

**Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas drenantes empleando
agregados del Río Sogamoso Santander**

María Camila Mantilla Suárez

Johan Sebastián Naranjo Rueda

Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director del trabajo de grado

ING. MSC. Julián Andrés Galvis Flórez

Universidad Pontificia Bolivariana

Facultad de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Marzo 2018

Dedicatoria

A mis abuelos por su paciencia, esfuerzo y entrega durante este camino. Y en agradecimiento por que sin ellos no sería quien soy.

A mi madre por su apoyo y amor incondicional.

A Silvia y Matías, mi hermana y mi pequeño sobrino, por confiar en mí, por cada sonrisa que me regalaron y por ser mi más grande motivación.

A mi compañero de trabajo de grado, quien se convirtió en mi amigo durante todo este tiempo, quien siempre me tendió la mano y de quien aprendí inmensamente.

Y a mi compañera de vida, por tantas experiencias vividas en las que crecí y fui feliz.

Camila Mantilla

Dedicatoria

A mi madre, por su gran esfuerzo y amor, que, durante todo este camino, fue mi gran apoyo y ejemplo para cumplir esta meta.

A mi padre, por siempre querer mostrarme el mejor sendero con sus sabios consejos.

A mi abuelita, por ser esa mujer inspiradora en cada mañana.

A mi pareja, por ser esa base de compañía en todo momento.

A mi compañera de trabajo de grado y amiga quien me mostro el valor de la amistad y del trabajo en equipo

Sebastián Naranjo

Agradecimientos

A nuestro director de trabajo de grado, el Ing. Msc Julián Gálvis Flórez, por su disposición total ante el trabajo de grado, a la Universidad Pontificia Bolivariana, por brindarnos las instalaciones y el personal para llevar a cabo los ensayos. A la empresa Multinsa S.A ubicada en Barrancabermeja Santander, por su aporte con una de las materias primas, y en general, a nuestros más allegados amigos.

Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Delimitación del Problema	20
1.1 Justificación.....	21
1.2 Estado del Arte	22
2. Objetivos	26
2.1 Objetivo General	26
2.2 Objetivos Específicos.....	26
3. Marco Teórico.....	27
3.1 Mezcla asfáltica drenante	27
3.2 Generalidades	28
3.2.1 Ventajas	30
3.2.2 Desventajas	31
3.2.3 El ruido	32
4. Metodología	36
4.1 Fase 1.....	36
4.1.1 Recopilación bibliográfica.....	36
4.1.2 Adquisición del agregado grueso	37
4.1.3 Caracterización de los agregados	38

4.1.4 Caracterización del cemento asfáltico convencional.....	41
4.1.5 Elaboración de probetas tipo marshall.....	45
4.1.6 Fallo de las probetas	47
4.1.7 Ensayo GMM (Gravedad Específica Máxima de Mezclas Asfálticas Para Pavimentos).	50
4.2 Fase 2.....	52
4.2.1 Elaboración de probetas drenantes y convencionales.....	52
4.2.2 Ensayo de permeabilidad.....	56
4.2.3 Fallo de las probetas en el aparato de Marshall.....	57
4.2.4 Ensayo de GMM (Gravedad específica máxima).....	58
4.3 Fase 3.....	58
4.3.1 Elaboración de probetas tipo Marshall	59
4.3.2 Comparación de temperaturas entre una muestra convencional y una drenante	60
4.3.3 Ejecución ensayo de pérdida por desgaste en la máquina de los ángeles.....	62
5. Análisis de resultados	66
5.1 Caracterización del agregado	66
5.2 Caracterización del cemento asfáltico convencional (60/70).....	67
5.2.1 Penetración del material bituminoso	68
5.2.2 Punto de chispa y llama	68
5.2.3 Punto de ablandamiento.....	69
5.2.4 Ductilidad de los materiales asfálticos	69
5.3 Caracterización del cemento asfáltico modificado.....	69
5.4 Elaboración y fallo de probetas tipo marshall.....	70

5.4.1 Fase 1	70
5.4.2 Gráficas.....	71
5.4.3 Fase 2.....	76
5.4.4 Gráficas muestras convencionales.....	78
5.4.5 Gráficas muestras drenantes	82
5.5 Comparación del comportamiento mecánico de muestras asfálticas convencionales y muestras asfálticas drenantes	85
5.5.1 Estabilidad	86
5.5.2 Flujo.....	87
5.5.3 GMM (Gravedad Específica Máxima).....	88
5.5.4 Porcentaje de vacíos con aire.....	89
5.6. Prueba de permeabilidad	90
5.7 Fase 3.....	91
5.7.1 Pérdidas por desgaste.....	91
5.7.2 Temperaturas con cámara termográfica	92
6. Resultados de Mezclas Drenantes.....	96
7. Conclusiones	97
Referencias Bibliográficas	100

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Efecto hidro planeo.....	29
<i>Figura 2.</i> Estabilidad vs. % Asfalto.....	72
<i>Figura 3.</i> Flujo vs. % Asfalto	73
<i>Figura 4.</i> Densidad (g/cm ³) vs. % Asfalto.....	74
<i>Figura 5.</i> Gravedad Específica Máxima vs. % Asfalto	75
<i>Figura 6.</i> % de vacíos con aire Vs % de asfalto	76
<i>Figura 7.</i> Estabilidad vs. % Asfalto.....	79
<i>Figura 8.</i> Flujo vs. % de Asfalto.....	79
<i>Figura 9.</i> Densidad vs. % de Asfalto.....	80
<i>Figura 10.</i> GMM vs. % de asfalto	81
<i>Figura 11.</i> % vacíos con aire vs. % de Asfalto.....	81
<i>Figura 12.</i> % de Asfalto vs. Estabilidad en KN	82
<i>Figura 13.</i> % de Asfalto vs. Flujo en mm.....	83
<i>Figura 14.</i> % Asfalto vs. Densidad en g/cm ³	83
<i>Figura 15.</i> % de Asfalto vs. Gravedad específica máxima.....	84
<i>Figura 16.</i> % Asfalto vs. % vacíos con aire	85
<i>Figura 17.</i> Comparación de estabildades (KN).....	86
<i>Figura 18.</i> Comparación entre flujos (mm).....	87

<i>Figura 19.</i> Comparación entre GMM.....	88
<i>Figura 20.</i> Comparación entre porcentaje de vacíos con aire (%)	89

Lista de Fotografías

	Pág.
<i>Fotografía 1.</i> Muestra drenante	28
<i>Fotografía 2.</i> Cantera del agregado	37
<i>Fotografía 3.</i> Material pesado.....	38
<i>Fotografía 4.</i> Material seco.....	39
<i>Fotografía 5.</i> Proceso tamizado.....	39
<i>Fotografía 6.</i> Muestra cuarteada.....	40
<i>Fotografía 7.</i> Alargamiento y aplanamiento.....	40
<i>Fotografía 8.</i> Caras fracturadas	41
<i>Fotografía 9.</i> Ensayo de penetración	42
<i>Fotografía 10.</i> Ensayo punto de ablandamiento	43
<i>Fotografía 11.</i> Inicio ensayo de ductilidad	44
<i>Fotografía 12.</i> Fin ensayo de ductilidad	44
<i>Fotografía 13.</i> Ensayo con la copa Cleveland	45
<i>Fotografía 14.</i> Cantidades separadas	46
<i>Fotografía 15.</i> Proceso de compactación.....	46
<i>Fotografía 16.</i> Desencofrado	47
<i>Fotografía 17.</i> Muestras secas	47
<i>Fotografía 18.</i> Toma de medidas.....	48

<i>Fotografía 19.</i> Peso en el agua	48
<i>Fotografía 20.</i> Aparato de Marshall	49
<i>Fotografía 21.</i> Muestra desintegrada	50
<i>Fotografía 22.</i> Ejecución del ensayo	51
<i>Fotografía 23.</i> Ejecución del ensayo	51
<i>Fotografía 24.</i> Muestra drenante a la izquierda y convencional a la derecha.	55
<i>Fotografía 25.</i> Prueba de permeabilidad	57
<i>Fotografía 26.</i> Preparación de muestras	59
<i>Fotografía 27.</i> Máquina compactadora.....	60
<i>Fotografía 28.</i> Muestra drenante (izquierda) y muestra convencional (derecha).....	60
<i>Fotografía 29.</i> Toma de temperatura en el laboratorio. Drenante (izquierda), convencional (derecha)	61
<i>Fotografía 30.</i> Toma de temperatura de las muestras expuestas al sol.	61
<i>Fotografía 31.</i> Muestras expuestas al sol, izquierda convencional y derecha drenante	62
<i>Fotografía 32.</i> Máquina de los Ángeles	63
<i>Fotografía 33.</i> Tambor máquina de los Ángeles	63
<i>Fotografía 34.</i> Muestras antes (izquierda) y después del ensayo (derecha).....	64
<i>Fotografía 35.</i> Muestra después del ensayo	65
<i>Fotografía 36.</i> Muestras después del ensayo.....	65
<i>Fotografía 37.</i> Imagen de luz visible a las 8:40 am.....	93
<i>Fotografía 38.</i> Imagen cámara termográfica 8:40 am	93
<i>Fotografía 39.</i> Imagen de luz visible a las 11:40 am.....	94
<i>Fotografía 40.</i> Imagen cámara termográfica a las 11:40 am.....	94

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Granulometría de mezclas drenantes</i>	22
Tabla 2. <i>Franja granulométrica para mezcla drenante</i>	30
Tabla 3. <i>Datos ensayo de alargamiento y aplanamiento</i>	41
Tabla 4. <i>Datos ensayo de penetración</i>	42
Tabla 5. <i>Datos ensayo de ablandamiento</i>	43
Tabla 6. <i>Datos ensayo de la copa Cleveland</i>	45
Tabla 7. <i>Datos alturas y diámetros de las probetas</i>	48
Tabla 8. <i>Datos obtenidos en el ensayo de Marshall</i>	50
Tabla 9. <i>Datos obtenidos en el ensayo de GMM, Gravedad específica máxima</i>	52
Tabla 10. <i>Tamices para mezclas convencionales</i>	52
Tabla 11. <i>Franja granulométrica para mezcla drenante</i>	53
Tabla 12. <i>Certificado de calidad del asfalto modificado con polímeros tipo II b</i>	54
Tabla 13. <i>Dimensionamiento de las muestras convencionales</i>	55
Tabla 14. <i>Dimensionamiento de las mezclas drenantes</i>	56
Tabla 15. <i>Datos ensayo de Marshall muestras convencionales</i>	57
Tabla 16. <i>Datos ensayo de Marshall muestras drenantes</i>	58
Tabla 17. <i>Datos obtenidos en el ensayo de Gmm para muestras drenantes</i>	58
Tabla 18. <i>Peso de las probetas antes del ensayo del Cántabro</i>	64

Tabla 19. <i>Peso de las probetas luego de 24 horas en agua</i>	65
Tabla 20. <i>Cálculos ensayo de alargamiento y aplanamiento</i>	66
Tabla 21. <i>Cálculos ensayo caras fracturadas</i>	67
Tabla 22. <i>Requisitos de los agregados para mezcla drenante</i>	67
Tabla 23. <i>Valores de penetración</i>	68
Tabla 24. <i>Verificación de las especificaciones para cemento asfáltico modificado</i>	69
Tabla 25. <i>Cálculos marshall y gravedad específica máxima</i>	70
Tabla 26. <i>Calculo gravedad específica máxima</i>	71
Tabla 27. <i>Datos de % Asfalto y Estabilidad en KN</i>	71
Tabla 28. <i>Datos de % Asfalto y flujo</i>	72
Tabla 29. <i>Datos % Asfalto y Densidad</i>	73
Tabla 30. <i>Datos % Asfalto y GMM</i>	74
Tabla 31. <i>Datos de % Asfalto y % vacíos con aire</i>	75
Tabla 32. <i>Cálculos Marshall y gravedad específica máxima en mezclas convencionales</i>	77
Tabla 33. <i>Cálculo gravedad específica máxima para mezclas convencionales</i>	77
Tabla 34. <i>Cálculos Marshall y gravedad específica máxima en mezclas drenantes</i>	77
Tabla 35. <i>Calculo gravedad específica máxima para mezclas drenantes</i>	78
Tabla 36. <i>Datos de % Asfalto convencional y Estabilidad en KN</i>	78
Tabla 37. <i>Datos de % de asfalto convencional y flujo en mm</i>	79
Tabla 38. <i>Datos % de Asfalto convencional y densidad</i>	80
Tabla 39. <i>Datos porcentaje de Asfalto convencional y gravedad específica máxima</i>	80
Tabla 40. <i>Datos asfalto convencional Vs. % vacíos con aire</i>	81
Tabla 41. <i>Datos % de asfalto modificado y estabilidad en KN</i>	82

Tabla 42. <i>Datos % de Asfalto modificado y flujo en mm</i>	82
Tabla 43. <i>Datos % de Asfalto modificado y Densidad en g/cm³</i>	83
Tabla 44. <i>Datos % Asfalto modificado y gravedad especifica máxima</i>	84
Tabla 45. <i>Datos % de Asfalto modificado y % de vacíos con aire</i>	84
Tabla 46. <i>Datos de estabilidad para cada una de las muestras</i>	86
Tabla 47. <i>Datos de flujo para cada una de las muestras</i>	87
Tabla 48. <i>Datos de GMM para cada una de las muestras</i>	88
Tabla 49. <i>Datos de porcentaje de vacíos con aire para cada una de las muestras</i>	89
Tabla 50. <i>Datos prueba de permeabilidad</i>	90
Tabla 51. <i>Resultados ensayo del cántabro</i>	91
Tabla 52. <i>Resultados ensayo del cántabro con presencia de agua</i>	92
Tabla 53. <i>Comparacion de temperaturas</i>	95
Tabla 54. <i>Resumen general para las mezclas asfálticas drenantes</i>	96

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES EMPLEANDO AGREGADOS DE SOGAMOSO SANTANDER.

