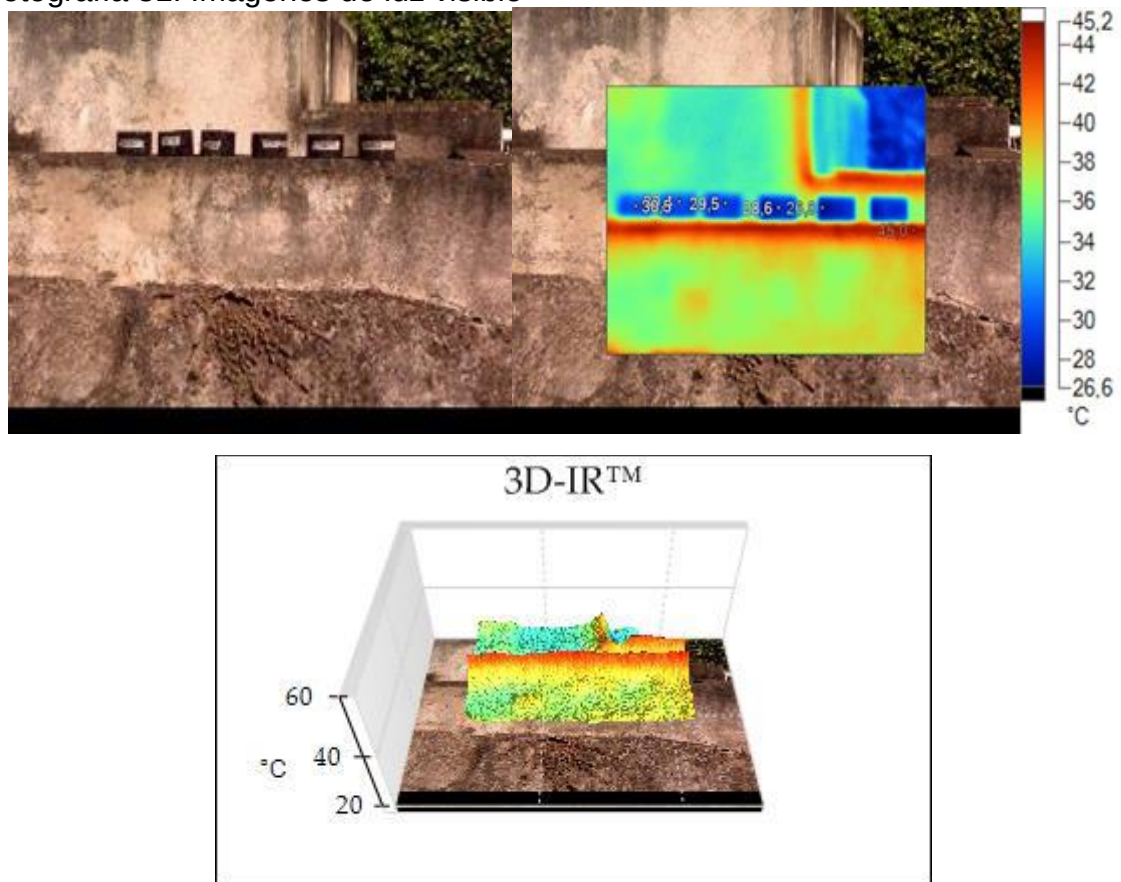
estipula que el porcentaje de vacíos con aire este entre 20% y 25%, la capacidad de drenaje de 100 ml no deben superar los 15 segundos, las perdidas por desgaste INV E760-13 no deberán ser superiores a 25% en condición seca, la dosificación del material bituminoso no deberá ser inferior a 4.5%, y la adhesividad comprobada a través del ensayo INV E760-13 en condición de inmersión no deberá exceder de 40%

6.4 FASE IV

6.4.1 Comparación de temperaturas de mezclas convencionales y mezclas drenantes

Para evaluar la emisión de calor que genera una mezcla asfáltica convencional y una drenante se desarrolló este ítem y se registró la temperatura inicial de cada una de las probetas a las 8:40 de la mañana como se presenta en la Fotografía 31.

