

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA  
MODIFICADA CON DESECHOS DE NYLON Y CENIZA VOLANTES



JUAN CAMILO CASTILLO ROJAS



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2021

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA  
MODIFICADA CON DESECHOS DE NYLON Y CENIZA VOLANTES

JUAN CAMILO CASTILLO ROJAS

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

Aprobado por:  
I.C. JESSICA MARÍA RAMÍREZ CUELLO,  
M.Sc. Director

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2021

**Autoridades Académicas**

**P. JOSE GABRIEL MEZA ANGULO, O.P.**

Rector General

**P. EDUARDO GONZÁLEZ, O.P.**

Vicerrector Académico General

**P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.**

Rector Sede Villavicencio

**P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**ESP. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**ING. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN**

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

### **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco enormemente a mis padres y hermanos por todo el apoyo que me brindaron en este proceso de formación profesional, a mi directora de grado la ingeniera Jessica Ramírez Cuello que me brindo su conocimiento, tiempo, experiencia y confianza para poder realizar esta investigación.

A la universidad Santo Tomás sede Villavicencio, a la facultad de Ingeniería Civil y su planta docente por brindarme las herramientas y conocimientos necesarios para mi formación como ingeniero civil.

A mis compañeros, amigos y todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron parte de mi proceso académico.

A todos ellos, mis más sinceros agradecimientos.

## Contenido

	Pág.
1. Resumen .....	10
2. Abstract.....	11
3. Introducción .....	12
4. Formulación del Problema.....	13
5. Objetivos .....	15
5.1 Objetivo general: .....	15
5.2 Objetivos específicos: .....	15
6. Justificación.....	16
7. Estado del arte .....	17
8. Marco Teórico .....	20
8.1 Mezcla asfáltica .....	20
8.2 Clasificación de mezclas asfálticas .....	20
8.2.1 Por la temperatura de puesta en obra: .....	20
8.2.2 Por el porcentaje de vacíos en la mezcla:.....	20
8.2.3 Por su granulometría: .....	21
8.3 Mezclas asfálticas modificadas.....	21
8.4 Metodología Marshall .....	21
8.5 Metodología de diseño Shell .....	22
8.5.1 Parámetros de diseño .....	22
8.6 Cenizas volantes .....	23
8.7 Fibras sintéticas .....	23
9. Marco normativo .....	24
10. Metodología .....	25
10.1 Preliminares .....	26
10.2 Etapa I.....	29
10.2.1 Identificación de proveedores y obtención de los materiales .....	29
10.2.2 Caracterización de los materiales obtenidos.....	31
10.3 Etapa II .....	37
10.3.1 Modificación de la mezcla asfáltica .....	37

10.4 Etapa III.....	38
10.4.1 Obtención del contenido óptimo de asfalto.....	38
10.5 Etapa IV .....	39
10.5.1 Resultados .....	39
10.5.2 Ventajas y desventajas.....	44
11. Conclusiones.....	46
12. Recomendaciones .....	48
13. Referencias bibliográficas.....	49
14. Anexos.....	52

**Lista de Tablas**

	Pág.
Tabla 9.1 Marco normativo .....	24
Tabla 10.1 Desarrollo metodológico .....	25
Tabla 10.2 Revisión bibliográfica .....	26
Tabla 10.3 Cuadro comparativo de las investigaciones que usaron ceniza volante como modificante para la mezcla asfáltica .....	28
Tabla 10.4 Cuadro comparativo de los resultados obtenidos en la investigación revisada sobre el uso de nylon como modificante en mezclas asfálticas .....	28
Tabla 10.5 Distribución de material granular para cada porcentaje de asfalto .....	35
Tabla 10.6 Distribución de agregados según cada caso de modificación .....	37
Tabla 10.7 Determinación del contenido óptimo de asfalto .....	38
Tabla 10.8 Caracterización del asfalto .....	39
Tabla 10.9 Datos de las briquetas de control .....	41
Tabla 10.10 Resumen de las propiedades obtenidas de las briquetas modificadas .....	42
Tabla 10.11 Datos iniciales para el diseño .....	43
Tabla 10.12 Diseño metodología Shell .....	43
Tabla 10.13 Distribución de la estructura del pavimento .....	43
Tabla 10.14 Comparación Mezcla convencional Vs Mezcla modificada .....	44

**Lista de Figuras**

	Pág.
Figura 10.1 Metodología de investigación .....	25
Figura 10.2 Recolección de material pétreo .....	29
Figura 10.3 Tanques de asfalto empresa ECOBRAS S.A .....	30
Figura 10.4 Nylon usado para la modificación de la mezcla .....	30
Figura 10.5 Granulometría de los agregados .....	31
Figura 10.6 Ensayo de penetración de material bituminoso .....	32
Figura 10.7 Ensayo de densidad del material bituminoso .....	33
Figura 10.8 Ensayo Punto de inflamación y combustión .....	33
Figura 10.9 Ensayo de punto de ablandamiento (método anillo y bola) .....	34
Figura 10.10 Viscosidad del asfalto mediante el viscosímetro rotacional .....	35
Figura 10.11 Ensayo Marshall para determinar contenido óptimo de asfalto .....	36
Figura 10.12 Ensayo para determinar la gravedad específica de Bulk .....	37
Figura 10.13 Marshall para mezcla asfáltica modificada .....	38
Figura 10.14 Curva granulométrica para agregado grueso .....	39
Figura 10.15 Curva granulométrica para agregado fino .....	39
Figura 10.16 Granulometría de la ceniza volante .....	40
Figura 10.17 Estabilidad vs Flujo del espécimen N° 2 de control .....	41
Figura 10.18 Estabilidad vs flujo del espécimen 2 con 30% ceniza volante .....	41
Figura 10.19 Estabilidad vs flujo del espécimen 3 con 0,15% nylon .....	41
Figura 10.20 Estabilidad vs flujo del espécimen 3 con ceniza volante + nylon .....	42
Figura 10.21 Estructura del pavimento .....	44

**Lista de Anexos**

	Pág.
<b>Anexo 1</b> CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	52
<b>Anexo 2</b> ENSAYO MARSHALL .....	52
<b>Anexo 3</b> METODOLOGÍA SHELL .....	52

## **1. Resumen**

El propósito de esta investigación, es evaluar el aprovechamiento de residuos de ceniza volante y nylon al utilizarlos en mezclas asfálticas, con el objetivo de mejorar las propiedades y el comportamiento de la misma y a su vez contribuir al medio ambiente. Por esto, se plantea la revisión bibliográfica, recolección y caracterización de los materiales, diseño de mezcla y modificación de mezcla asfáltica por vía seca.