AUTOR(ES): María Camila Mantilla Suárez
Johan Sebastián Naranjo Rueda

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

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

RESUMEN

Una mezcla asfáltica drenante es aquella que se caracteriza por tener la capacidad de filtrar agua a través de su estructura, esto se logra con un alto porcentaje de vacíos con aire que se encuentran interconectados entre sí y permiten que el agua fluya entre ellos. En este trabajo de grado se estudió el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas drenantes, comparándolas con mezclas asfálticas convencionales, buscando conocer a fondo sus propiedades y diferentes usos en los pavimentos/ingeniería de carreteras. Para ello se realizaron ensayos en 3 fases. En la fase 1, se fabricaron y fallaron probetas tipo Marshall, tres por cada porcentaje de asfalto (4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%) con ellos se eligió un rango para encontrar la cantidad óptima de cemento asfáltico que cumpliera con lo indicado en las especificaciones generales de construcción de carreteras artículo 453 [1] . En la fase 2, se fabricaron probetas tipo Marshall con las especificaciones del ensayo del Cántabro como lo indica la norma, se usaron porcentajes de (5%, 5,5% y 6%) y se produjeron muestras drenantes y convencionales esto con el fin que comprar sus propiedades y de encontrar un porcentaje de vacíos para las mezclas drenantes entre (20%-25%). Y por último en la fase 3, con el porcentaje óptimo encontrado (5,5%) se fabricaron probetas y se fallaron en la máquina de los ángeles con el fin de encontrar la pérdida por desgaste según el ensayo del Cántabro. El porcentaje óptimo encontrado para que una mezcla sea considerada drenante, fue el de 5,5%, los ensayos realizados muestran que una muestra convencional tiene un mejor comportamiento, con una diferencia mínima en estabilidad y flujo, que una muestra drenante.

PALABRAS CLAVE:

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

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF DRAINING ASPHALT MIXES USING ADDITIVES OF SOGAMOSO SANTANDER.

AUTHOR(S): Maria Camila Mantilla Suarez
Johan Sebastián Naranjo Rueda

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ing. MSc. Julián Andrés Galvis Flórez

ABSTRACT

A mixture of asphalt drainage is one that is characterized by having the ability to filter water through its structure, this is achieved with a high percentage of voids with air that are interconnected with each other and allow water to flow between them. . In this work of degree studied the mechanical behavior of the asphalt draining mixtures, comparing them with conventional asphalt mixtures, seeking to know in depth their properties and different uses in pavements / road engineering. For this, the tests were carried out in 3 phases. In phase 1, Marshall type samples were made and failed, three for each percentage of asphalt (4%, 4.5%, 5%, 5.5% and 6%) with them a range was chosen to find the optimum quantity of asphalt cement that comply with what is indicated in the general specifications of article 453 of road construction [1]. In phase 2, Marshall type specimens were manufactured with the specifications of the Cantabria test as indicated in the standard, percentages of (5%, 5.5% and 6%) were used and drainage and conventional samples were produced to buy your properties and find a percentage of empty drains for mixtures between (20% -25%). And finally, in phase 3, with the optimum percentage found (5.5%), specimens were made and the machine of the angels could not find the loss of wear according to the Cantabria test. The optimum percentage found for a mixture to be considered as drainage was 5.5%, the tests performed show that a conventional sample has a better behavior, with a minimum difference in stability and flow, than a drainage sample.

KEYWORDS:

Asphaltic draining mixture, conventional mixture, asphalt, modified asphalt cement.

Introducción

El presente trabajo de grado se enfoca en el estudio de mezclas asfálticas drenantes, que se pueden definir como “aquellas en las que su contenido de vacíos es suficientemente alto como para permitir que se filtren aguas lluvia con rapidez y puedan ser evacuadas hacia bermas, cunetas y otros elementos de drenaje, y así evitar su permanencia en la superficie de rodadura.” [2]. El comportamiento de estas se estudió y comparo con las mezclas asfálticas convencionales “las cuales son conformadas por una capa de rodadura de mezcla asfáltica tipo denso, siendo impermeable, evitando el deterioro prematuro de la estructura”. [3]

La característica principal de este tipo de mezclas es su comportamiento positivo frente al agua, lo que trae gran cantidad de beneficios, pues con el uso adecuado de estas, se reducirían factores importantes en la vía como la accidentalidad producida por el hidropneumático y el ruido, además de esto se es más amigable con el medio ambiente ya que el agua deja de ser un problema porque no se quedara estancada en la capa asfáltica hasta que se evapore y pasa a ser un recurso para los sistemas de alcantarillado que estén conectados directamente con el drenaje de la vía.

La implementación de mezclas asfálticas drenantes se empezó a ver reflejada en diferentes lugares del mundo, debido al uso de asfaltos modificados “en los cuales se incorporan polímeros dando como resultados ligantes con notables características de elasticidad, adherencias y cohesión” [2], ideales para mejorar el comportamiento mecánico de la estructura del pavimento.

Para a llevar a cabo este trabajo de grado, se realizó una serie de ensayos exigidos por las especificaciones generales de construcción de carreteras, con los cuales se recopiló una serie de datos e información, y con esto, por medio de cálculos impuestos por dicha norma se conocieron las cantidades y los porcentajes óptimos a utilizar para fabricar las muestras tanto drenantes como convencionales.

Lo que se buscó con el resultado final de este trabajo de grado, es dar a conocer las propiedades y beneficios que una mezcla drenante puede brindar en condiciones climáticas de lluvia, en las que una mezcla convencional se comportaría de una forma no tan eficiente respecto a una mezcla drenante.

1. Delimitación del Problema

Una parte fundamental del pavimento es la capa de rodadura, sobre la cual se desplazan los vehículos, pero en ella, en condiciones críticas de lluvia, se acumula agua, esta acumulación es una de las causas externas más frecuentes en los accidentes de tránsito en Colombia y en el mundo. [4]

Uno de los problemas que presenta un asfalto tradicional es; que, por sus condiciones de diseño, no está en la capacidad de drenar el agua que pueda llegar hasta él, a través de su estructura. Siendo esta la razón principal para estudiar un pavimento que tenga una capa asfáltica drenante, la cual puede reducir altamente el grado de accidentalidad y disminuir el ruido del tráfico producido por los neumáticos de los vehículos, ya que la superficie porosa absorbe la energía del sonido y permite que parte del aire que se encuentra alrededor de los neumáticos sea presionado dentro de los poros. Además de esto, para su instalación, solo se necesita extender sobre la superficie y compactar evitando así el vibrado. [5]

Lo que se busca al aplicar este tipo de mezcla, es que el agua que caiga sobre ella, no se quede estancada produciendo un mayor grado de accidentalidad en la carretera, si no que drene entre los vacíos de la mezcla drenante.

1.1 Justificación

La razón principal del desarrollo de este trabajo de grado surge por la identificación de los problemas presentes en las carreteras de mezclas asfálticas convencionales, tales como el hidropilado, el cual es una de las principales causas de los accidentes de tránsito, también el ruido generado por la fricción entre la capa de rodadura y el neumático, y la emisión de calor.

Tal problemática lleva al estudio de las características de una mezcla asfáltica drenante, que evite que con las lluvias se forme esta película de agua.

En ciudades como Bogotá se han realizado estudios enfocados en este asunto, pero en Santander no, por esto se busca ser pioneros en el tema y que con el tiempo se siga desarrollando y estudiando a fondo. [1]

El alcance del trabajo de grado se basa en fabricar una mezcla drenante con el fin de caracterizar sus propiedades por medio de ensayos propuestos por el INVIAS 2013 que se realizaron en el laboratorio de pavimentos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, y con dichos resultados compararla con una mezcla de asfalto tradicional.

Esta investigación se dio, por el interés de experimentar sobre este tipo de mezcla con agregados de Santander y sus diferentes aplicaciones, de las cuales no se registran antecedentes de estructuras existentes en el país.

1.2 Estado del Arte

En Colombia las mezclas drenantes son conocidas como MD, de acuerdo con INVIAS 2013, y para el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) esto cambia a MDr15 en donde el número indica el tamaño máximo aproximado en milímetros de la partícula del agregado pétreo de la mezcla, y la granulometría de estas es la misma. [7]

Tabla 1. *Granulometría de mezclas drenantes*

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alterno	MD y MDr15
19 mm	3/4"	100
12.5 mm	1/2"	70 a 100
9.5 mm	3/8"	50 a 75
4.75 mm	No. 4	15 a 32
2 mm	No. 10	9 a 20
425 µm	No. 40	5 a 12
75 µm	No. 200	3 a 7

Fuente: Pavimentos materiales, construcción y diseño, Hugo Alexander Rondón, 2015.

Según AASHTO (American Association of state Highway and Transportation Officials), los pavimentos asfálticos drenantes están diseñados para cargas de tránsito bajas, 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. [8]

En Santander no se ha reportado en la literatura la aplicación y uso de mezclas asfálticas drenantes, pero si en países como Estados Unidos y Francia en los años 40's y 60's respectivamente. En Francia, se dejó de practicar dicha alternativa, y se retomó en España en el año 1985 con estudios realizados por la Escuela de Ingenieros de Caminos de Santander en donde su objetivo principal era mejorar el tráfico en situaciones de lluvia. El resultado de los estudios realizados por esta universidad fue normalizar ensayos como el cántabro y el L.C.S (Determinación de la permeabilidad in situ).

Desde entonces, en España se ha estado utilizando con más frecuencia este tipo de estructuras asfálticas manejando espesores que oscilan entre tres y cinco centímetros. También existen una serie de tramos experimentales con granulometrías y espesores variantes a los cuales se les ha hecho un seguimiento durante 10 años para analizar su durabilidad. [2]

Finalizando la década de los 90's en carreteras españolas ya existían aproximadamente 10.000.000 m² de pavimentos drenantes. [2]

Un estudio realizado en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá publicado en 2013 buscaba determinar si dicho método podría ejecutarse para una ciudad como esta. Se obtuvo como resultado que uno de los factores más determinantes para el funcionamiento de pavimentos drenantes es la colmatación y que esta podría no ser suficientemente específica para el grado de contaminación en las diferentes aguas de escorrentía, por ende, se debe garantizar el mantenimiento de esta y esto limita la aplicación del sistema, debido a que este tipo de estructuras tienen un alto costo de sostenimiento [5]

Un estudio realizado en Costa Rica, el cual buscaba analizar el comportamiento de las mezclas drenantes y generar un marco de especificaciones para su construcción. El diseño de la mezcla se realizó siguiendo dos metodologías distintas, Marshall y Superpave, esto con el fin de comparar los resultados obtenidos de cada una de ellas. También se efectuaron ensayos de deformación permanente a 60°C y 70°C, ensayos de módulo resiliente a la tensión diametral y ensayos de resistencia al efecto del agua. [9]

Por otro lado, existen tramos representativos de mezclas asfálticas drenantes en Argentina, uno de estos es el que consiste en la ampliación de una calzada de la autopista Ezeiza-Cañuelas, en Buenos Aires, donde para dicha ampliación, se utilizó una mezcla porosa con un contenido de finos bajo y 0,5% de fibras de celulosa.

En una investigación hispano-argentina, se llegó a la conclusión de que cuando el contenido de fibras llega a una cantidad, las pérdidas por desgaste en el ensayo cántabro son mayores y la drenabilidad de la mezcla es menor, por lo cual hay que tener en cuenta las dosificaciones máximas para estos contenidos.

Francia es un país en el que se tiene un poco abandonado el uso de estas mezclas con alto contenido de vacíos, ya que no se ha obtenido buenos resultados con estas, porque eran muy sensibles a los desprendimientos, debido a que las características del ligante que usaban no eran adecuadas por ser un cemento asfáltico convencional, lo que fortalece más el uso de asfaltos modificados para estas mezclas. [10]

Se hizo una investigación sobre la capacidad de drenaje y contra obstrucción de mezclas asfálticas porosas, lo cual llamó la atención del mundo de la ingeniería de pavimentos, referenciando los buenos resultados que mostró este tipo de mezcla ante un tema tan importante como el del hidropilaje, que es una de las mayores causas de los accidentes de tráfico, además de esto una disminución importante del ruido generado por el tráfico y así mejorar la seguridad en la conducción.