Fotografía 31. Imágenes de luz visible

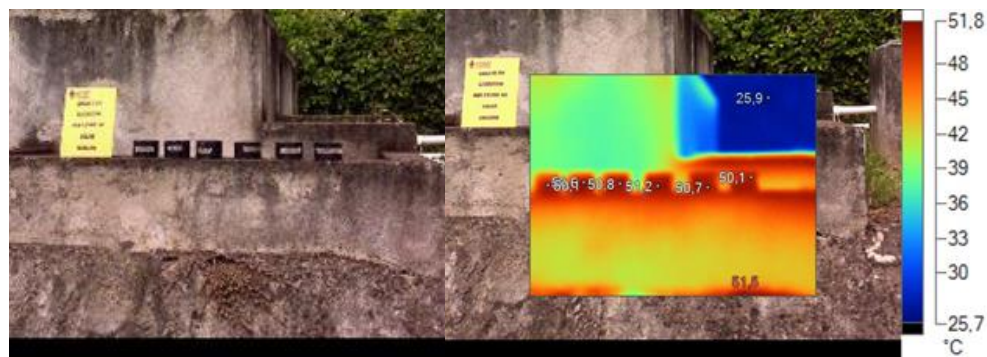


Fuente: Ing. Manuel Guillermo Quijano, Facultad de ingeniería electrónica UPB.

En la fotografía 31. se puede observar que las probetas drenantes se encuentran ubicadas al lado izquierdo de la fotografía con una temperatura inicial promedio de 30.1°C y las probetas convencionales ubicadas al lado derecho con una temperatura inicial promedio de 27.6 °C

Después, las probetas fueron expuestas al sol durante un periodo de 3 horas, es decir, hasta las 11:40 de la mañana como se evidencia en la Fotografía, en donde se registró nuevamente la temperatura de estas.

Fotografía 32. Imágenes de luz visible



Fuente: Ing. Manuel Guillermo Quijano, Facultad de ingeniería electrónica UPB.

En las imágenes de luz visible anteriores se puede observar que las probetas drenantes se encuentran ubicadas al lado izquierdo de la fotografía con una temperatura final promedio de 50.1°C y las probetas convencionales ubicadas al lado derecho con una temperatura final promedio de 51.2°C

De lo anterior se puede decir, que las probetas de mezclas drenantes emiten menos calor que las probetas de mezclas convencionales como se muestra en la Tabla 48.

Tabla 48. Comparación de temperaturas iniciales y finales de las probetas

Hora	T °C Probeta Drenante	T °C Probeta Convencional
8:40 am	30,1	27,6
11:40 am	50,1	51,2

Fuente: Elaboración propia

6.4.2 Prueba de permeabilidad.

Los resultados obtenidos en esta prueba demuestran que los tiempos obtenidos no superan los 15 segundos como lo indica el numeral 453.4.2 de las especificaciones técnicas para construcción de carreteras para que los 100 ml de agua atraviesen la muestra drenante.

Tabla 49. Datos prueba de permeabilidad.

% Asfalto	# Muestra	Cantidad de agua (ml)	Tiempo de drenaje (s)
5,6%	1	100	12,0
	2		13,2
	3		13,3
	4		13,3

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la tabla 49 muestran que el porcentaje óptimo obtenido para la mezcla drenante cumple con el criterio de los 15 segundos.

6.4.3 Ensayo cántabro de pérdida por desgaste

Luego de comprobar la permeabilidad se realizó el ensayo cántabro a dos probetas drenantes en estado seco para encontrar la pérdida por desgaste, para esto, se pesaron las probetas antes y después del ensayo y se aplicó la fórmula de desgaste tal y como lo indica la norma INV E 760-13 la cual dio como resultado un promedio de 2,45% (Ver tabla 32). Este resultado se encuentra dentro del rango especificado en el numeral 453.4.2 de las especificaciones generales de construcción de carreteras, el cual indica un valor de pérdida máximo de 25%.