Para la caracterización de los materiales se realizaron ensayos de granulometría para los agregados gruesos y finos, desgaste por máquina de los ángeles, penetración del asfalto, punto de inflamación y combustión, entre otros. Por medio del ensayo Marshall se determinó el contenido óptimo del asfalto con el cual se elaboraron las briquetas de control y se tomó como base para la modificación de la mezcla con 0,15% de nylon, 30% de ceniza volante y la combinación de ambos materiales modificantes, dando como resultado que la modificación con ceniza volante mejora la estabilidad de la mezcla y disminuye el porcentaje de vacíos. En cuanto al nylon, por el tamaño de las fibras utilizadas se generaron datos desfavorables.

**Palabras Clave:** Ceniza volante, Fibras sintética, Marshall, MDC-19, Mezcla Asfáltica, Nylon.

## **2. Abstract**

The purpose of this research is to evaluate the use of fly ash and nylon waste when used in asphalt mixtures, with the objective of improving the properties and behavior of the mixture and at the same time contribute to the environment. For this reason, a bibliographic review, collection and characterization of the materials, mix design and modification of the asphalt mix by dry method are proposed.

For the characterization of the materials, granulometry tests were carried out for coarse and fine aggregates, machine wear of the angels, asphalt penetration, flash point and combustion, among others. Through the Marshall test, the optimum content of the asphalt with which the control briquettes were made was determined and it was taken as a basis for the modification of the mixture with 0.15% nylon, 30% ash and the combination of both materials. modifiers, as a result of which the modification with ash improves the stability of the mixture and decreases the percentage of voids. Regarding nylon, unfavorable data were generated due to the size of the fibers used.

**Key Word:** Fly ash, Synthetic fibers, Marshall, MDC-19, Asphalt mix, Nylon.

### **3. Introducción**

A nivel nacional, el diseño, implementación y construcción de pavimentos flexibles es la alternativa más económica de pavimentación, sin embargo, estas obras han sufrido inconvenientes y fallas que han generado una disminución considerable en su efectividad y durabilidad, obligando a realizar más mantenimientos, lo que restringe su uso y genera incomodidad en los usuarios que las transitan estas vías (Reyes Ortiz et al., 2006)

Por esto, el comportamiento que experimentan las mezclas asfálticas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente, se ha intentado modificar a lo largo del tiempo, con la adición de polímeros u otros materiales. Generalmente, las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez y la resistencia bajo carga monotónica, el ahuellamiento, la fatiga y el envejecimiento, así como disminuir la susceptibilidad térmica y aumentar la vida útil del pavimento o espesores más delgados de capas asfálticas de lo que normalmente se requiere. (Rondón & Reyes, 2015)

La producción de ceniza volantes a nivel nacional e internacional provenientes principalmente de las termoeléctricas, en su mayoría terminan enterradas en vertederos generando graves afectaciones a los acuíferos subterráneos y al medio ambiente, así mismo, las fibras sintéticas como el nylon que son altamente resistentes a la degradación del entorno y actualmente es catalogado como desecho no reciclable por lo que va a dar directamente a los rellenos sanitarios. Por esto, las cenizas volantes se han implementado en diversas obras de ingeniería civil, principalmente como adición al concreto y estabilización de capas granulares, pero no se ha profundizado su aplicación en mezclas asfálticas (Reyes Ortiz et al., 2006).

Por lo dicho, esta investigación está encaminada a evaluar cómo se comporta una mezcla asfáltica al adicionarle fibras sintéticas de nylon y cenizas volantes, así mismo, establecer ventajas y desventajas sobre el uso de estos residuos, que poco a poco se han convirtiendo en un problema ambiental.

#### **4. Formulación del Problema**

De acuerdo con el último reporte del Ministerio de Transporte en Colombia de los 205.379 km de carreteras, el 9% (17.958 km) corresponde a la red vial primaria, 22% (45.137 km) a la red vial secundaria y el 69% (142.284 km) restante corresponde a la red de vías terciarias (Mintransporte, 2019). De los 17.958 km de red primaria el 64% (11.576 km) se encuentra a cargo del Instituto Nacional de Vías – INVIAS y el 36% (6.382 km) restante se encuentra a cargo de la Agencia de Infraestructura – ANI, de los 11.576 km de carreteras a cargo del INVIAS aproximadamente el 80% (9.334 km) se encuentra pavimentada y de este porcentaje alrededor del 30% (2.808 km) se encuentra en estado regular y un 18% (1.666 km) se encuentra en pésimo estado (INVIAS, 2020). Este 48% (4.480 km) podría ser reemplazado o mejorado con la mezcla modificada con desechos de nylon y ceniza volante.

Durante años se han utilizado los pavimentos flexibles como preferencia ya que estos permiten una fácil instalación y mantenimiento, tales como fresado, parcheo y bacheo, sello de fisuras, entre otros, soportando grandes deformaciones y su relación precio-calidad es aceptable, pero también presenta varias problemáticas principalmente relacionadas con la carpeta de rodadura, las mezclas asfálticas tradicionales que son utilizadas para su construcción, factores climáticos, el constante aumento del tránsito y problemas con el suelo o la capacidad portante.

De acuerdo con Silvia Gómez directora de la ONG ambientalista Greenpeace, en Colombia se generan alrededor de 12 millones de toneladas de residuos plásticos al año de los cuales solo se recicla el 17% (Elperiodico, 2018), el resto de residuos son llevados directamente al relleno sanitario o terminan en ríos, lagos o mares acumulándose, generando una grave afectación a los ecosistemas y al medio ambiente, como es el caso de los desechos de nylon.

Otro residuo importante y que genera una problemática en los sitios donde se deposita por la gran cantidad que se produce y los componentes químicos que posee, son las cenizas volantes que a nivel nacional e internacional generan afectaciones al medio ambiente principalmente relacionadas con los acuíferos subterráneos (JOEL K. BOURNE, 2019), por lo cual se ha estudiado las diversas bondades que esta puede aportar como aditivo en diferentes materiales de la construcción, de acuerdo a (Chávez & Guerra, 2015) “pueden ser utilizadas en fabricación del cemento portland, aditivos para concreto, aditivos asfálticos, rellenos y nivelaciones de terrenos, fabricación de ladrillos, bloques, tabiques, estabilizantes de residuos industriales, agregados para fertilizantes, entre otros usos, permitiendo beneficios técnicos, económicos y ambientales” (p.16).

14 Por lo anterior, durante los últimos años se han realizado investigaciones para mejorar las propiedades físicas de las mezclas asfálticas con la ayuda de nuevas tecnologías que permitan una mayor duración y resistencia y que contribuyan al medio ambiente sin elevar su costo.

**Pregunta orientadora**

¿Podrían mejorarse las características físicas y el comportamiento de una mezcla asfáltica modificándola con desechos de Nylon y ceniza volante, de tal forma que pueda reemplazar la mezcla asfáltica tradicional cumpliendo con la normativa INVIAS?

## **5. Objetivos**

### **5.1 Objetivo general:**

Evaluar el comportamiento físico-mecánico de una mezcla asfáltica modificada por vía seca con desechos de nylon y cenizas volantes.