Respecto al drenaje de la muestra hicieron una comparación entre un espécimen de 16% de porosidad y uno de 21% de porosidad, en donde la más porosa brinda una drenabilidad en un 49.8% mayor que la de menor porosidad. La contra obstrucción mejora, en la mezcla más porosa, en un 55,0%, llegando así a la conclusión de que en el espécimen con agregado más grueso y con mayor porosidad, se tiene un mejor rendimiento en la capacidad de drenaje y la contra obstrucción.

[11]

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Comparar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas drenantes tomando como referencia una mezcla asfáltica convencional usando agregados del río Sogamoso.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir el porcentaje de cemento asfáltico óptimo para que una mezcla sea considerada drenante según la norma INVIAS 2013 (Especificaciones generales de construcción de carreteras Art 453).
- Comparar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica drenante tomando como referencia la mezcla asfáltica convencional.
- Establecer las condiciones óptimas de comportamiento de la mezcla propuesta, basado en sus capacidades mecánicas.
- Comparar las temperaturas, en condiciones reales, de una mezcla drenante y una convencional, con ayuda de una cámara termográfica.

3. Marco Teórico

En este ítem se desarrollará el marco teórico de esta investigación, el cual proporcionará al lector una idea más clara acerca de este tema.

3.1 Mezcla asfáltica drenante

Las mezclas asfálticas drenantes tienen la capacidad de filtrar las aguas lluvia con cierta rapidez, a diferencia de las mezclas porosas, estas mezclas garantizan la conexión entre los vacíos, lo cual permite que el agua atraviese la estructura.

Los componentes de estas mezclas son el material bituminoso y los agregados, en ocasiones, se le agrega otro tipo de productos que son los aditivos, con los cuales, se busca mejorar algunas características de la mezcla. Frecuentemente para mezclas con un contenido que supere el 20% de vacíos, se emplea cemento asfáltico modificado. [2]



Fotografía 1. Muestra drenante

Fuente: Elaboración propia

3.2 Generalidades

Se conoce como carretera a un camino pavimentado puesto al servicio para transportar vehículos. Dichas carreteras son pavimentadas con diferentes técnicas como; el pavimento en concreto, el cual es constituido por losas de concreto utilizado para áreas con cargas de vehículos muy pesados, pavimento flexible cuya capa es una mezcla asfáltica la cual puede sufrir deformaciones sin que la capa se rompa. [2]

Cada forma de pavimentación se hace respecto a la seguridad del usuario, buscando contrarrestar los factores que potencian la accidentalidad. Uno de los factores más influyentes en la accidentalidad es el hidroplaneo el cual es la principal causa del deslizamiento y el volteo de los

vehículos. El hidroplaneo es un efecto que ocurre cuando se forma una capa de agua entre la capa de rodadura y el neumático, esto hace que la fricción disminuya de una manera importante y cause el deslizamiento de los vehículos. [2]

En la figura 1, se puede observar el efecto que hace el agua sobre el neumático, evitando el contacto pleno entre este, y la capa de rodadura.



Figura 1. Efecto hidro planeo

Fuente: Motorbit.com

Según las especificaciones generales de construcción de carreteras artículo 453-13 [1] para que una mezcla sea considerada drenante debe cumplir con lo siguiente:

- Que se fabriquen con la siguiente granulometría

Tabla 2. Franja granulométrica para mezcla drenante

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm / U.S Standart)						
	19.0 3/4"	12.5 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.00 No. 10	0.425 No. 40	0.075 No. 200
	% PASA						
ÚNICA	100	70-100	50-75	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.

- Se diseñarán a partir de probetas cilíndricas tipo Marshall, confeccionadas como se describe en la norma de ensayo INVE- 760 (Ensayo del Cántabro)
- Los vacíos con aire de la mezcla compactada no deberán ser inferiores a veinte por ciento (20%) ni mayores a veinticinco por ciento (25%)
- Se realizará una prueba de permeabilidad en la que se debe verificar que pasen 100 mililitros de agua por la muestra rehumedecida en no más de 15 segundos, esto para asegurar que los vacíos con aire están debidamente interconectados

3.2.1 Ventajas

Principalmente son mezclas que brindan seguridad en la vía a los usuarios y de esta manera disminuyen la accidentalidad producida por el hidropilano, además de esto, en el proceso

constructivo, no se ejecuta la fase de vibrado para que no se reacomoden los agregados y se pierda la característica drenante, esto hace que la construcción de la estructura sea un tanto más rápida. Estas mezclas también disminuyen el ruido generado por la fricción entre el neumático y la capa de rodadura la reducción de sonido en una capa de rodadura drenante, respecto a una convencional, depende de su espesor y de su porcentaje de huecos, los cuales disiparán el ruido causado por los vehículos principalmente de gran peso. [10]

3.2.2 Desventajas

La mezcla asfáltica drenante presenta ciertas desventajas en el proceso constructivo, ya que, en dicho proceso, la mezcla no debe ser vibrada para evitar que sus partículas se reacomoden, y su mantenimiento, ya que es una mezcla que se ensucia fácilmente y se pueden colmatar sus drenes, lo que, por consiguiente, dificultaría el paso del agua por sus cavidades. Para esto hay que tener un acceso vehicular controlado, es decir, antes de llegar al tramo drenante debe haber un tramo limpio, libre de sedimentos u otros materiales que puedan afectarla.

Estas mezclas fallan, en su mayoría, por disgregación, que es la separación de los agregados, esto es causado principalmente por las cargas axiales ejercidas por el esfuerzo del tráfico existente en el tramo. [3]

Para estabilizar estos problemas presentes en las mezclas drenantes, se ha impuesto el uso de asfaltos modificados, los cuales ofrecen un mejor comportamiento de la mezcla, ya sea la cohesión,

adhesión y la resistencia a la desintegración de la estructura que se da por la pequeña superficie de contacto entre los agregados.

Estas mezclas drenantes son capaces de soportar flujos vehiculares de pesos altos, pero condicionando a que dicho flujo vehicular lleve una velocidad considerable para que no se transmitan esfuerzos axiales a la capa. [12]

3.2.3 El ruido

El 80% de la energía acústica emitida a la atmósfera proviene del tráfico vehicular, es por esto que la contaminación sonora de origen vial es un factor importante a controlar. Según la Agencia de Protección del medio ambiente de Estados Unidos, Una persona que esté expuesta ocho horas diarias, durante 40 años a niveles de ruido de 75 dB (A) o más, es propensa a tener pérdida total o parcial de la audición, lo cual es irreversible. [13]

Hay que tener en cuenta los diferentes fenómenos físicos responsables del fuerte y contaminante ruido causado por los vehículos, tales como:

- La macro rugosidad de la superficie del pavimento es la que causa la vibración de los neumáticos por carga vertical lo que produce el choque entre estos y la capa de rodadura a lo cual se le debe sumar las aceleraciones tangenciales.
- La deformación del neumático al estar en contacto con el asfalto produce lo denominado como “slip and stick” que es una serie de adherencias y deslizamientos que producen una

excitación local de contacto. En este ítem, se tienen en cuenta factores como las características del neumático y la textura de la capa de rodadura.

- La resonancia causada por las “bolsas” de aire que se forman en la parte de adelante y atrás del contacto entre el neumático y el pavimento, conocido como “air pumping” que es la succión o expulsión de aire.
- Los ruidos causados por la vibración de la carrocería y las cargas, lo cual depende del tipo de suspensión con la que cuente el vehículo y las características de la carpeta asfáltica. Los factores que influyen en el mecanismo de ruido también dependen del estado en que esté la calzada, si está seca o mojada, el estado del neumático, es decir, la presión de inflado, el estado físico, en donde tienen mayor impacto negativo los neumáticos de perfil ancho, que tienen mayor superficie de contacto neumático-asfalto y los neumáticos antideslizantes que al producir una fricción mayor están produciendo un nivel más alto de ruido. [13]

Entre las irregularidades superficiales de los pavimentos según sus características geométricas se tiene la rugosidad, la mega textura, la macro textura y la micro textura.

Se habla de micro textura cuando se refiere a la dimensión horizontal de la irregularidad que es menor a 0.5 mm y la dimensión vertical no supera los 0.2mm. La macro textura cuanta con dimensiones de 0.5 mm a 50 mm en horizontal y 0.2 mm en vertical. En la mega textura la dimensión horizontal se encuentra entre 5 y 50 cm., mientras que la vertical está entre 1 y 5 cm., finalmente la rugosidad implica un defecto superficial de la carretera de una dimensión horizontal superior a los 50 cm. [13]

En los años 70 se decía que la profundidad de la textura superficial era el parámetro más importante en la emisión de ruido, en donde se decía que para velocidades entre 40 y 80 km/h había una profundidad óptima entre los 0.5 y 0.8mm. La cual atenuaba y disminuía los efectos sonoros del tráfico vehicular. [13]

Un estudio de un vehículo lanzado con el motor apagado mostró que la magnitud del ruido neumático-pavimento se comporta de la siguiente manera: Para dimensiones horizontales de aproximadamente 80 mm, un aumento en la dimensión vertical implicaría aumento en el ruido (mega textura). Para dimensiones verticales de aproximadamente 3mm., un aumento de la dimensión vertical, por el contrario, disminuiría el ruido (macro textura). [13]

Los esfuerzos de succión del tráfico cuentan con un efecto descolmatador, el cual mantiene la permeabilidad del pavimento cuando la polución no es muy alta, Además, las mezclas drenantes tienen una alta resistencia a la deformación plástica, lo cual no les da una buena resistencia a los esfuerzos tangenciales [13]

Se sabe que:

$$\Delta L = 0,005.n.e$$

En donde:

ΔL = Reducción del ruido, dB (A)

n = Huecos en mezcla, %

e = Espesor de la capa de rodadura, mm

Con esto se obtiene que se pueda tener una reducción del ruido del orden de 4 dB (A) si se emplea una capa de rodadura de 4 cm y un porcentaje de vacíos mayor al 20%.

4. Metodología

4.1 Fase 1

En esta fase se realizó la respectiva caracterización de los agregados y el cemento asfáltico, además de esto se elaboró el primer grupo de probetas tipo Marshall con las que se estableció un rango para encontrar el porcentaje óptimo para mezclas drenantes.

4.1.1 Recopilación bibliográfica

Se realizó la respectiva consulta en libros como "ingeniería de pavimentos" de Alfonso Montejo, donde se encuentran antecedentes en países como España y Francia, en trabajos de grado de la Pontificia Universidad Javeriana y otros documentos existentes en bases de datos, en donde se hallaron históricos los cuales se tomarán como referencia para llevar a cabo el desarrollo del trabajo de grado. A demás de esto contamos con documentos facilitados por el Dr. Ing. Rodolfo Adrián Nosetti quien es el director de la maestría en ingeniería vial en la Universidad Nacional de La plata en Buenos Aires Argentina.

4.1.2 Adquisición del agregado grueso

Se utilizaron agregados del río Sogamoso ya que este agregado presenta adecuados comportamientos ingenieriles 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 el equipo de trabajo se desplazó hasta una de las canteras de Prevesa ubicada vía Peroles – La Gómez a cuatro minutos del intercambiador de La Fortuna, Santander.

En la fotografía 2, se puede apreciar la cantera de la que fue extraído el agregado.



Fotografía 2. Cantera del agregado

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Caracterización de los agregados

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

- Se pesó y se dejó el material en el horno para que se secase



Fotografía 3. Material pesado

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 4. Material seco

Fuente: Elaboración propia

- Una vez seco, se tomó una fracción de agregado para tamizarlo, como se observa en las fotografías 6 y 7.



Fotografía 5. Proceso tamizado

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 6. Muestra cuarteadada

Fuente: Elaboración propia

- Con el material tamizado se realizaron ensayos de alargamiento y aplanamiento, y caras fracturadas, como se observa en las fotografías 8 y 9.



Fotografía 7. Alargamiento y aplanamiento

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 8. Caras fracturadas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Datos ensayo de alargamiento y aplanamiento

ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO			
Peso inicial (gr)	10150	Alargamiento	Aplanamiento
Tamices	Peso total (gr)	Peso no paso (gr)	Peso si paso (gr)
2 ½"	-	-	-
2"	-	-	-
1 ½"	-	-	-
1"	733	0	178
¾"	1244	175	419
½"	1556	518	441
⅜"	842	255	253
¼"	1153	443	275

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Caracterización del cemento asfáltico convencional

Al cemento asfáltico suministrado por la universidad se le practicaron los siguientes ensayos, ilustrados en las fotografías 10, 11, 12, 13, y 14

- Índice de penetración



Fotografía 9. Ensayo de penetración

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Datos ensayo de penetración

N° ENSAYO	PENETRACION (mm)
1	59
2	58
3	62

Fuente: Elaboración propia

- Punto de ablandamiento



Fotografía 10. Ensayo punto de ablandamiento

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. *Datos ensayo de ablandamiento*

ABLANDAMIENTO	
Derecha	Izquierda
42°	42°
Promedio	42°

Fuente: Elaboración propia

- Ductilidad



Fotografía 11. Inicio ensayo de ductilidad

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 12. Fin ensayo de ductilidad

Fuente: Elaboración propia

- Punto de chispa y punto de llama.