Así mismo, se realizó el ensayo a dos probetas drenantes que estuvieron sumergidas en agua a 60°C durante 24 horas con el fin de comprobar la adhesividad entre el agregado y el ligante. Este ensayo dio un promedio de pérdidas de 5,95% (Ver tabla 33), el cual se encuentra dentro del límite establecido en el capítulo 453 de las especificaciones generales de construcción de carreteras, el cual indica un valor de pérdida máximo del 40%. Por lo tanto, esta mezcla asfáltica no necesita ningún aditivo para mejorar su adhesividad.

6.4.4 Fallo de probetas convencionales y drenantes óptimas tipo Marshall

En primer lugar, se elaboraron 6 probetas de porcentaje óptimo entre convencionales y drenantes, las cuales se evidencian en las tablas 49 y 52, luego se fallaron en el equipo de Marshall y se obtuvieron los siguientes resultados en las tablas 50,51,53 y 54.

Tabla 49. Pesos y dimensiones de las mezclas convencionales óptimas

% De asfalto	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Pesos en gramos			Volumen (cm ³)
			Seca en aire (g)	SSS (g)	Peso sumergido (g)	
5,3	10,2	6,2	1125,4	1130,9	652,2	502,9
5,3	10,1	6,1	1159,4	1160,6	679,7	493,3
5,3	10,0	6,0	1147,6	1148,7	671	475,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50. Datos de pesos específicos y porcentaje de vacíos de las mezclas convencionales óptimas

% de asfalto	Peso específico			asfalto absorbido %	Volumen - % total			Vacíos en agregado mineral
	G (Bulk)	Máx teórico (gmt)	Máx medido (gmm)		Agregado	Vacíos con aire	Asfalto efectivo	
5,3	2,4	2,4	2,5	1,1	85,3	4,7	9,9	14,7
5,3	2,4	2,4	2,5	1,9	87,5	3,9	8,5	12,5
5,3	2,4	2,4	2,5	1,9	87,2	4,5	8,3	12,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51. Resultados de ensayo Marshall de las mezclas convencionales óptimas

% De asfalto	% De asfalto efectivo	Peso unitario (lb/pulg ³)	Estabilidad corregida (KN)	Flujo (mm)	Relación estabilidad y flujo (KN/mm)	%VFA
5,3	2,9	146,7	14,2	4,0	3,5	67,9
5,3	2,2	150,4	13,8	3,9	3,6	68,1
5,3	2,1	149,9	12,9	3,7	3,5	65,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52. Pesos y dimensiones de las mezclas drenantes óptimas

% De asfalto	Diámetro promedio	Altura promedio	Pesos en gramos			Volumen (cm ³)
			Seca en aire (g)	SSS (g)	Peso sumergido (g)	
5,6	10,1	6,3	1014,5	1040,1	563,6	504,8
5,6	10,1	6,2	1035,4	1056,9	574,1	502,9
5,6	10,1	6,4	1040,2	1066	578,6	513,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 53. Datos de pesos específicos y porcentaje de vacíos de las mezclas convencionales óptimas

% De asfalto	Peso específico			Asfalto absorbido %	Volumen - % total			Vacíos en agregados minerales
	G (bulk)	Máx teórico (gmt)	Máx medido (gmm)		Agregados	Vacíos con aire	Asfalto efectivo	
5,6	2,1	2,4	2,7	4,6	77,0	20,4	2,53	22,9
5,6	2,2	2,4	2,7	5,1	77,6	20,9	1,48	22,4
5,6	2,1	2,4	2,7	5,1	77,2	21,3	1,50	22,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54. Resultados de ensayo Marshall de las mezclas drenantes óptimas

% De asfalto	Peso unitario (lb/pie3)	Estabilidad corregida (KN)	Flujo (mm)	Relación estabilidad y flujo (KN/mm)	%VFA
5,6	132,9	7,2	4,9	1,5	11,0
5,6	133,8	8,4	5,6	1,5	6,6
5,6	133,2	8,8	5,2	1,7	6,6

Elaboración propia

6.5 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

Luego de haber fallado las probetas óptimas se realizó la respectiva comparación del comportamiento mecánico entre ellas teniendo en cuenta las propiedades de estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos con aire y gravedad máxima medida. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

6.5.1 Estabilidad

La estabilidad es de mayor magnitud en la mezcla convencional debido a que este tipo de mezcla está diseñada para resistir elevadas cargas de tránsito, mientras que la mezcla drenante está diseñada para vías de circulación rápida y de baja intensidad. Por consecuencia, la mezcla convencional tiene mayor resistencia como se evidencia en la Tabla 55.