### **5.2 Objetivos específicos:**

- Verificar los criterios de diseño de una mezcla asfáltica modificada con desechos de nylon y cenizas volantes por medio del ensayo MARSHALL (contenido óptimo de asfalto)
- Comparar los resultados obtenidos en el diseño de la mezcla asfáltica modificada con desechos de nylon y cenizas volantes por la metodología MARSHALL con los de una convencional.
- Definir ventajas y desventajas en la modificación de mezclas asfálticas con nylon y ceniza volante

## **6. Justificación**

Las fibras sintéticas como el nylon son un gran problema para el medio ambiente debido a que no son biodegradables y el 90% de estas fibras termina en los rellenos sanitarios o en ríos y mares del mundo (Fundación CONAMA, 2018). Por otro lado, en Colombia la mayor parte de las vías o carreteras se encuentran en pésimas condiciones, deterioradas por algunos factores como el aumento del tráfico, baja resistencia por factores climáticos y ambientales, entre otros.

Las vías son una parte fundamental en la infraestructura de un país ya que estas ayudan a su desarrollo, es por esto que en los últimos años se han realizado investigaciones sobre la modificación de mezclas asfálticas con diferentes tipos de modificante, en especial con desechos que representan un problema ambiental como los plásticos, fibras sintéticas y residuos industriales. Estas investigaciones se realizan con el fin de mejorar las propiedades físico – mecánicas de las mezclas asfálticas y darles un segundo uso a estos desechos ayudando a disminuir la huella ambiental generada por el ser humano.

Con el uso de fibras sintéticas como modificante se ha demostrado que mejora la resistencia y el módulo dinámico de la muestra, esta propiedad define las características de la respuesta a la deformación de la mezcla y las cenizas volantes como modificante han mostrado una mejora en el flujo, la estabilidad y disminución de los porcentajes de vacíos de la mezcla además que se obtiene una mayor resistencia a la carga de tránsito y una menor deformación en la carpeta asfáltica del pavimento (Lecca & Gerardo, 2019). Sin embargo, en el caso de las cenizas volantes son muy pocas las investigaciones realizadas y para el caso de las fibras sintéticas como modificante, la mayoría de investigaciones son modificaciones por vía húmeda, por vía seca son muy pocas las investigaciones con este modificante, por lo que el propósito de esta investigación es estudiar el comportamiento físico mecánico de una mezcla asfáltica modificada con desechos de nylon y ceniza volante por vía seca y a su vez generar nueva información que pueda ser útil para futuras investigaciones con mezclas asfálticas modificadas.

## **7. Estado del arte**

Desde la aparición a nivel mundial del asfalto caucho y sus propiedades mejoradas en comparación con las mezclas asfálticas convencionales, muchos países empezaron a implementar y a realizar investigaciones para conocer más sobre el tema y Colombia no fue la excepción. Con la implementación y construcción de algunas vías del país con este material, comenzaron a aumentar el número de investigaciones respecto a las mezclas asfálticas modificadas y sobre posibles nuevos modificantes, además de pruebas para comparar su rendimiento y características tomando como base las mezclas convencionales.

En la Universidad Pontificia Bolivariana durante el 2013 se realizó una investigación usando ceniza volante como modificante para la mezcla asfáltica, se realizaron 72 briquetas con diferentes porcentajes de asfalto y ceniza v. Se logró determinar que reemplazando un 30% del filler con ceniza se obtiene una mezcla más económica y se mejora en un 47.7% la estabilidad con respecto a los requisitos mínimos del INVIAS para una mezcla MDC-2 (Aguilar & Ayala, 2013).

En 2014 en la Universidad Católica de Colombia se realizó una investigación sobre el uso de desperdicios plásticos como modificante para mezclas asfálticas, buscando solucionar algunos problemas de la malla vial de la ciudad de Bogotá y a su vez aportando una solución a la problemática de los residuos plásticos.

Utilizaron trozos de bolsas plásticas como materia prima y por medio del ensayo Marshall con 15 probetas y variando el porcentaje de asfalto que se iba a introducir con respecto al peso de la briqueta obtuvieron un porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla de 6,73%. Una vez determinado esto procedieron a adicionar el modificante pastico en porcentajes de 0,1 hasta 0,5, y determinaron que para un porcentaje asfaltico del 6.73% y 0,4% de plástico las propiedades de la mezcla mejoran significativamente, para porcentajes inferiores de plásticos la estabilidad de la mezcla se reduce incluso más que en las mezclas convencionales. (Forigua & Pedraza, 2014)

Durante el 2015 en Ecuador se publicó un artículo acerca del uso de Caucho y Tereftalato de Polietileno (PET) como modificadores para el diseño de una mezcla asfáltica, determinaron que el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla según los ensayos realizados y las normativas de ecuador NEVI-12 era del 6,7% y usaron un porcentaje de 7,5% de elastómero (Caucho), la mezcla mostro una mejora en la estabiliza comparada con la mezcla tradicional. Para la mezcla con caucho y PET se recomienda usar solo en vías de tráfico liviano para aprovechar mejor sus propiedades. (Revelo et al., 2014)

En la Universidad de los Andes en el 2016 se realizó una investigación sobre el uso de fibras sintéticas como modificante para una mezcla asfáltica, con un porcentaje de asfalto de 6,38% se

realizaron 21 probetas, 3 de control, 9 con nylon como modificante y 9 con fibra de polipropileno, para las probetas con la mezcla modificada se utilizaron porcentajes de fibra del 0.05%, 0.1% y 0,15%. Ambos materiales aumentan el módulo dinámico de la mezcla, pero la fibra de nylon genera una mayor resistencia a la deformación que la fibra de polipropileno, además se observa que las mezclas modificadas con fibras de nylon presentan un mejor desempeño ante la degradación por fatiga. (Vanegas Miranda, 2016)

La Universidad Piloto de Colombia, en 2017 publico un documento en donde se realiza una recopilación de información en las diferentes universidades de Bogotá sobre los diferentes materiales o productos que han sido utilizados para modificar mezclas asfálticas. En este se identifica que universidades han aportado más al tema, con que materiales se ha trabajado y que ventajas y/o desventajas tiene dicho modificador.(Mejía & Sierra, 2017)

Las Universidades con más productos investigativos son 3 y cada una tiene 6 proyectos, Universidad de Los Andes, Universidad Católica de Colombia y la Universidad Militar Nueva Granada, a estas le siguen la Piloto y la Javeriana con 4 productos investigativos. Dentro de estas investigaciones los materiales más utilizados como modificador son: polímeros, caucho, RAP, aceites, polipropileno y asfaltita. Estas mezclas asfálticas modificadas deben cumplir con ciertos criterios o requisitos mínimos exigidos por el Instituto nacional de Vías (INVIAS).