Fotografía 13. Ensayo con la copa Cleveland

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Datos ensayo de la copa Cleveland

COPA CLEVELAND	
CHISPA	LLAMA
315°	330°

Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Elaboración de probetas tipo marshall

- Se separaron las cantidades requeridas de agregado, según la granulometría para cada una de las 15 probetas.



Fotografía 14. Cantidades separadas

Fuente: Elaboración propia

- Luego de mezclar el agregado con el cemento asfáltico, se procedió a la compactación de la mezcla con el martillo manual, por cada probeta, 75 golpes en cada cara.



Fotografía 15. Proceso de compactación

Fuente: Elaboración propia

- Se desencofró las muestras de los moldes y se dejaron enfriando.



Fotografía 16. Desencofrado

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 17. Muestras secas

Fuente: Elaboración propia

4.1.6 Fallo de las probetas

- Antes de ensayar las muestras en el aparato de Marshall, se caracterizaron tomando medidas de su diámetro y altura, para sacar un promedio por cada porcentaje y se tomaron sus pesos en el agua y en el aire.



Fotografía 18. Toma de medidas

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 19. Peso en el agua

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Datos alturas y diámetros de las probetas

PROCENTAJE	PROMEDIO ALTURA (cm)	DIÁMETROS (cm)
4%	6,87	10,51
		10,4
		10,295
4.5%	6,68	10,77
		10,515

PROCENTAJE	PROMEDIO ALTURA (cm)	DIÁMETROS (cm)
		11,205
5%	6,71	10,25
		10,21
		10,335
5.5%	6,49	10,23
		10,32
		10,32
6%	6,62	10,36
		10,215
		10,305

Fuente: Elaboración propia

- Se procedió a realizar el ensayo de Marshall para cada una de las probetas.



Fotografía 20. Aparato de Marshall

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. *Datos obtenidos en el ensayo de Marshall*

Porcentaje	Promedio Estabilidad(KN)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (KN)	Promedio Flujo
4	5,60	0,89	4,98	9,2
4,5	4,87	0,93	4,53	12,7
5	3,28	0,93	3,05	9,2
5,5	5,33	0,96	5,12	10,2
6	5,90	0,93	5,49	8,9

Fuente: Elaboración propia

4.1.7 Ensayo GMM (Gravedad Específica Máxima de Mezclas Asfálticas Para Pavimentos).

- Una vez realizado el ensayo de Marshall se tomó una muestra por cada porcentaje de asfalto y se desintegraron para realizar este ensayo.



Fotografía 21. Muestra desintegrada

Fuente: Elaboración propia

- Este material se introdujo en picnómetro de vacíos, se cubrió con agua en tres capas y se extrajo el aire presente mediante una bomba de vacíos y una base vibratoria



Fotografía 22. Ejecución del ensayo

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 23. Ejecución del ensayo

Fuente: Elaboración propia

- Se tomaron datos del recipiente lleno de agua y del recipiente lleno de agua más el material asfáltico, y con ellos se halló el GMM (Gravedad Específica Máxima).

Tabla 9. Datos obtenidos en el ensayo de GMM, Gravedad específica máxima

ENSAYO GMM			
Porcentaje	Peso seco (gr)	Peso con agua (gr)	Agua y recipiente (gr)
4%	1164	20350	19700
4,5%	1094	20300	19700
5%	1223	20370	19700
5,5%	1092,6	20290	19700
6%	1106	20320	19700

Fuente: Elaboración propia

4.2 Fase 2

En esta fase se fabricaron probetas tipo Marshall confeccionadas como lo describe el ensayo del cántabro INVE 760-13 [1].

4.2.1 Elaboración de probetas drenantes y convencionales

Con resultados obtenidos en la fase 1, se fabricaron de nuevo probetas tipo Marshall con las especificaciones del ensayo del cántabro INVE 760 [1], la cual indica que la compactación se realiza con 50 golpes en cada cara de la muestra. Se usaron porcentajes de (5%, 5.5% y 6%) y dos tipos de granulometría, una para mezclas asfálticas y otra para mezclas convencionales.

Tabla 10. Tamices para mezclas convencionales

# Tamiz	W Pasa (%)
3/4"	100
1/2"	80-95
3/8"	70-88
N°4	49-65
N°10	29-45

# Tamiz	W Pasa (%)
N°40	14-25
N°80	8-14
N°200	4-8
Fondo	0

Fuente: Elaboración propia

Para las mezclas convencionales se utilizó cemento asfáltico de tipo 60/70 suministrado por la empresa Multinsa S.A, ubicada en Barrancabermeja Santander.

Tabla 11. *Franja granulométrica para mezcla drenante*

# Tamiz	W Pasa (%)
3/4"	100
1/2"	70- 100
3/8"	50-75
N°4	15-32
N°10	9-20
N°40	5-12
N°200	3-7
Fondo	0

Fuente: Tabla 453 4, INV 2013

Como lo indica el numeral 453.2.2 de las especificaciones generales de construcción de carreteras, el material bituminoso para elaborar una mezcla drenante será cemento asfáltico modificado con polímeros, que corresponda a los tipos I o II.

La empresa Multinsa proporciono cemento asfáltico modificado con polímeros tipo IIB y el cumplimiento de las especificaciones dadas por la norma se muestra en la tabla 24 de este documento.

Tabla 12. *Certificado de calidad del asfalto modificado con polímeros tipo II b*

Característica	Norma de ensayo INV	Unidad	Mínimo	Máxima	Reportado
Penetración (25°C, 100 g, 5s)	E- 706	0.1 mm	55	70	59
punto de ablandamiento	E- 7012	°C	58	-	58
Ductilidad (5°C, 5cm/min)	E-702	cm	15	-	18
Recuperación elástica por torsión a 25°C	E-727	%	40	-	61
Estabilidad de almacenamiento (nota1) 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
residuo de ensayo de pérdida por calentamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo (INVE -720)					
pérdida de masa	E- 720	%	-	1	-0,06
Característica	Norma de ensayo INV	Unidad	Mínimo	Máxima	Reportado
penetración del residuo, en % de la penetración original	E- 706	%	65	-	69,7
incremento en el punto de ablandamiento	E- 712	°C	-	10	8,5
Ductilidad (5°C, 5cm/min)	E- 702	cm	8	-	9,2

Fuente: Multinsa S.A

Par las mezclas drenantes se utilizó cemento asfáltico modificado con polímeros tipo II suministrado por la empresa Multinsa S.A, ubicada en Barrancabermeja Santander. Dicho asfalto presenta las siguientes propiedades obtenidas de la ficha técnica entregada por Multinsa S.A

Es importante destacar que lo que diferencia una mezcla asfáltica convencional de una drenante es la granulometría que se usa para cada una de ellas, y el porcentaje que pasa por cada uno de los tamices.

En la granulometría para mezclas convencionales se observa un alto contenido de finos, lo que no ocurre con las mezclas drenantes ya que ellas para generar los vacíos necesarios para que filtre el agua no necesita un alto porcentaje de finos, al contrario, debe tener mayor porcentaje de agregados de tamaños más grandes.



Fotografía 24. Muestra drenante a la izquierda y convencional a la derecha.

Fuente: Elaboración propia

- Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13. Dimensionamiento de las muestras convencionales

PROCENTAJE	Altura (cm)	Promedio altura (cm)	Diámetro (cm)	Volumen (cm ³)
5%	6,63	6,67	10,15	536,660
	6,78		10,175	551,504
	6,62		10,14	534,796
5.5%	6,52	6,51	10,135	525,999
	6,53		10,14	527,326

PROCENTAJE	Altura (cm)	Promedio altura (cm)	Diámetro (cm)	Volumen (cm ³)
	6,47		10,14	522,279
	6,44		10,17	522,937
6%	6,27	6,37	10,145	507,031
	6,42		10,135	517,730

Fuente: Elaboración propia

NOTA: Las alturas registradas en las probetas realizadas con 5,0% de cemento, son mayores al rango establecido en el procedimiento Marshall, se graficaron para los análisis pero no fueron tenidas en cuenta como datos concluyentes.

Tabla 14. *Dimensionamiento de las mezclas drenantes*

PROCENTAJE	Prom Altura (cm)	Prom Diámetro(cm)	Volumen (cm ³)
5%	5,80	10,15	469,299
5.5%	6,20	10,145	500,767
6%	5,82	10,145	470,252

Fuente: Elaboración propia

NOTA: Las alturas registradas en las probetas realizadas con 5,5% de cemento asfáltico cumplieron con el rango establecido por el método Marshall, los demás porcentajes se graficaron, pero no fueron tenidos en cuenta como datos concluyentes. A demás de esto este porcentaje de 5,5% cumple el criterio de que los vacíos con aire deben estar entre el 20% y 25%.

4.2.2 Ensayo de permeabilidad

Antes de fallar dichas muestras en el aparato de Marshall se realizó una prueba de permeabilidad a las mezclas drenantes que consistió en colocar 100 mililitros de agua en un molde

conteniendo la probeta pre humedecida, y el tiempo que tardará el agua en atravesar la muestra no debía superar los 15 segundos. [1]



Fotografía 25. Prueba de permeabilidad

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Fallo de las probetas en el aparato de Marshall

Al igual que en la fase 1 se fallaron las muestras tanto drenantes como convencionales en el aparato de Marshall y los resultados obtenidos se muestran en las tablas 15 y 16.

Tabla 15. *Datos ensayo de Marshall muestras convencionales*

Porcentaje	Prom. estabilidad (KN)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (KN)	Prom. Flujo(mm)
5%	9,35	0,93	8,69	4,6
5,50%	11,91	0,96	11,43	4,8
6%	9,61	1	9,61	4,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. *Datos ensayo de Marshall muestras drenantes*

Procentaje	Prom. estabilidad (kn)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (Kn)	Prom. flujo(mm)
5%	8,98	1,19	10,68	4,2
5,50%	9,81	1,04	10,20	6,7
6%	11,01	1,19	13,10	4,8

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Ensayo de GMM (Gravedad específica máxima)

Se realizó este ensayo para cada porcentaje de las muestras drenantes anteriormente falladas, esto con el fin de encontrar un contenido de vacíos óptimo, que esté entre 20% y 25% como se indica en las especificaciones generales de construcción de carreteras artículo 453 [1].

Tabla 17. *Datos obtenidos en el ensayo de Gmm para muestras drenantes*

Porcentaje	Peso seco (gr)	Peso recipiente + agua + material (gr)	Peso recipiente + agua (gr)
5%	961	20230	19740
5,50%	988	20240	19740
6%	975	20230	19740

Fuente: Elaboración propia

4.3 Fase 3

En la última fase se fabricaron probetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico encontrado anteriormente, y se realizó el ensayo de pérdida por desgaste en la máquina de los ángeles según la INVE -760-13 [1]. Además de esto con ayuda de una cámara termográfica fueron

tomadas las temperaturas de una muestra drenante y una convencional con el fin de compararlas entre sí.

4.3.1 Elaboración de probetas tipo Marshall

En total se fabricaron nueve (9) probetas, de las cuales ocho (8) fueron drenantes y una convencional. Fueron computadas a 50 golpes como lo indica el ensayo del Cántabro, y se usó cemento asfáltico modificado con polímeros tipo II para las muestras drenantes y cemento asfáltico tipo (60/70) para la muestra convencional.



Fotografía 26. Preparación de muestras

Fuente: Elaboración propia

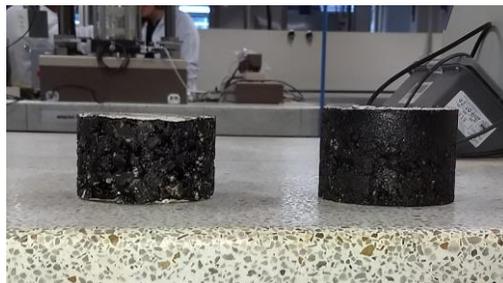


Fotografía 27. Máquina compactadora

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Comparación de temperaturas entre una muestra convencional y una drenante

Con ayuda de una cámara termográfica se tomaron las temperaturas de las probetas ya fabricadas.



Fotografía 28. Muestra drenante (izquierda) y muestra convencional (derecha)

Fuente: Elaboración propia

Se tomaron temperaturas de las muestras en las mismas condiciones a las 8:00 am, se dejaron expuestas al sol por aproximadamente 3 horas y se tomaron datos de nuevo.



Fotografía 29. Toma de temperatura en el laboratorio. Drenante (izquierda), convencional (derecha)

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 30. Toma de temperatura de las muestras expuestas al sol.

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 31. Muestras expuestas al sol, izquierda convencional y derecha drenante

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Ejecución ensayo de pérdida por desgaste en la máquina de los ángeles

Según el artículo 453 mezcla drenante, de las especificaciones generales de construcción de carreteras, las mezclas asfálticas abiertas deben ser caracterizadas por medio del ensayo del cántabro de pérdida por desgaste INVE- 760-13 [1].