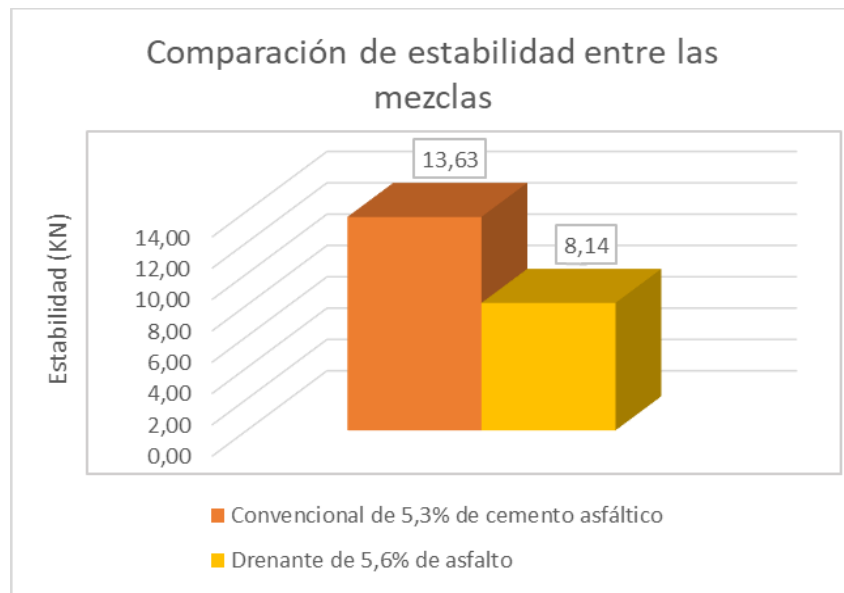
Tabla 55. Comparación de estabilidad entre las mezclas.

Estabilidad (KN)	
Mezcla Convencional	Mezcla Drenante
14,2	7,2
13,8	8,4
12,9	8,8

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, el resultado de una baja estabilidad para una mezcla drenante se da debido al gran porcentaje de vacíos que posee esta, lo que genera una menor resistencia, ya que hay menor área de contacto para distribuir los esfuerzos generados por la carga del tránsito en comparación con la mezcla convencional.

Figura 11. Comparación de estabilidad entre las mezclas.



Fuente: Elaboración propia

6.5.2 Flujo

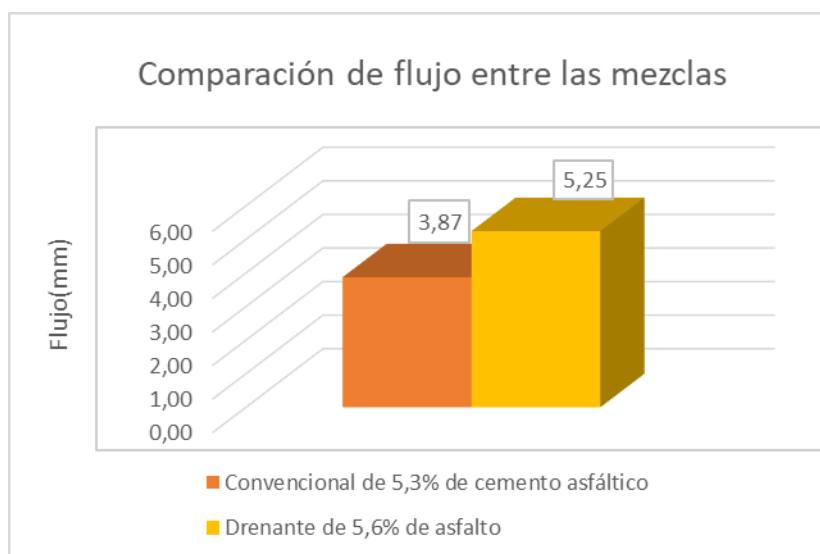
Del mismo modo, al tener una mayor resistencia la mezcla asfáltica convencional que la mezcla asfáltica drenante se evidencia que se genera un menor valor de deformación en su estructura debido a que su diseño tiene la característica de tener menos porcentaje de vacíos con aire.