En el caso del uso de caucho como modificador, ofrece un mejoramiento en la flexibilidad de la mezcla, de la resistencia y reduce el agrietamiento por fatiga, además de la reducción del impacto ambiental generado por los neumáticos o llantas. Para el caso del polietileno, dentro de sus ventajas encontramos el mejoramiento de la rigidez, una mayor resistencia a la deformación y disminución del ahuellamiento en la carpeta de rodadura. Con el polietileno de baja densidad (PEBD) además de disminuir el impacto ambiental, también mejora las condiciones y el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica.

Con el análisis y procesamiento de la información recolectada logran concluir que el material con mejor comportamiento y cumpliendo con las especificaciones técnicas de la normativa del INVIAS es el polietileno y polipropileno, según los resultados el uso de polipropileno aporta una mayor capacidad de carga monotónica y mejora el comportamiento con respecto al ahuellamiento, sin embargo, recomiendan seguir realizando pruebas para poder analizar mejor. (Mejía & Sierra, 2017)

Durante el 2020 en la Universidad Católica de Colombia se realizó una investigación sobre el uso de ceniza producto de la molienda de cascarilla de arroz en donde se realizaron ensayos de tracción, de flujo, estabilidad por método Marshall y la caracterización de la mezcla. Con dicha *Desechos de Nylon y Cenizas Volantes* 19 investigación concluyeron que el uso de ceniza como

modificante de la mezcla asfáltica mejora el flujo, la estabilidad y disminuye los porcentajes de vacíos. (Lizcano et al., 2020)

## **8. Marco Teórico**

### **8.1 Mezcla asfáltica**

El asfalto o cemento asfáltico es un producto proveniente de la destilación del petróleo crudo y se usa para conformar mezclas asfálticas proporcionándole resistencia mecánica a las cargas, impermeabilidad y durabilidad. Las propiedades más importantes del asfalto que son tenidas en cuenta en la construcción y mantenimiento de carreteras son la adhesión, cohesión, susceptibilidad a las temperaturas y la durabilidad, estas propiedades dependen de la fuente de donde se obtenga el material bituminoso.

Las mezclas asfálticas o aglomerados están formadas por una combinación de agregados y ligante asfáltico en proporciones exactas, dependiendo de la proporción de estos materiales pueden variar las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente su rendimiento. Estas mezclas deben ser resistentes a las acciones del clima y el tránsito. (Cepeda, 2015)

### **8.2 Clasificación de mezclas asfálticas**

#### ***8.2.1 Por la temperatura de puesta en obra***

- Mezclas asfálticas en caliente: Su proceso de elaboración suele ser a temperaturas de 150 °c y se deben calentar también los agregados para que el asfalto no pierda temperatura al entrar en contacto con estos. La puesta en obra también se realiza a temperaturas altas.
- Mezcla asfáltica en frío: Suelen ser emulsiones asfálticas y su puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- 

#### ***8.2.2 Por el porcentaje de vacíos en la mezcla***

- Mezclas cerradas o densas: Su porcentaje de vacíos es máximo de 6%.
- Mezclas semicerradas o semidensas: El porcentaje de vacíos esta entre 6% y 10%.
- Mezclas abiertas: El porcentaje de vacíos es mayor al 12%.
- Mezclas porosas o drenantes: El porcentaje de vacíos es mayor al 20%.

### **8.2.3 Por su granulometría**

- Mezclas discontinuas: Contienen una cantidad limitada de tamaños de agregados pétreos en su composición.
- Mezclas continuas: Contienen una cantidad muy bien distribuida de agregados pétreos en su composición.

### **8.3 Mezclas asfálticas modificadas**

En la actualidad con el aumento constante del tránsito y el cambio climático se busca mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas incorporando materiales que ayuden a aumentar su resistencia y durabilidad, este procedimiento se conoce como modificación y se puede realizar por dos métodos (vía seca y húmeda).

- Modificación por vía seca: Consiste en mezclar directamente el material modificante con los agregados pétreos, antes de incorporar el ligante asfáltico y se considera al material modificante como parte de los agregados o se puede reemplazar parte de los agregados por este modificador.
- Modificación por vía Húmeda: Consiste en mezclar a altas temperaturas el asfalto con el material modificante, este tipo de modificación es más costosa ya que requiere equipos especializados.

### **8.4 Metodología Marshall**

Este método de diseño para mezclas asfálticas fue formulado por Bruce Marshall, la finalidad de esta metodología es establecer la combinación más óptima de agregados pétreos y material bituminoso de manera que se garantice que la mezcla asfáltica pueda soportar las cargas del tránsito y los efectos climáticos, también es utilizado para determinar el contenido óptimo de material bituminoso.

Además, determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas en caliente, con ayuda del aparato Marshall. El valor de la estabilidad está relacionado con la resistencia estructural de la mezcla compactada y puede verse afectada por el contenido de asfalto. el valor del flujo indica la resistencia de la mezcla a la deformación por la acción de las cargas del tránsito. (Lara Pérez, 2016)

## 8.5 Metodología de diseño Shell

Es un método analítico racional de diseño de pavimentos flexibles mediante el uso de cartas de diseño, fue desarrollado en 1963 y modificado en 1978. Considera la estructura del pavimento como un sistema de tres capas (carpeta asfáltica, capas granulares y subrasante) que trabajan de forma elástico lineal, en el que los materiales están caracterizados por su módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

Mediante el uso de estas cartas de diseño se puede el código de la mezcla asfáltica que depende de los parámetros S, F y P que se describen a continuación:

- **S:** Modulo dinámico stiffness (S1 y S2)
- **F:** Resistencia a la fatiga (F1 y F2)
- **P:** Penetración del asfalto en milímetros (50 o 100)

Por combinación de estas condiciones mencionadas se obtienen 8 códigos diferentes para la mezcla asfáltica, S1-F1-50, S1-F1-100, S1-F2-50, S2-F2-50, etc.

### 8.5.1 Parámetros de diseño

**8.5.1.1 Tránsito.** El método está diseñado para ejes de 8.2 toneladas, es el número acumulado de ejes equivalentes a 8.2 toneladas que pasan sobre la carpeta asfáltica, este valor de N8.2 se calcula mediante un censo de cargas.

**8.5.1.2 Temperatura.** Este parámetro fue incorporado en la modificación del método en el año 1978, ya que es importante considerar los cambios que sufre el pavimento debido a los cambios térmicos. Mediante el uso de factores de ponderación se estima la temperatura media anual ponderada del aire w-MAAT con la ayuda de las cartas de diseño.

**8.5.1.3 Módulo resiliente.** Este valor MR depende del contenido de humedad y de las tensiones a las que está sometido el material de la subrasante, se determina mediante ensayos de laboratorio de tipo triaxial o se puede determinar mediante una correlación empírica a través del CBR.