Para ello se debe tomar cada una de las probetas e introducirlas en el tambor de la máquina de los Ángeles sin la carga abrasiva de las esferas durante 300 vueltas, se debe tomar el peso de la probeta antes y después del ensayo, y se calcula la pérdida por desgaste en porcentaje, este no debe superar el 25%



Fotografía 32. Máquina de los Ángeles

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 33. Tambor máquina de los Ángeles

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 34. Muestras antes (izquierda) y después del ensayo (derecha)

Fuente: Elaboración propia

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

Tabla 18. *Peso de las probetas antes del ensayo del Cántabro*

MUESTRA	PESO EN GRAMOS
1	967
2	971
3	965
4	969

Fuente: Elaboración propia

Además, se debe comprobar la adhesividad entre el agregado y el ligante, caracterizando la mezcla en presencia del agua, para ello se deben sumergir en agua las probetas a una temperatura de 60°C durante 24 horas y realizar el ensayo del Cántabro nuevamente.



Fotografía 35. Muestra después del ensayo

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 36. Muestras después del ensayo

Fuente: Elaboración propia

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

Tabla 19. *Peso de las probetas luego de 24 horas en agua*

MUESTRA	PESO EN GRAMOS
1	1013
2	1029
3	1003
4	972

Fuente: Elaboración propia

5. Análisis de resultados

En este ítem se mostrarán los resultados y cálculos obtenidos en los ensayos propuestos por la norma INVE -13 [1]

5.1 Caracterización del agregado

Se llevaron a cabo los ensayos de alargamiento y aplanamiento, y caras fracturadas, a continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 20. *Cálculos ensayo de alargamiento y aplanamiento*

ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO				
Peso inicial	10150 gr			
Tamices	IA (%)	IA global	IL (%)	IL global
1"	24,28	1,75%	0	0%
3/4"	33,68	4,13%	14,07	1,72%
1/2"	28,34	4,34%	33,29	5,10%
3/8"	30,05	2,49%	30,29	2,51%
1/4"	23,85	2,71%	38,42	4,36%

Fuente: Elaboración propia

En donde:

IA: índice de aplanamiento

IL: índice de alargamiento

Tabla 21. *Cálculos ensayo caras fracturadas*

CARAS FRACTURADAS		
tamices	peso lisas (gr)	fracturadas (gr)
1"	299	343
3/4"	326	915
1/2"	467	1088
3/8"	144	698
1/4"	272	877

Fuente: Elaboración propia

El agregado caracterizado cumple con lo indicado en la tabla 453-1 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2013, [1] lo cual consiste en que el porcentaje de partículas planas y alargadas no debe superar el diez por ciento (10%) y el porcentaje de caras fracturadas debe ser del 100 por ciento (100%).

Tabla 22. *Requisitos de los agregados para mezcla drenante*

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE TRANSITO NT2 Y NT3
Partículas planas y alargadas, 5:1, máximo (%)	10
Caras fracturadas, mínimo (%): dos caras	100

Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras

5.2 Caracterización del cemento asfáltico convencional (60/70)

El cemento asfáltico se caracterizó con las pruebas del penetrómetro, ductilidad y punto de chispa y llama, en las cuales se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno de los ensayos.

5.2.1 Penetración del material bituminoso

El promedio obtenido entre los tres datos de penetración consignados en la tabla 4, da como resultado 59.66 mm, en donde los datos extremos tienen una diferencia de 4 mm lo cual da cumplimiento a la norma INV E 706-13 [1]

Tabla 23. *Valores de penetración.*

PENETRACIÓN (0.1 mm)	0 a 49	50 a 149	50 a 149	250 y 500
DIFERENCIA MÁXIMA ENTRE VALORES EXTREMOS	2	4	12	20

Fuente: Norma INV E 706 - 13

5.2.2 Punto de chispa y llama

Según la norma INVE 709-13 Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta de Cleveland, el punto de chispa, que se define como la temperatura que hace que los vapores de la muestra de ensayo desprendan una llamarada repentina bajo condiciones específicas de la prueba, es igual a 315° C, como se observa en la tabla 6.

El punto de llama, que se define como la temperatura a la cual, cuando se aplique una fuente de ignición hace que los vapores de la muestra de ensayo ardan con una llama sostenida durante un mínimo de 5 segundos, bajo las condiciones específicas de la prueba, es igual a 330° C, Como se muestra en la tabla 6. [1]

5.2.3 Punto de ablandamiento

Según la norma INVE 712-13 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola), el punto de ablandamiento del material bituminoso fue de 42°C, este estando sumergido en agua, la norma indica, que la temperatura de ablandamiento en agua debe estar entre 30 a 80°C. Cumple lo establecido por la norma. [1]

5.2.4 Ductilidad de los materiales asfálticos

Debido a la limitación de la longitud en la máquina de ensayo, no se presentó rotura de la probeta, lo cual indica que el resultado debe ser la longitud limitante en este caso 150 cm a una temperatura de 21.8 °C. [14]

5.3 Caracterización del cemento asfáltico modificado

Tabla 24. Verificación de las especificaciones para cemento asfáltico modificado

Característica	Norma de ensayo INV	Unidad	Reportado	NORMAS INVIAS
Penetración (25°C, 100 g, 5s)	E- 706	0.1 mm	59	CUMPLE
punto de ablandamiento	E- 7012	°C	58	CUMPLE
Ductilidad (5°C, 5cm/min)	E-702	cm	18	CUMPLE
punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland	E-709	°C	270	CUMPLE
penetración del residuo, en % de la penetración original	E- 706	%	69,7	CUMPLE
Ductilidad (5°C, 5cm/min)	E- 702	cm	9,2	CUMPLE

Fuente: Tabla 414 - 1 INV E 13

El cumplimiento de dichas especificaciones se muestra en los análisis de resultados.

5.4 Elaboración y fallo de probetas tipo marshall

Se muestran los resultados obtenidos posteriormente a la elaboración de las probetas en cada una de las fases.

5.4.1 Fase 1

En la tabla se muestran los cálculos obtenidos luego de elaborar y fallar las probetas tipo Marshall, y realizar el ensayo de Gravedad Específica Máxima GMM, con el primer grupo de probetas.

Tabla 25. *Cálculos marshall y gravedad específica máxima*

%	volumen (cm ³)	Peso seco(g)	Promedio Densidad	Peso en el agua(g)	PESO SSS(g)	Gravedad Específica Bulk	GMM	% Vacios Con Aire
4%	594,273	1224,2	2,056	677,6	1237,6	2,178	2,2646	3,8045
	589,331	1160		638,9	1173,6			
	568,127	1214,8		663,2	1220,5			
4.5%	624,722	1212,9	1,857	649,5	1222,4	2,094	2,2146	5,4648
	593,753	1144,4		615,3	1151,8			
	626,656	1066,8		558,8	1084,2			
5%	554,301	1162,6	2,110	651,4	1172,7	2,211	2,2116	0,0144
	551,620	1170,5		650,5	1177,7			
	559,128	1180,1		650,8	1191,3			
5.5%	538,577	1258,7	2,168	706,5	1266,8	2,234	2,1739	2,7765
	535,130	1140,3		629,1	1141,6			
	546,841	1113,2		626,6	1125,5			

%	volumen (cm ³)	Peso seco(g)	Promedio Densidad	Peso en el agua(g)	PESO SSS(g)	Gravedad Específica Bulk	GMM	% Vacíos Con Aire
	539,497	1125,1		621,5	1130,7			
6%	555,439	1251,1	2,118	707,4	1253,6	2,214	2,2757	2,7033
	557,554	1124,6		613,3	1138,2			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26. *Calculo gravedad específica máxima*

ENSAYO GMM				
Porcentaje	Peso seco (gr)	Peso con agua (gr)	Peso Agua y recipiente (gr)	GMM
4	1164	20350	19700	2,2646
4,5	1094	20300	19700	2,2146
5	1223	20370	19700	2,2116
5,5	1092,6	20290	19700	2,1739
6	1106	20320	19700	2,2757

Fuente: Elaboración Propia

5.4.2 Gráficas

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra la estabilidad en KN.

Tabla 27. *Datos de % Asfalto y Estabilidad en KN.*

% Asfalto	Estabilidad (KN)
4	4,98
4,5	4,53
5	3,05
5,5	5,12
6	5,49

Fuente: Elaboración propia

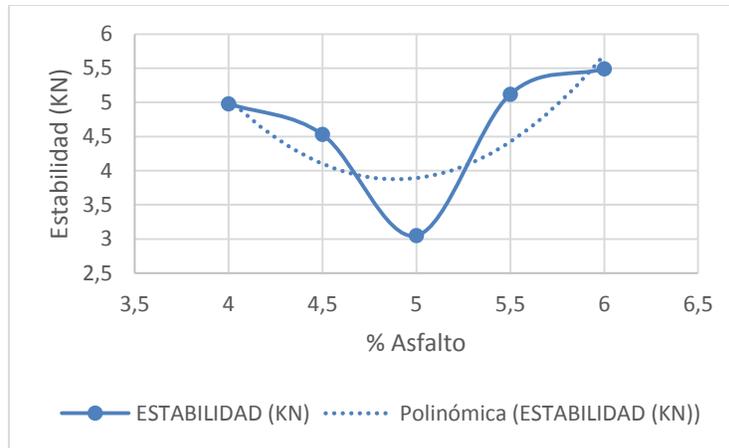


Figura 2. Estabilidad vs. % Asfalto

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra el flujo en mm.

Tabla 28. *Datos de % Asfalto y flujo*

% Asfalto	Flujo (mm)
4	9,16
4,5	12,66
5	9,24
5,5	10,24
6	8,93

Fuente: Elaboración propia

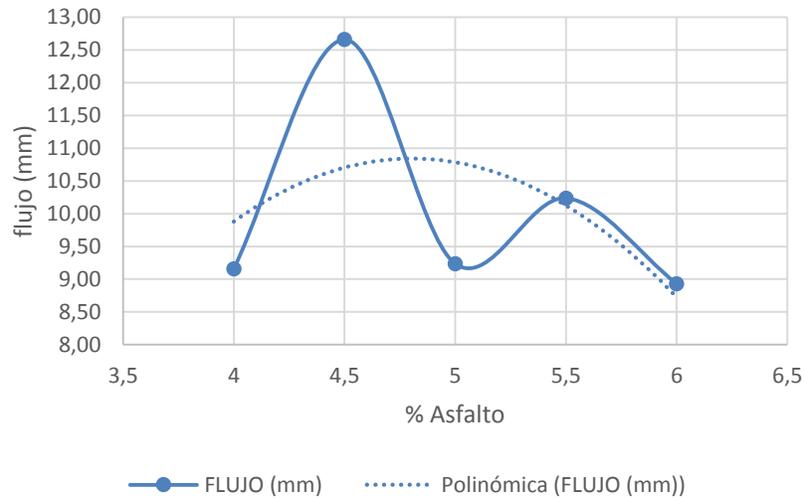


Figura 3. Flujo vs. % Asfalto

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra la densidad.

Tabla 29. *Datos % Asfalto y Densidad*

% ASFALTO	DENSIDAD (g/cm³)
4	1,99
4,5	1,86
5	2,08
5,5	2,17
6	2,09

Fuente: Elaboración propia

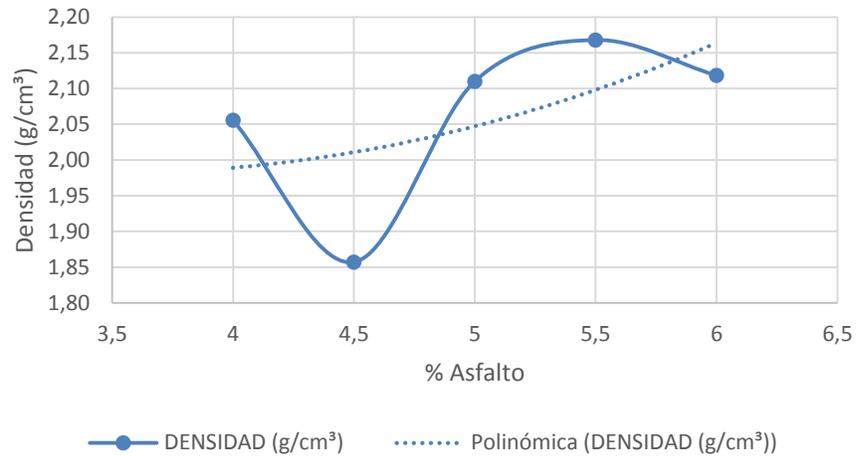


Figura 4. Densidad (g/cm³) vs. % Asfalto

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra la Gravedad Específica Máxima GMM.

Tabla 30. Datos % Asfalto y GMM

% ASFALTO	GMM
4	2,26
4,5	5,46
5	2,21
5,5	2,17
6	2,28

Fuente: Elaboración propia

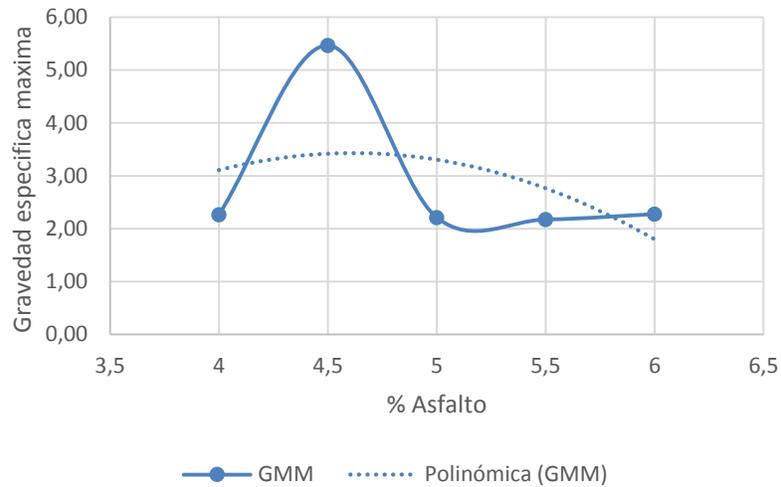


Figura 5. Gravedad Específica Máxima vs. % Asfalto

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra el % Vacíos con aire.