Tabla 56. Comparación de flujo entre las mezclas.

Flujo (mm)	
Mezcla Convencional	Mezcla Drenante
4,0	4,9
3,9	5,6
3,7	5,2

Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Comparación de flujo entre las mezclas.



Fuente: Elaboración propia

6.5.3 Porcentaje de vacíos con aire

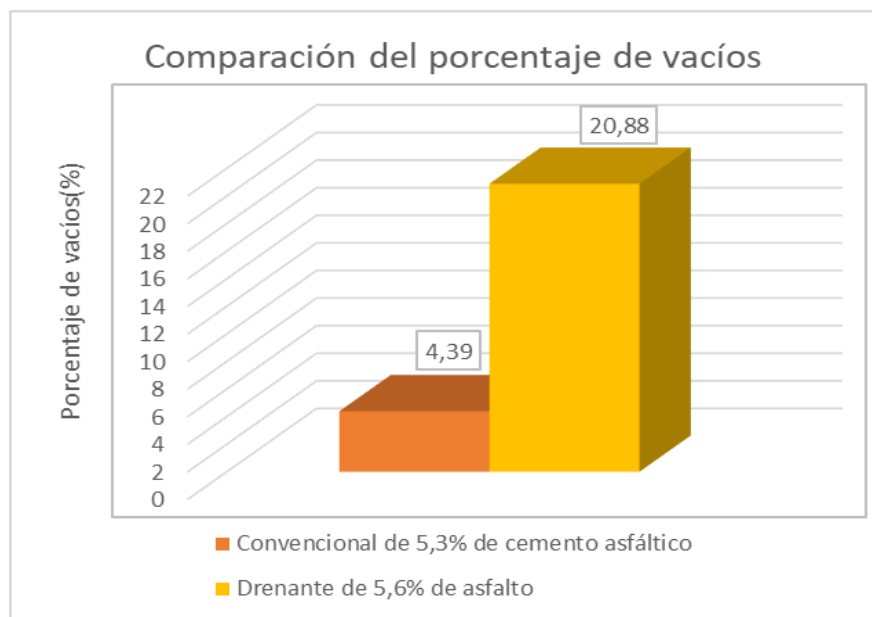
Como está estipulado en el diseño de cada una de las mezclas se evidencia que la mezcla asfáltica convencional tiene menos porcentaje de vacíos con aire en comparación con la mezcla asfáltica drenante.

Tabla 57. Comparación del porcentaje de vacíos entre las mezclas.

% Vacíos con aire	
Mezcla Convencional	Mezcla Drenante
4,7	20,4
3,9	20,9
4,5	21,3

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Comparación del porcentaje de vacíos entre las mezclas.



Fuente: Elaboración propia

6.6 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

Una vez realizadas las pruebas descritas en las Especificaciones generales de construcción de carreteras, se determinó que el porcentaje óptimo para una mezcla asfáltica convencional fue de 5,3%, el cual cumple con todos los criterios establecidos en la norma INVIAS-13, como se muestra en la tabla 59:

Tabla 59. Resumen general para las mezclas convencionales.

MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONALES			
Porcentaje de cemento asfáltico (60-70)			5,3%
CRITERIOS ARTÍCULO 450 INVIAS			
CRITERIO	Solicitado	Reportado	Valoración
Estabilidad, mínimo (KN)	7,5	13,63	CUMPLE
Flujo (mm)	(2-4)	3,87	CUMPLE
Relación estabilidad flujo (KN/mm)	3-5	3,51	CUMPLE
Vacíos con aire (%)	4-7	4,39	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizadas las pruebas descritas en las Especificaciones generales de construcción de carreteras, se determinó que el porcentaje óptimo para una mezcla asfáltica drenante fue de 5,6%, el cual cumple con todos los criterios establecidos en la norma INVIAS-13, como se evidencia en la tabla 60:

- Con el porcentaje óptimo se logró un porcentaje de vacíos de 20,88% el cual se encuentra dentro del rango establecido (20-25%).
- Así mismo, se cumplió con la prueba de permeabilidad, la cual duró 12,97 segundos sabiendo que lo permitido para esta prueba es máximo 15 segundos para drenar 100 ml de agua.
- La adhesividad del agregado y de la llenante mineral, fue del 5,95% siendo este un valor admitido, ya que no superó el valor límite del 40%, lo cual conlleva a que esta mezcla asfáltica no se necesita de ningún aditivo para mejorar su adhesividad.
- La pérdida por desgaste en estado seco dio como resultado un 2,45% siendo este valor muy bueno porque no sobrepasa el valor máximo que es 25%

Tabla 60. Resumen general para las mezclas drenantes

MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES			
Porcentaje de cemento asfáltico modificado tipo IIb			5,6%
CRITERIOS ARTÍCULO 453 INVIAS			
CRITERIO	Solicitado	Reportado	Valoración
Porcentaje de vacíos (%)	20-25	20,88	CUMPLE
Permeabilidad, máximo (s)	15	12,97	CUMPLE
Porcentaje de cemento asfáltico, mínimo (%)	4,5	5,60	CUMPLE
Pérdida por desgaste en estado seco, máximo (%)	25	2,45	CUMPLE
Pérdida por desgaste en presencia de agua, máximo (%)	40	5,95	CUMPLE
PROPIEDADES MECÁNICAS			
Estabilidad (KN)		8,14	CUMPLE
Flujo		5,25	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas drenantes, elaboradas con diferentes porcentajes de asfalto para posteriormente hallar el porcentaje óptimo y dar a conocer las propiedades y ventajas que una mezcla de este tipo ofrece frente a una mezcla convencional en condiciones de lluvia.

Una vez realizadas las pruebas descritas en las Especificaciones generales de construcción de carreteras, se determinó que el porcentaje óptimo para una mezcla asfáltica drenante fue de 5,6%, el cual cumple con todos los criterios establecidos en la norma INVIAS-13.

Por otro lado, se puede evidenciar que la mezcla que adquiere o emite menor cantidad de temperatura al estar expuesta al sol es la mezcla asfáltica drenante, ya que posee gran porcentaje de vacíos con aire.

También, se puede decir que la mezcla asfáltica que tiene mejor comportamiento ante presencias elevadas de cargas de tránsito es la mezcla asfáltica convencional, ya que posee un valor de resistencia mayor que la mezcla asfáltica drenante.

Del mismo modo, se puede utilizar el diseño de mezclas asfálticas drenantes en Santander, ya que sus agregados cumplen con las especificaciones del INVIAS-2013 para su diseño, pero, solo en zonas con cargas de tránsito bajas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Trujillo y D. Quiroz, «Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2013.
- [2] R. Castrillón, «Durante puente de Reyes se movilizaràn cuatro millones de carros en el país,» *El Heraldo*, p. Judicial, 5 Enero 2018.
- [3] M. E. Ayala Loza y I. E. Juarez Alarcon, «Diseño de mezcla drenante con asfalto modificado disponible en el Salvador,» Universidad del Salvador, Salvador, 2010.
- [4] H. A. Rondón Quintana, F. A. Reyes Lizcano, A. S. Figueroa Infante, E. Rodríguez Rincón, C. M. Real Triana y A. Montealegre Elizalde, «Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia,» *Infraestructura vial digital*, vol. 10, nº 19, pp. 10-20, 2008.
- [5] A. M. Fonseca, Ingeniería de pavimentos para carreteras, segunda ed., Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2002, p. 1.
- [6] V. Senior, «Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla cemento asfáltico ac 60-70 con licomont bs-100 para diferentes niveles de precipitación,» Universidad Nacional de Colombia, Medellin, 2013.
- [7] H. A. Rondón Quintana y F. A. Reyes Lizcano, Pavimentos: Materiales, Construcción y Diseño, Bogotá, 2015.
- [8] L. Ramírez Castro, M. Arce y F. Elizondo, «Mezclas drenantes,» Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universitaria Rodrigo Facio , 2005.
- [9] A. J. Campos Canessa, «Seguimientos y comparación del comportamiento de tramos con mezcla drenante, según zona geográfica y condiones locales,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2008.
- [10] C. P. Lopez Moreno, «Comportamiento mecánico de mezcla asfaltica drenante,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2013.