**8.5.1.4 Material asfáltico.** Se consideran dos propiedades fundamentales: el módulo de elasticidad **Stiffness** y la resistencia de la mezcla a la fatiga.

## **8.6 Cenizas volantes**

Las cenizas volantes son partículas muy finas que provienen de la combustión de materiales como el carbón mineral, la madera o la incineración de sólidos y sus características físico químicas varían de acuerdo a su procedencia, pero por lo general estas cenizas mayormente están compuestas por óxidos de aluminio, hierro y silicio.

La mayoría de las cenizas volantes utilizadas como aditivo en la construcción, provienen de las centrales termoeléctricas. En este proceso el carbón es triturado para posteriormente ser mezclado con aire caliente, provocando que la parte orgánica del carbón se incinere y la parte inorgánica se precipite y quede como subproducto de este proceso. Como resultado de la combustión muchas partículas quedan suspendidas en los tubos de gas y posteriormente son recolectados con la ayuda de precipitadores electrostáticos. (Orozco & Murillo, 2011)

## **8.7 Fibras sintéticas**

De acuerdo con (Camargo & Suarez, 2010) “Las fibras son estructuras unidimensionales, largas y delgadas con el propósito principal de creación de tejidos; tienen gran cohesión molecular, lo que las hace ser más fuertes que los plásticos” (p. 38).

Estas fibras sintéticas son elaboradas mediante un proceso de polimerización, en donde los polímeros forman una larga cadena lineal que posee condiciones extraordinarias de elasticidad, ligereza y resistencia.

## 9. Marco normativo

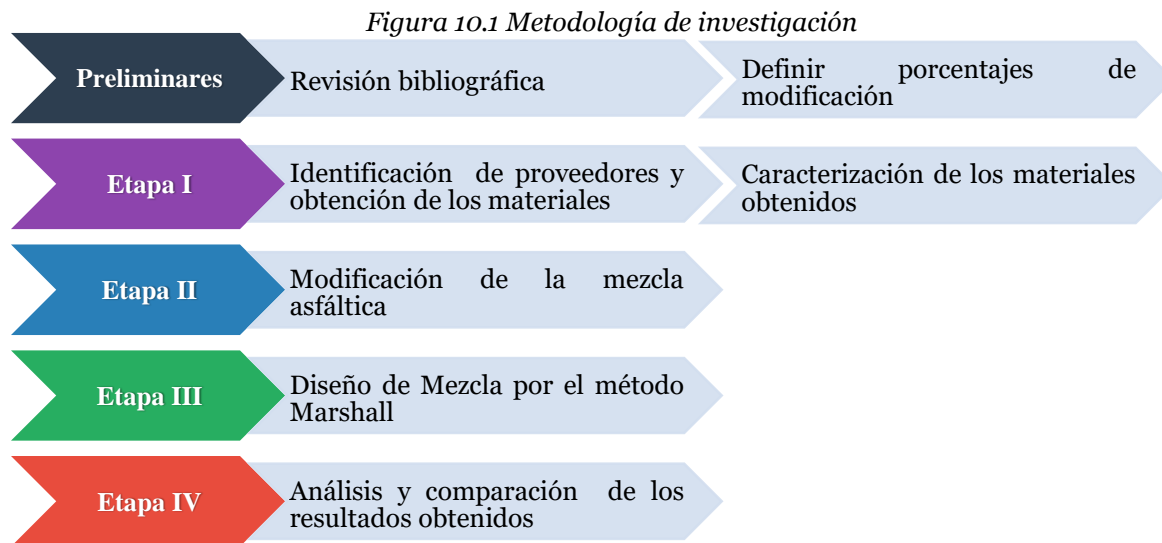
La presente investigación se trabajó bajo la normativa vigente establecida por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) a través del documento técnico “ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y NORMAS DE ENSAYO DE MATERIALES PARA CARRETERAS” en el cual se estipulan las especificaciones para mezclas asfálticas en caliente y sus criterios de diseño, Además de estandarizar los procedimientos de muestreo y ensayo de los materiales usados para la construcción de carreteras. En la Tabla 9.1 se presentan más específicamente las normas usadas para la realización del presente proyecto.

Tabla 9.1 Marco normativo

Norma	Nombre
	Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino
I.N.V. E - 213	Resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los ángeles.
I.N.V. E - 218	Penetración de los materiales bituminosos.
I.N.V. E - 706	Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro).
ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y NORMAS DE ENSAYO DE MATERIALES PARA CARRETERAS	I.N.V. E - 707
	Puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland.
	I.N.V. E - 709
	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola).
<b>INVIAS 2013</b>	I.N.V. E - 712
	Gravedad específica de bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.
	I.N.V. E - 733
	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.
	I.N.V. E - 748

### 10. Metodología

Este proyecto de investigación cuenta con un enfoque mixto. Para dar continuidad a esta investigación se establecieron las etapas necesarias para dar cumplimiento a los objetivos, las cuales se pueden evidenciar a continuación en la Figura 10.1 y en la Tabla 10.1 se presenta la relación entre las etapas y los objetivos propuestos.



**Nota:** Descripción de las etapas para la realización de la investigación.

*Tabla 10.1 Desarrollo metodológico*

Objetivo	Actividad	Descripción
Verificar los criterios de diseño de una mezcla asfáltica modificada por medio del ensayo MARSHALL	Etapa II y III	Verificar el cumplimiento de ambas mezclas en los parámetros de fluidez, estabilidad, densidad y vacíos.
Comparar los resultados obtenidos en los ensayos de la mezcla asfáltica modificada con los resultados de una convencional.	Etapa IV	Se realiza la modificación de la mezcla asfáltica por vía seca y el ensayo I.N.V E-748 para ambas mezclas tanto la modificada como la mezcla convencional con el fin de poder comparar los resultados.
Definir ventajas y desventajas en la modificación de mezclas asfálticas con nylon y ceniza volante	Etapa IV	Se analizan los resultados y se establecen las principales diferencias entre las mezclas y las posibles ventajas o desventajas.

**NOTA:** Descripción del cumplimiento de los objetivos en las etapas metodológicas de la investigación.

## 10.1 Preliminares

Se hizo una recopilación y revisión de investigaciones en las cuales se usaron desechos o posibles materiales contaminantes para la modificación de las mezclas asfálticas, en el apartado 7 “Estado del arte” del actual documento se presenta un resumen de dicha recopilación en orden cronológico, la universidad donde se realizó la investigación, el material usado para la modificación y los resultados. Además, se revisaron metodologías de diseño y normativas que son utilizadas en Colombia para el diseño de mezclas asfálticas, lo cual se define en el apartado 8 y 9 del presente documento. A continuación, en la Tabla 10.2 se presenta la revisión bibliográfica.