Tabla 31. Datos de % Asfalto y % vacíos con aire

% ASFALTO	% VACIOS CON AIRE
4	3,80
4,5	5,46
5	0,01
5,5	2,78
6	2,70

Fuente: Elaboración propia

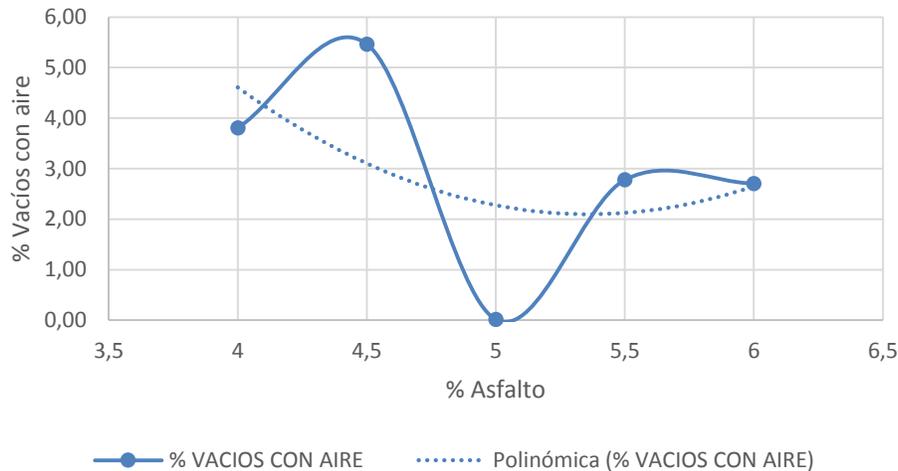


Figura 6. % de vacíos con aire Vs % de asfalto

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje óptimo se halló por medio de una serie de pruebas realizadas a briquetas con diferente contenido asfáltico (4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%), realizando el promedio entre la densidad máxima, la estabilidad máxima, y el valor medio del porcentaje de vacíos como lo indica la norma INV E 748-13 se obtuvo que el porcentaje óptimo es del 5%.

5.4.3 Fase 2

En esta fase se fabricaron probetas tipo Marshall convencionales y drenantes, con el fin de comparar sus propiedades mecánicas, los resultados obtenidos se muestran a continuación

Tabla 32. Cálculos Marshall y gravedad específica máxima en mezclas convencionales

%	Peso Seco(g)	Peso en el agua(g)	Peso SSS(g)	Promedio gravedad Bulk	densidad	GMM	% Vacíos con aire
5%	1203,4	681,2	1208,1	2,263	2,256	2,4009	5,7546
	1195,2	671,1	1205,8				
	1193,9	673,4	1199,6				
5,5%	1186,6	673,6	1191,7	2,290	2,283	2,1581	6,1081
	1184,4	671,9	1187,7				
	1176,3	666,5	1181,7				
6%	1197,4	681,7	1201,8	2,288	2,281	2,1290	7,4611
	1184,6	671,3	1192				
	1175,2	665,9	1179,9				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Cálculo gravedad específica máxima para mezclas convencionales

ENSAYO GMM				
Porcentaje	Peso seco (gr)	Peso con agua (gr)	Agua y recipiente (gr)	GMM
5%	1114	20350	19700	2,4009
5,50%	1174	20330	19700	2,1581
6%	1188	20330	19700	2,1290

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Cálculos Marshall y gravedad específica máxima en mezclas drenantes

%	Peso seco(g)	Densidad bulK (g/cm ³)	Promedio densidad	Peso en el agua(g)	Peso SSS(g)	Gravedad específica bulk	Promedio gravedad	GMM	% Vacíos con aire
5%	1203	2,584	2,565	681,2	1208,1	2,591	2,572	2,0403	26,0747
	1195	2,567		671,1	1205,8	2,574			
	1194	2,544		673,4	1199,6	2,551			
5.5%	1187	2,501	2,433	673,6	1191,7	2,508	2,440	2,0246	20,5356
	1184	2,450		671,9	1187,7	2,457			
	1176	2,349		666,5	1181,7	2,356			
6%	1197	2,637	2,564	681,7	1201,8	2,644	2,571	2,0103	27,9024
	1185	2,555		671,3	1192	2,563			
	1175	2,499		665,9	1179,9	2,506			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35. *Calculo gravedad especifica máxima para mezclas drenantes*

ENSAYO GMM				
%	Peso seco (gr)	Peso con agua (gr)	Agua y recipiente (gr)	GMM
5%	961	20230	19740	2,0403
5,50%	988	20240	19740	2,0246
6%	975	20230	19740	2,0103

Fuente: Elaboración propia

5.4.4 Gráficas muestras convencionales

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra la estabilidad en KN.

Tabla 36. *Datos de % Asfalto convencional y Estabilidad en KN.*

% ASFALTO	ESTABILIDAD (KN)
5	8,69
5,5	11,43
6	9,61

Fuente: Elaboración propia

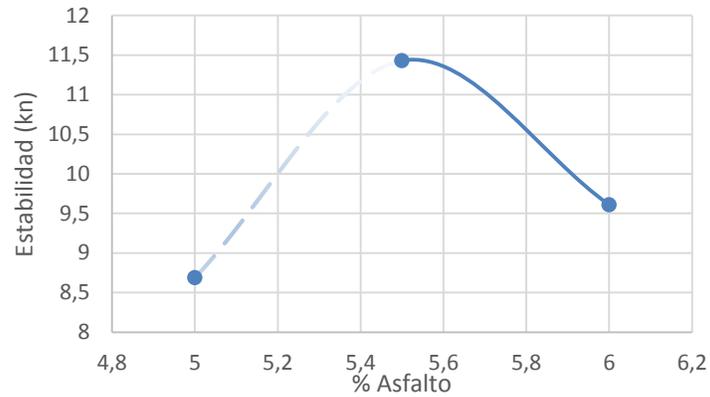


Figura 7. Estabilidad vs. % Asfalto

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra el Flujo en milímetros.

Tabla 37. Datos de % de asfalto convencional y flujo en mm

% ASFALTO	FLUJO (mm)
5	4,6
5,5	4,8
6	4,7

Fuente: Elaboración propia

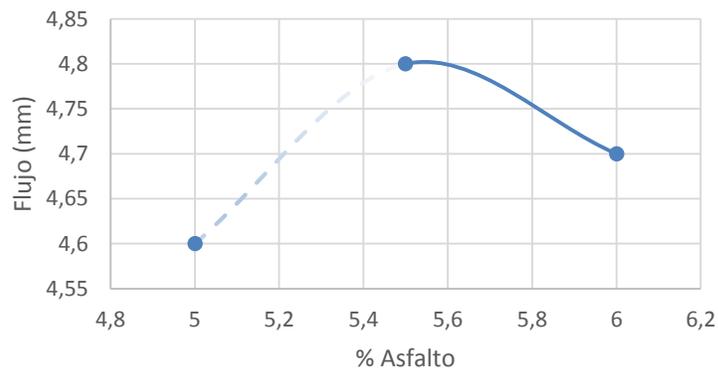


Figura 8. Flujo vs. % de Asfalto

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra la densidad en g/cm^3 .

Tabla 38. Datos % de Asfalto convencional y densidad

% ASFALTO	DENSIDAD (g/cm^3)
5	2,256
5,5	2,283
6	2,281

Fuente: Elaboración Propia

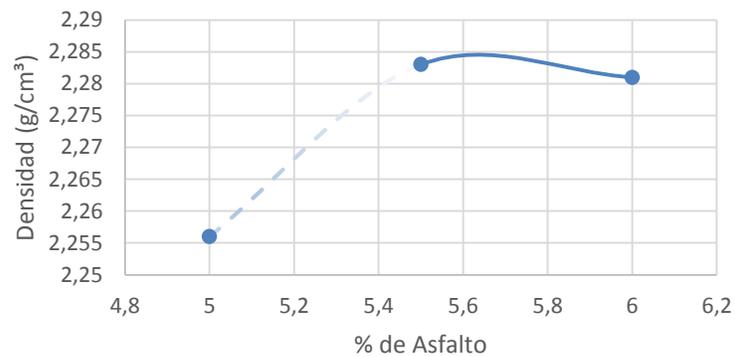


Figura 9. Densidad vs. % de Asfalto

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra GMM gravedad específica máxima.

Tabla 39. Datos porcentaje de Asfalto convencional y gravedad específica máxima

% ASFALTO	GMM
5	2,4009
5,5	2,1581
6	2,1290

Fuente: Elaboración Propia

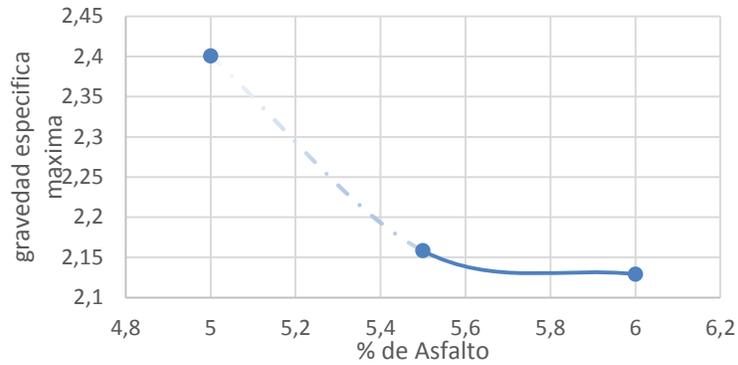


Figura 10. GMM vs. % de asfalto

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra vacíos con aire

Tabla 40. Datos asfalto convencional Vs. % vacíos con aire

% ASFALTO	% VACIOS CON AIRE
5	0,0834
5,5	7,146
6	23,4252

Fuente: Elaboración propia

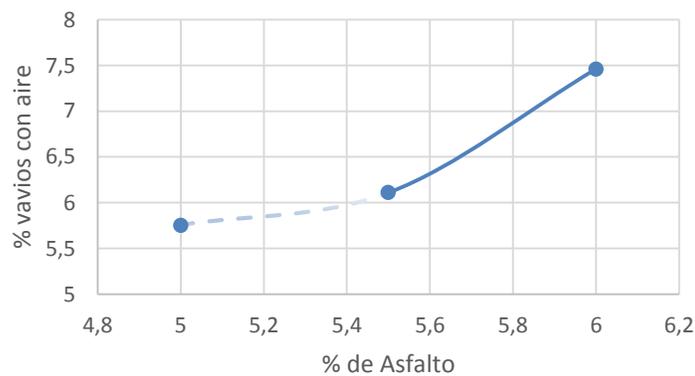


Figura 11. % vacíos con aire vs. % de Asfalto

Fuente: Elaboración propia

5.4.5 Gráficas muestras drenantes

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra la estabilidad en KN.

Tabla 41. Datos % de asfalto modificado y estabilidad en KN

% AFALTO	ESTABILIDAD
5	10,68
5,5	10,20
6	13,10

Fuente: Elaboración propia

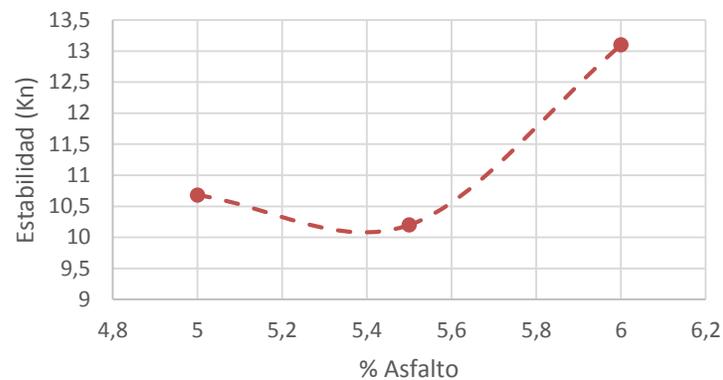


Figura 12. % de Asfalto vs. Estabilidad en KN

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra el flujo en mm.