ANEXOS

ANEXO 1



ARENERA LOS PINOS LTDA

ARENAS, TRITURADOS, PIEDRAS, BASE Y SUBASE GRANULAR

Calle 35 No. 18 - 65 Of. 504-5 Torre Sur Tel. 6526525 Fax 6303523 C.C. ROSEDAL BUCARAMANGA-COLOMBIA

CERTIFICACIÓN

Hacemos constar que la empresa CONSTRUMALL, representada por la señorita JOHANNA KARINA NIÑO WILCHES con NIT 1.098.615.588-6, comercializa Agregados Pétreos procedentes de nuestra planta ubicada en el Km 51 vía San Gil - Bucaramanga, los cuales son extraídos del Río Chicamocha sector Pescadero (Santander).

En constancia se firma en la ciudad de Bucaramanga a los 9 días del mes de Agosto de 2018.

Cordialmente,

ARENERA LOS PINOS LTDA
NIT 900 100 138-0

GLADIS NIÑO PRIETO
Subgerente

ANEXO 2



MULTINSA 1A

MULTISERVICIOS DE INGENIERÍA 1 A S.A

Carrera 19 A No. 73-65 Barrio la Libertad
Tel: (7) 6200401 - PBX: (7) 6222990 - Fax: (7) 6223251
Barrancabermeja - Santander. INDUSTRIA COLOMBIANA
www.multinsa.com

CERTIFICADO DE CALIDAD

Del producto con las siguientes propiedades:

ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO TIPO II b

No.1693

Remisión: Muestra Comercial

Fecha de despacho: 07 Septiembre de 2018

Cliente: U. P. B.

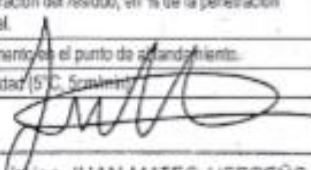
Placa: N/A

Fecha de lote: 17 Julio de 2018

Lote No. 110718

Despacho: 6 kg

Característica	Norma de Ensayo INV	Unidad	Mínimo	Máximo	Reportado
Penetración (25°C, 100 g, 5s).	E-706	0.1 mm	55	70	61
Punto de ablandamiento.	E-712	°C	58	-	62
Ductilidad (5°C, 5cm/min).	E-702	cm	15	-	20
Recuperación elástica por tensión a 25°C.	E-727	%	40	-	66
Estabilidad al almacenamiento (Nota 1) - Diferencia en el punto de ablandamiento.	E-726 y E-712	°C	-	5	1
Contenido de agua.	E-704	%	-	0.2	0.0
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland.	E-709	°C	230	-	270
Resumen de ensayo de pérdida por calentamiento en película delgada rotatoria, norma de Ensayo INV E-723					
Pérdida de masa.	E-720	%	-	1	-0.14
Penetración del residuo, en % de la penetración original.	E-706	%	65	-	66
Incremento en el punto de ablandamiento.	E-712	°C	-	10	5
Ductilidad (5°C, 5cm/min)	E-702	cm	8	-	12



Ing. Químico **JUAN MATEO HERREÑO GARCÍA**
C.C. 1.096.224.922 Registro Profesional No. 20607

FIRMA DE LABORATORIO