Tabla 10.2 Revisión bibliográfica

<b>Revisión bibliográfica de investigaciones en las cuales se usaron desechos o posibles materiales contaminantes en la modificación de mezclas asfálticas</b>				
Año	Nombre de la Investigación	Autores	Material modificante	Resultados
2011	Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza provenientes de locaciones petroleras	Guillermo Orozco & Juan Murillo	Ceniza volante	Con 15% de ceniza y 4.5% de asfalto se aumentó la estabilidad en un 22% con respecto a la mezcla sin ceniza.
2013	Determinación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo 2 utilizando ceniza como una proporción del agregado fino y como llenante	Luis Aguilar & Edward Ayala	Ceniza volante	Con 4.5% de asfalto y 30% de ceniza el aumento de la estabilidad con respecto a la mezcla sin ceniza es de más del 100%. El flujo de la mezcla en ambos casos casi no presenta variación.
2014	Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos	José Forigua Orjuela & Elkin Pedraza Díaz	Trozos de bolsas plásticas	Con 0.4% de desperdicios plásticos se obtiene una mejora significativa en las propiedades de la mezcla asfáltica
2015	Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente Modificadas con Elastómero (caucho) y Tereftalato de Polietileno reciclados con Ligante Asfáltico AC-20	Patricio Romero, Hugo Bonifaz & Mary Revelo	Caucho y Tereftalato de Polietileno (PET)	Con un 7.5% de elastómero caucho la mezcla mostro una mejora en la estabilidad y para el caso del PET se recomienda solo en vías de tráfico liviano.
2016	Caracterización mecánica de una mezcla asfáltica modificada con fibras sintéticas	Juan Diego Vanegas Miranda	Fibras sintéticas de nylon y polipropileno	Con 0.15% de nylon se mejora en un 18% la relación esfuerzo deformación y la resistencia a la fatiga. Con 0.15% de fibra de polipropileno se mejora la relación esfuerzo – deformación en un 10%.

Tabla 10.2 continuación

<b>Revisión bibliográfica de investigaciones en las cuales se usaron desechos o posibles materiales contaminantes en la modificación de mezclas asfálticas</b>				
Año	Nombre de la Investigación	Autores	Material modificante	Resultados
2017	Estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: caso de estudio universidades de Bogotá D.C.	Cristian mejía Umbarila & Cristian Sierra Hernández	Caucho, Polietileno, Polietileno de baja densidad y polipropileno	El caucho como modificador en la mezcla asfáltica mejora la resistencia y reduce el agrietamiento por fatiga, con el polietileno y polietileno de baja densidad se mejora la rigidez de la mezcla y con el uso del polipropileno se mejora la resistencia al ahuellamiento de la mezcla asfáltica.
2019	Resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica en caliente con adición de un 10% por ceniza volantes de carbón mineral	Joan Gerardo Rosales Lecca	Ceniza volante	Para un porcentaje de asfalto del 5% y 10% de ceniza volante el aumento de la estabilidad en la mezcla asfáltica fue de un 11% y el flujo aumento un 18%.
2020	Estudio del comportamiento físico-mecánico de mezclas asfálticas modificadas con llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz	Omar Lizcano Garzón & Deyber Ramos Félix	Ceniza de la molienda de cascarilla de arroz	Con el uso de la ceniza procedente de la molienda de la cascarilla de arroz como modificador de la mezcla asfáltica se evidencia un aumento del 12% en la resistencia de la mezcla.

Nota: Revisión bibliográfica de las investigaciones que tuvieron los mejores resultados en la modificación de mezclas asfálticas con el uso de posibles materiales contaminantes para el medio ambiente.

Con base en dicha revisión bibliográfica se seleccionó el rango base para determinar el contenido óptimo del asfalto y los porcentajes de modificación para los materiales propuestos quedando de la siguiente forma:

- **Contenido óptimo de asfalto:** de acuerdo con las investigaciones revisadas este contenido óptimo mayormente se encuentra entre 5% y 6% para un asfalto 60/70.
- **Ceniza volante:** de las investigaciones revisadas los porcentajes de ceniza volante con los que se obtenían los mejores resultados eran 10, 15% y 30%. A continuación, en la Tabla 10.3 se presentan las investigaciones revisadas para obtener dichos porcentajes de modificación.

Tabla 10.3 Cuadro comparativo de las investigaciones que usaron ceniza volante como modificante para la mezcla asfáltica

Nombre de la Investigación	Universidad y año	Autores	Resultados
Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza provenientes de locaciones petroleras.	Universidad Pontificia Bolivariana 2011	Guillermo Orozco y Juan Murillo	Se modifica la mezcla asfáltica con porcentajes del 5%, 10% y 15% de ceniza volante. Con 15% de ceniza y 4.5% de asfalto se aumentó la estabilidad en un 22% con respecto a la mezcla sin ceniza. El flujo de la mezcla en ambos casos casi no presenta variación.
Determinación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo 2 utilizando ceniza como una proporción del agregado fino y como llenante.	Universidad Pontificia Bolivariana 2013	Luis Aguilar y Edward Ayala	Se modifica la mezcla asfáltica con porcentajes del 30%, 50% y 70% de ceniza. Con 4.5% de asfalto y 30% de ceniza el aumento de la estabilidad con respecto a la mezcla sin ceniza es de más del 100%. El flujo de la mezcla en ambos casos casi no presenta variación.
Resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica en caliente con adición de un 10% por ceniza volantes de carbón mineral.	Universidad San Pedro - Perú 2019	Joan Gerardo Rosales Lecca	Se modifica la mezcla asfáltica con 10% de ceniza, variando el porcentaje de asfalto. Para un porcentaje de asfalto del 5% y 10% de ceniza el aumento de la estabilidad fue de un 11% y el flujo aumento un 18%.

Nota: En esta tabla se presenta una comparación de los resultados obtenidos en las investigaciones que utilizaron ceniza volante como materia prima para la modificación de mezclas asfálticas.

- **Nylon:** Para este caso el mejor resultado según la investigación revisada se obtuvo con un porcentaje de 0,15% del total de la masa de la mezcla. A continuación, en la Tabla 10.4 se presentan la comparación de los resultados obtenidos en la investigación revisada.

Tabla 10.4 Cuadro comparativo de los resultados obtenidos en la investigación revisada sobre el uso de nylon como modificante en mezclas asfálticas

Propiedad	0.05% nylon	0.10% nylon	0.15% nylon
Relación esfuerzo – deformación	Presenta un aumento del 18% con respecto a la mezcla de control.	Presenta un aumento del 9% con respecto a la mezcla de control.	Presenta un aumento del 18% con respecto a la mezcla de control.
Resistencia a la fatiga	De acuerdo con los resultados, a medida que aumenta el porcentaje de fibra de nylon, la mezcla resiste un mayor nivel de deformación. Por tanto, dentro de los rangos evaluados el porcentaje de nylon que mejor se comporta es 0.15%.		