Tabla 42. Datos % de Asfalto modificado y flujo en mm

% ASFALTO	FLUJO
5	4,2
5,5	6,7
6	4,8

Fuente: Elaboración propia

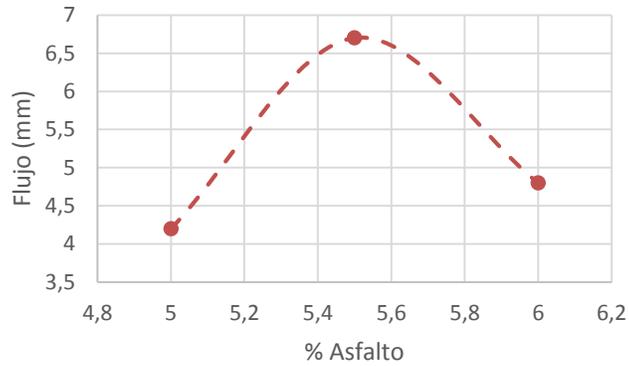


Figura 13. % de Asfalto vs. Flujo en mm

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra la densidad en g/cm^3

Tabla 43. Datos % de Asfalto modificado y Densidad en g/cm^3

% ASFALTO	DENSIDAD (g/cm^3)
5	2,565
5,5	2,433
6	2,564

Fuente: Elaboración propia

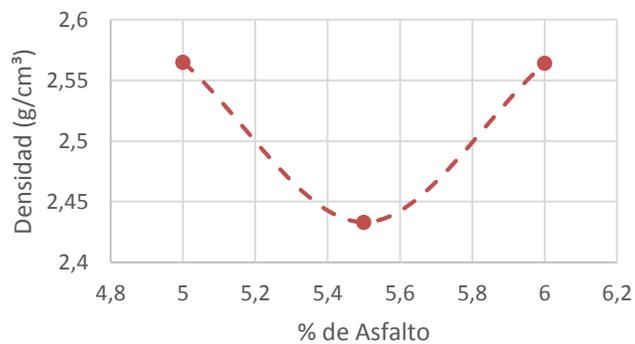


Figura 14. % Asfalto vs. Densidad en g/cm^3

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra GMM gravedad específica máxima.

Tabla 44. Datos % Asfalto modificado y gravedad específica máxima

% ASFALTO	GMM
5	2,0403
5,5	2,0246
6	2,0103

Fuente: Elaboración propia

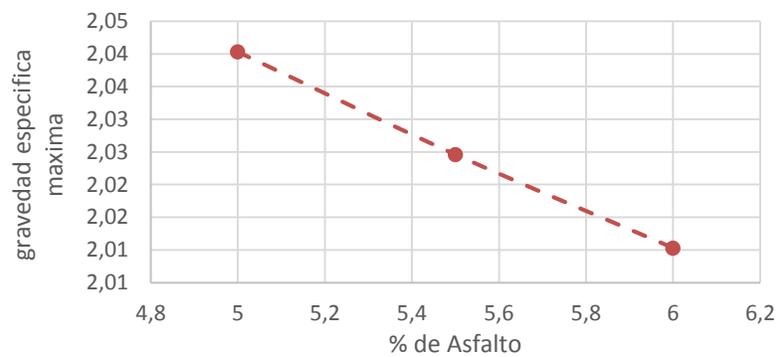


Figura 15. % de Asfalto vs. Gravedad específica máxima

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tendencia de la gráfica del % Asfalto contra GMM gravedad específica máxima.

Tabla 45. Datos % de Asfalto modificado y % de vacíos con aire

% ASFALTO	% VACIOS CON AIRE
5	26,0747
5,5	20,5356
6	27,9024

Fuente: Elaboración propia

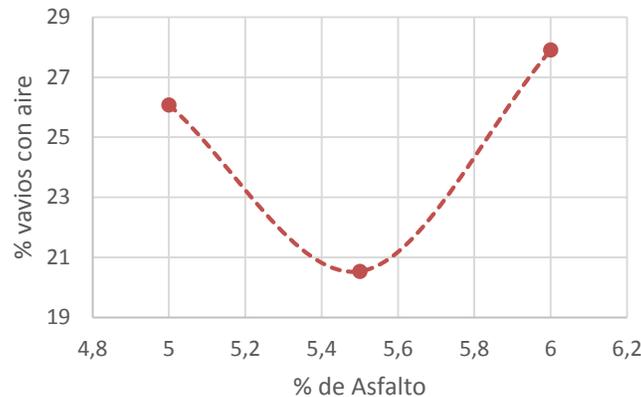


Figura 16. % Asfalto vs. % vacíos con aire

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el artículo 453 de las especificaciones generales de construcción de carreteras 2013 [1], se trabajó con mezclas drenantes con contenido de asfalto mayor o igual a 4.5%, a dichas mezclas se les aplicó el ensayo de Marshall y GMM para evaluar sus propiedades mecánicas y porcentaje de vacíos con aire (el cual debe estar entre 20 y 25%), respectivamente. Como resultado se obtuvo que 5.5% es el porcentaje que cumple con dichas especificaciones

5.5 Comparación del comportamiento mecánico de muestras asfálticas convencionales y muestras asfálticas drenantes

A continuación, se muestra un proceso comparativo que involucra las capacidades mecánicas de cada tipo mezcla, tanto asfáltica como convencional. Para ello se evaluaron y graficaron los respectivos valores de: estabilidad, flujo, gravedad específica máxima y porcentaje de vacíos con aire. Luego de esto se realizó la respectiva comparación entre las dos mezclas tomando como referencia un porcentaje óptimo de 5,5%

5.5.1 Estabilidad

Teniendo en cuenta que la estabilidad es la cantidad de fuerza resistida se muestra la comparación entre una muestra convencional y una drenantes y se encuentra que:

Tabla 46. Datos de estabilidad para cada una de las muestras

ESTABILIDAD (KN)		
%Asfalto	Muestra convencional	Muestra drenante
5	8,69	10,68
5,5	11,43	11,18
6	9,61	13,10

Fuente: Elaboración propia

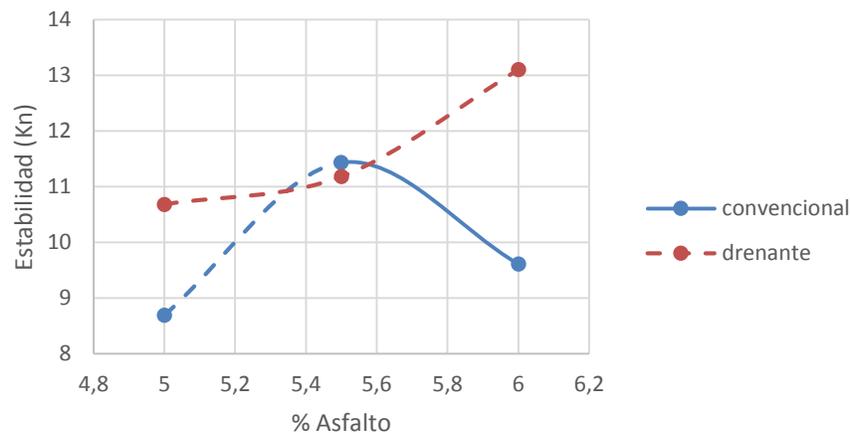


Figura 17. Comparación de estabilidades (KN)

Fuente: Elaboración Propia

La estabilidad es mayor en la muestra convencional con una diferencia entre ellas de aproximadamente 0,25 KN, lo cual indica que la cantidad de fuerza resistida es mayor en la muestra convencional tomando como referencia una muestra drenante.

5.5.2 Flujo

Se sabe que el flujo es la elongación de la muestra fallada, dicho esto, se tienen los siguientes resultados

Tabla 47. Datos de flujo para cada una de las muestras

FLUJO (mm)		
%ASFALTO	MUESTRA CONVENCIONAL	MUESTRA DRENANTE
5	4,6	4,2
5,5	4,8	6,7
6	4,7	4,8

Fuente: Elaboración Propia

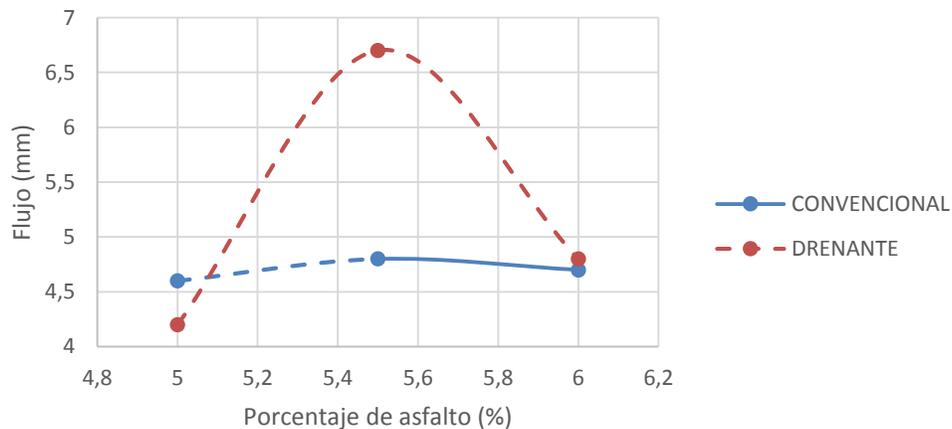


Figura 18. Comparación entre flujos (mm)

Fuente: Elaboración propia

La muestra drenante presenta un flujo mayor respecto a la convencional debido a que la superficie de contacto entre el agregado pétreo es inferior en la drenante, lo que quiere decir que una muestra drenante se deforma con menos carga que la convencional.

5.5.3 GMM (Gravedad Específica Máxima)

Según el artículo 735 de la INV E -13 la gravedad específica máxima es la relación entre una masa dada de material a 25°C y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura

Tabla 48. Datos de GMM para cada una de las muestras

GMM		
%ASFALTO	MUESTRA CONVENCIONAL	MUESTRA DRENANTE
5	2,40	2,04
5,5	2,15	2,02
6	2,12	2,01

Fuente: Elaboración Propia

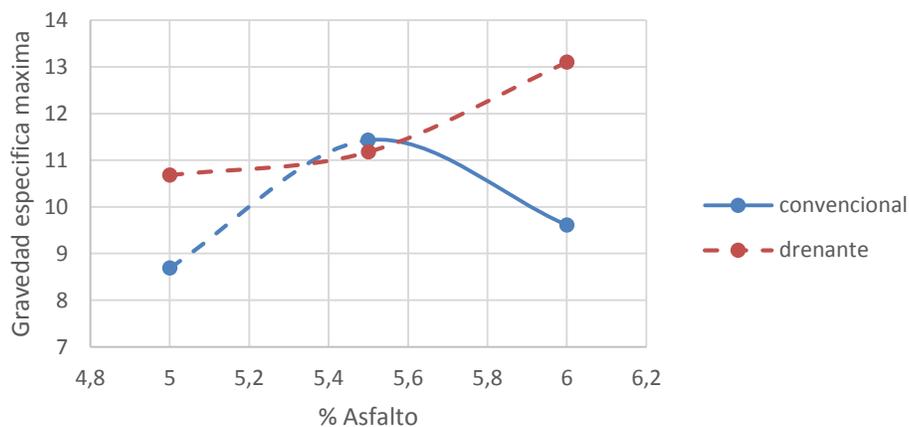


Figura 19. Comparación entre GMM

Fuente: Elaboración Propia

La gravedad específica máxima es mayor en la muestra convencional, esto es debido a que la gravedad específica máxima es directamente proporcional a la masa de la muestra. La convencional, al tener mayor masa, su GMM va a ser superior.

5.5.4 Porcentaje de vacíos con aire

La muestra drenante es en la que el agregado que predomina es el grueso, lo cual, hace que se formen vacíos dentro de la muestra. Se muestra el porcentaje de vacíos de una respecto a la otra.

Tabla 49. Datos de porcentaje de vacíos con aire para cada una de las muestras

PORCENTAJE DE VACÍOS CON AIRE		
%ASFALTO	MUESTRA CONVENCIONAL	MUESTRA DRENANTE
5	5,7546	26,0747
5,5	6,1081	20,5356
6	7,4611	27,9024

Fuente: Elaboración propia

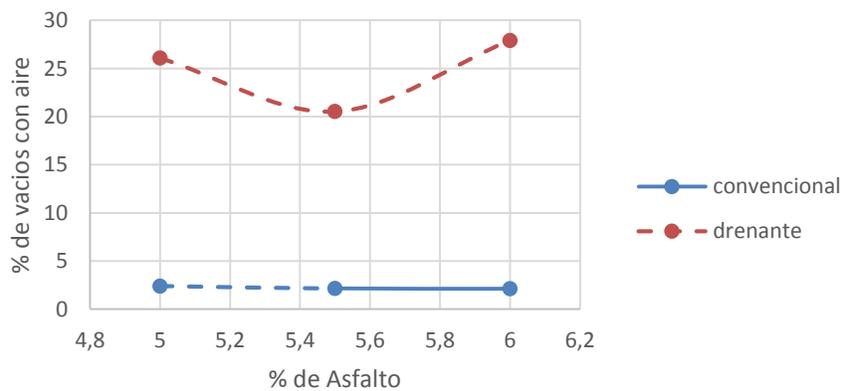


Figura 20. Comparación entre porcentaje de vacíos con aire (%)

Fuente: Elaboración propia

La muestra drenante presentó un porcentaje de vacíos superior al de la muestra convencional, esto se debe a que el alto porcentaje de vacíos debe ser una de las características de una mezcla drenante, producidos por su mayor contenido de agregado grueso.