Nota: Comparación de los resultados obtenidos en la investigación titulada “Caracterización mecánica de una mezcla asfáltica modificada con fibras sintéticas” realizada por el ingeniero Juan Diego Vanegas en la Universidad de los Andes durante el 2016, para este caso solo compararemos los resultados obtenidos para la fibra de nylon.

## 10.2 Etapa I

### 10.2.1 Identificación de proveedores y obtención de los materiales

#### 10.2.1.1 Agregado Pétreo.

El suministro del agregado pétreo se dio gracias a la empresa PASOLIN S.A.S, ubicada en el km 5,3 del corredor ecológico en la vereda El Cocuy en la ciudad de Villavicencio, Meta. Dicho material proviene de la cantera del río Guayuriba que está ubicada por el mismo sector.

*Figura 10.2 Recolección de material pétreo*



Nota: Fotografía tomada por Autor.

#### 10.2.1.2 Asfalto 60/70

El suministro del asfalto se dio gracias a la empresa ECOBRAS S.A, ubicada en el Km 12, Vía Villavicencio – Acacias, en la ciudad de Villavicencio, Meta, quienes además compartieron la curva reológica del ligante, el cual es proveniente del pozo de la superintendencia de Apiay de la empresa ECOPETROL S.A. en el departamento del Meta.

Figura 10.3 Tanques de asfalto empresa ECOBRAS S.A



Nota: Fotografía tomada por Autor.

### 10.2.1.3 Material Modificante

#### 10.2.1.3.1 Nylon.

Las fibras de nylon utilizadas para la modificación de la mezcla asfáltica se obtuvieron de un trozo de cuerda usada de aproximadamente 1 kg.

Figura 10.4 Nylon usado para la modificación de la mezcla



Nota: Fotografía tomada por Autor.

#### 10.2.1.3.2 Ceniza volante.

Se optó por usar ceniza volante procedente de residuos de madera quemada utilizada en cocina, para realizar los correspondientes estudios e identificar posibles usos, disminuyendo el impacto ambiental del entorno y económico para la fabricación de las mezclas asfálticas.

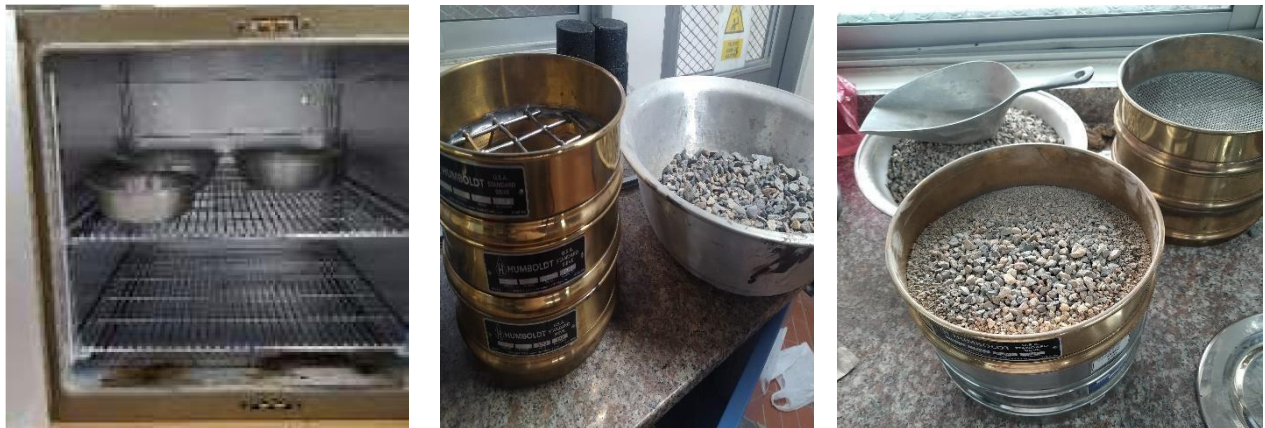
Inicialmente se tenía previsto tres opciones para obtener la ceniza volante: la Central Termoeléctrica Martín del Corral, La central eléctrica Termotasajero y la empresa Ecopetrol S.A., con las que se hizo un acercamiento. Después de dos meses de espera no fue posible la colaboración por parte de la termoeléctrica Termozipa y por parte de las otras dos opciones no se recibió respuesta alguna.

### **10.2.2 Caracterización de los materiales obtenidos**

#### **10.2.2.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E-213.**

El objetivo de este ensayo es determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados de un material con ayuda de tamices. Para este ese ensayo se debe secar la muestra en el horno por 24 horas a temperatura constante de  $110^{\circ}\text{C}$ , la cantidad tamizada fue de 2,5 Kg.

*Figura 10.5 Granulometría de los agregados*



*Nota: Fotografía tomada por Autor*

#### **10.2.2.2 Resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los ángeles. INV E-218.**

Como su nombre lo indica el objetivo de este ensayo es medir la resistencia al desgaste de los agregados usando la máquina de Los Ángeles, mediante acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda por medio del tambor giratorio y unas esferas metálicas. El número de esferas depende directamente de la granulometría de la muestra, el tambor debe girar a una velocidad constante de 30 o 33 rpm hasta completar 500 revoluciones.

### 10.2.2.3 Penetración de los materiales bituminosos INV E-706.

El objetivo de este ensayo es determinar la consistencia del material bituminoso (asfalto), valores de penetración altos indican una consistencia del material baja o blanda. Para llevar a cabo el ensayo es necesario tener el material bituminoso previamente calentado hasta que pueda fluir para posteriormente verterlo en los recipientes y dejarlo reposar, cuando las muestras estén frías se deben meter al baño maría a una temperatura constante de 25° C durante 45 minutos aproximadamente. Pasado ese tiempo se situaba la muestra en el aparato penetrómetro y se realizaban al menos 3 perforaciones en cada muestra.

*Figura 10.6 Ensayo de penetración de material bituminoso*



Nota: Fotografía tomada por Autor.