5.6. Prueba de permeabilidad

Los resultados obtenidos en dicho ensayo demuestran que los tiempos obtenidos y registrados en la siguiente tabla no superan los 15 segundos propuestos por la norma 453 de las especificaciones técnicas para construcción de carreteras para que los cien mililitros de agua atraviesen la muestra drenante.

Tabla 50. *Datos prueba de permeabilidad*

PORCENTAJE	# MUESTRA	CANT. AGUA	TIEMPO DE DRENAJE (s)
5%	1	100 ML	12,38
	2		13,46
	3		15
5,5%	1		15
	2		14,31
	3		13,21
6%	1		14,25
	2		14,75
	3		11,8

Fuente: Elaboración propia

Se muestra que la totalidad de las muestras cumplen a cabalidad con este criterio estando todas por debajo de 15 segundos

5.7 Fase 3

En esta fase se realizaron los ensayos correspondientes a las pérdidas por desgaste en la máquina de los Ángeles, además de esto se tomaron las temperaturas de una muestra drenante y una convencional para compararlas entre ellas.

5.7.1 Pérdidas por desgaste

Se realizó el ensayo del Cántabro a las briquetas para encontrar la pérdida por desgaste. Pesándolas antes y después del ensayo, para así aplicar la fórmula 760.1 del Instituto Nacional de Vías. [1]. Esto arrojó como resultado unas pérdidas por desgaste, en promedio, de 10.98% lo cual está entre los límites impuestos por la norma para mezclas drenantes, en el artículo 453, el cual dice que dichas pérdidas no deben ser superiores al 25%. Se muestran los resultados en la siguiente tabla

Tabla 51. *Resultados ensayo del cántabro*

MUESTRA	PESO EN GRAMOS	PESO LUEGO DEL ENSAYO (gr)	PERDIDAS POR DESGASTE
1	967	824	14,79 %
2	971	864	11,01 %
3	965	892	7,56 %
4	969	902	6,91 %

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el mismo ensayo del Cántabro para muestras que estuvieron sumergidas en agua a 60°C durante 24 horas como lo indica el artículo 453 del INVIAS - 13 para mezclas drenantes,

esto con el fin de comprobar la adhesividad entre el agregado y el ligante, las pérdidas no podrán exceder s a 40%. Los resultados obtenidos se muestran en la tablas 52.

Tabla 52. *Resultados ensayo del cántabro con presencia de agua*

MUESTRA	PESO EN GRAMOS	PESO LUEGO DEL ENSAYO (gr)	PERDIDAS POR DESGASTE
1	1013	122	87,95 %
2	1029	144	86,01 %
3	1003	344	65,70 %
4	972	148	84,77 %

Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas por desgaste en este ensayo superaron el límite del porcentaje que establece la norma (40%), para lo cual se recomienda mejorar la adhesividad mediante un aditivo mejorador de adherencia apropiado. [1]

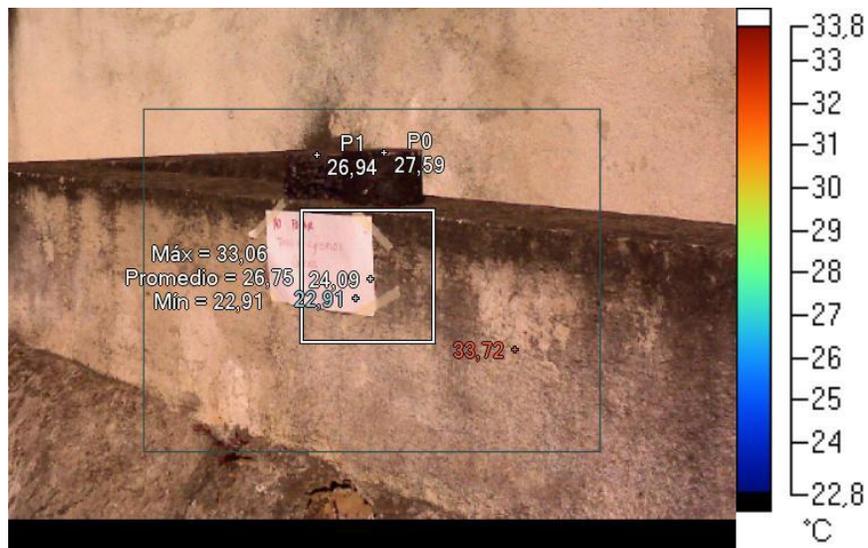
5.7.2 Temperaturas con cámara termográfica

Para realizar dicha prueba se tomó una temperatura inicial de la muestra a las 8:40 de la mañana, luego de ello las muestras fueron expuestas al sol durante aproximadamente 3 horas.



Fotografía 37. Imagen de luz visible a las 8:40 am

Fuente: ing. Manuel Guillermo Quijano



Fotografía 38. Imagen cámara termográfica 8:40 am

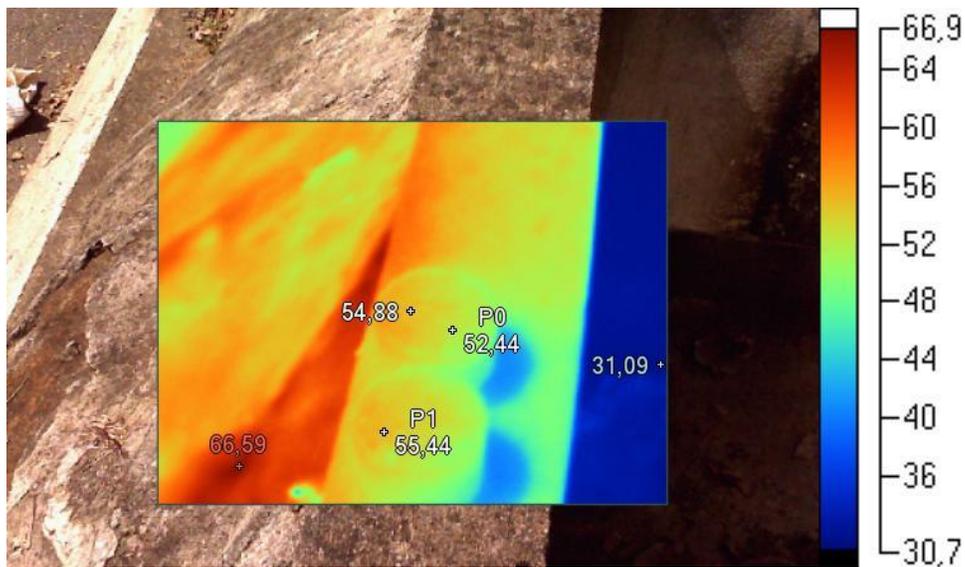
Fuente: ing. Manuel Guillermo Quijano

En las imágenes se puede observar que la muestra drenante que está ubicada en la parte izquierda de la fotografía tiene una temperatura de 26,94°C y la muestra convencional que se ubica en el lado derecho tiene una temperatura de 27,58°C. Imágenes tomadas a las 11:40 am.



Fotografía 39. Imagen de luz visible a las 11:40 am

Fuente: ing. Manuel Guillermo Quijano



Fotografía 40. Imagen cámara termográfica a las 11:40 am

Fuente: ing. Manuel Guillermo Quijano

Se puede apreciar que después de aproximadamente 3 horas de tener las muestras expuestas al sol las temperaturas para la muestra convencional y la drenante son de 55,44°C y 52,44°C respectivamente.

Con lo anterior se puede demostrar que un pavimento que se fabrique usando una mezcla asfáltica drenante emite menos calor que un pavimento convencional.

Tabla 53. *Comparacion de temperaturas*

HORA	T°C Drenante	T°C Convencional
8:40 am	26,94	27,59
11:40 pm	53,66	55,44

6. Resultados de Mezclas Drenantes

En la tabla se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo de grado.

Tabla 54. *Resumen general para las mezclas asfálticas drenantes*

MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES		
Porcentaje de cemento asfáltico modificado tipo 2B		5,50%
CRITERIOS ARTÍCULO 453 INVIAS		
CRITERIO	VALOR OBTENIDO	CUMPLE/NO CUMPLE
Porcentaje de vacíos entre 20% y 25%	20,53%	CUMPLE
Permeabilidad (100 ML en 15 segundos máximo)	14,17 segundos	CUMPLE
Porcentaje de cemento asfáltico mayor que 4,5%	5,5%	CUMPLE
Pérdidas por desgaste (25°C) < 25%	14,94%	CUMPLE
Pérdidas por desgaste (60°C, en presencia del agua) < 40%	81,10%	NO CUMPLE
PROPIEDADES MECANICAS		
Estabilidad (KN)	9,8	-
Flujo (mm)	6,7	-

Fuente: Elaboración propia

7. Conclusiones

Estas mezclas drenantes pueden ser implementadas para la reducción de los accidentes de tránsito producidos por el hidropilado, ya que evitan que se genere una película de agua que disminuye la fricción entre la capa de rodadura y el neumático.

En este trabajo de grado se evaluó y comparó el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas drenantes, realizándoles las respectivas pruebas propuestas por el INVIAS-13.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico en el agregado, para que la mezcla sea considerada drenante, fue el de 5,5%, esto cumpliendo con los siguientes criterios de las Especificaciones Generales de Construcción:

- Se cumple que el porcentaje de vacíos debe estar entre 20% y 25%, obteniendo como resultado un 20,53%.
- En la prueba de permeabilidad no se superan los 15 segundos para drenar 100 ml de agua, en esta se logró un promedio de 14,17 segundos en dicho porcentaje.
- La dosificación del material bituminoso es mayor a 4,5%, siendo 5,5% el porcentaje óptimo.
- Las pérdidas por desgaste a 25°C no superan el 25%, estando un 14,94% por debajo de lo indicado por la norma

- la adhesividad entre el agregado y el ligante que no deben superar el 40%, no se cumple para lo cual las especificaciones recomiendan mejorar la adhesividad mediante un aditivo para mejorar la adherencia.

La cantidad de fuerza resistida en KN, de una muestra convencional, es mayor por 0,25 KN sobre la muestra drenante, esto podría deberse a la densidad mayor presentada en la muestra convencional y la trabazón entre los agregados gruesos y finos.

El flujo en la muestra drenante superó al flujo de la muestra convencional por 1,9 mm, es posible que esto se deba a que la muestra drenante, presente una superficie de contacto menor, al tener más vacíos con aire en los cuales se podría reacomodar el agregado, cambiando la estructura interna de la mezcla y causando su deformación.

La relación masa sobre volumen o GMM es mayor en un 0,113% en la muestra drenante, y el porcentaje de vacíos con aire de una muestra drenante es mayor en un 12,85%, esto debido a las proporciones de la granulometría con la que fueron fabricadas.

Uno de los factores más determinantes para el funcionamiento de un pavimento drenante, es la colmatación la cual no permite el funcionamiento óptimo de la estructura, por esto, este tipo de pavimentos requiere de un mantenimiento periódico para retirar los lodos de las cavidades de la mezcla, lo que hace que el costo de su mantenimiento sea elevado.

Un pavimento drenante, emite menos ruido que uno convencional, ya que los vacíos entre los agregados, que funciona como drenaje, también funciona como disipador del ruido, haciendo que se succione cierta parte por allí.

En el ensayo realizado con la cámara termográfica, se puede comprobar que la muestra drenante emite menos calor respecto a la muestra convencional, debido a que los vacíos permiten que transite aire entre la estructura y hace que se caliente menos.

Constructivamente hablando, los pavimentos drenantes requieren menos agregado y menos energía de compactación, porque estas mezclas no son vibradas.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico que debe tener una mezcla para que su estabilidad y flujo sean eficientes es del 6% y un rango entre 5,3% y 5,8%, respectivamente teniendo en cuenta los resultados obtenidos al comparar las muestras.

Referencias Bibliográficas

- [1] INVIAS, Especificaciones Generales de Construcción de carreteras, Bogotá, 2013.
- [2] A. M. Fonseca, Ingeniería de Pavimentos, Bogotá: Stella Valbuena García, 2006.
- [3] C. P. L. Moreno, *Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas drenantes*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [4] «SURA,» 09 02 2015. [En línea]. Available: <https://www.sura.com/blogs/autos/lluvia-accidentes-transito.aspx>.
- [5] A. T. Lopez, «pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano,» Bogotá, Colombia, 2013.
- [6] A. c. argentino, «Apuntes de seguridad,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.aca.org.ar/servicios/transito/eduvial/seguridad/hidroplaneo.htm>.
- [7] H. A. R. Q. - F. A. R. Lizcano, pavimentos materiales, construcción y diseño, Bogotá, 2015.
- [8] H. A. R. Quintana, pavimentos materiales, construcción y diseño, Bogotá, 2015.
- [9] I. L. R. Castro, «Mezclas drenantes,» San Pedro de Montes Oca, 2005.
- [10] I. A. I. A. DR. ING. HUGO DANIEL BIANCHETTO, «Formulación de mezclas drenantes con alto porcentaje de vacíos,» Argentina.
- [11] W. Honchang, Zhou, I. Ming y S. Kunitomo.
- [12] R. M. Recasens, «Pavimentos de baja sonoridad,» Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña.
- [13] I. H. D. Bianchetto, «Disminución del ruido mediante el uso de pavimentos porosos,» La Plata, Argentina, 1996.