### 10.2.2.4 Densidad de los materiales bituminosos (método del picnómetro) INV E-707.

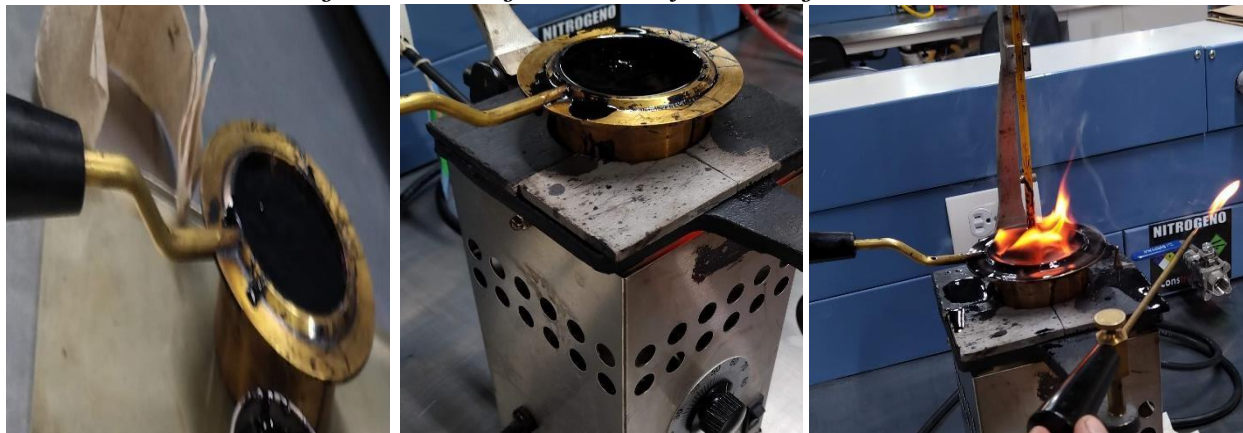
Como lo indica su nombre el objetivo es determinar la densidad del asfalto por medio de un picnómetro, para llevar a cabo el ensayo es necesario calibrar el picnómetro pesándolo vacío con tapa y luego lleno de agua destilada y con su tapa. Una vez calibrado se procede a llenar el picnómetro con  $\frac{3}{4}$  de asfalto previamente calentado en el horno para que pueda fluir de modo que no toque las paredes superiores del picnómetro y se toma el peso, luego se termina de llenar el picnómetro con agua destilada y se toma nuevamente su peso. Una vez determinados los 4 pesos se puede calcular la densidad como lo indica la norma.

*Figura 10.7 Ensayo de densidad del material bituminoso*

Nota: Fotografía tomada por Autor.

### 10.2.2.5 Punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland INV E-709.

El objetivo de este ensayo es medir la respuesta del material bituminoso al calor y a la llama, inicialmente se preparó la mezcla calentándola previamente en el horno y se dispuso en un cuarto libre de corrientes de aire el equipo a utilizar. Se llenó la copa de Cleveland hasta la marca de que trae y se dejó enfriar a temperatura ambiente, luego se pone la copa sobre el aparato que suministrara el calor y cuando el termómetro marque aproximadamente  $28^{\circ}\text{C}$  se empieza el barrido con la llama de forma suave y constante, se debe medir la temperatura en el momento en el que se produzca una chispa o destello sobre la superficie del material bituminoso y cuando se prende la llama y se mantenga por alrededor de 5 segundos, estos serán los puntos de inflamación y combustión respectivamente.

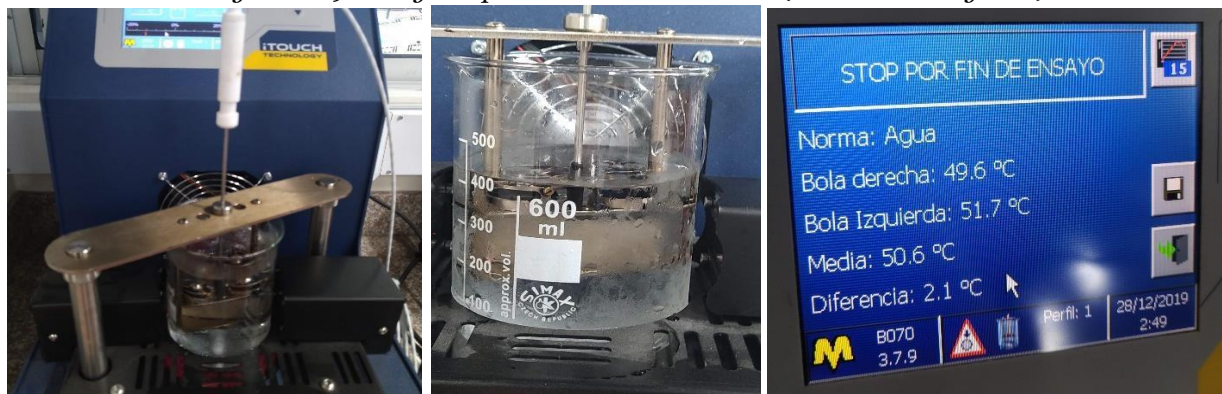
*Figura 10.8 Ensayo Punto de inflamación y combustión*

Nota: Fotografía tomada por Autor.

### 10.2.2.6 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos Mediante el aparato de anillo y bola.

Este ensayo tiene por objetivo determinar el punto de ablandamiento de los materiales bituminosos y determinar su tendencia a fluir cuando está sometido a elevadas temperaturas. Como en los ensayos anteriores es necesario calentar el material bituminoso de manera uniforme hasta que pueda fluir para ser vertida en los moldes, en este caso 2 anillos de latón que fueron precalentados previamente y dispuestos sobre una placa base tratado con un material antiadherente para evitar que el material bituminoso se adhiriera a esta. Los anillos deben llenarse y dejar un sobrante del material para posteriormente cuando se enfríe cortar el exceso y conseguir una superficie pareja, luego se sitúa encima de los anillos las guías de centrado para las bolas y se realiza el montaje con el soporte para los anillos en el equipo automático.

Figura 10.9 Ensayo de punto de ablandamiento (método anillo y bola)



Nota: Fotografía tomada por Autor.

### 10.2.2.7 Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional INV E-717.

Determinar la viscosidad del material bituminoso es importante porque gracias a este podemos determinar su manejabilidad y la facilidad con la que puede ser bombeada en las plantas asfálticas, además de poder estimar temperaturas óptimas para el mezclado y compactación durante el diseño de la mezcla asfáltica. Para el ensayo se debe calentar uniformemente el material bituminoso hasta que pueda fluir y se vierte la cantidad necesaria en los vástagos cilíndricos, se enciende el viscosímetro rotacional y se ajusta la temperatura y la velocidad para posteriormente ubicar el vástago en el contenedor térmico del viscosímetro y empezar con el ensayo según las recomendaciones del fabricante del viscosímetro.

Figura 10.10 Viscosidad del asfalto mediante el viscosímetro rotacional



Nota: Fotografía tomada por Autor.

### 10.2.2.8 Ensayo Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto INV E-748.

Es importante determinar ese contenido óptimo de asfalto que se adicionará a la mezcla asfáltica para garantizar un pavimento de calidad ya que un contenido de asfalto muy elevado puede generar exudación del asfalto sobrante y producir ondulaciones en la superficie del pavimento, un contenido bajo de asfalto puede generar problemas de agrietamiento o producir una mezcla seca que no permite una compactación adecuada y por ende la superficie de pavimento no estará en buenas condiciones para usarse.

Para el ensayo se elaboraron 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto para un total de 9 briquetas. Los porcentajes de asfalto utilizados fueron 5%, 5.5% y 6% con los cuales se determinó la cantidad de agregados que debían contener las briquetas según el porcentaje de asfalto a trabajar. En la Tabla 10.5 se puede evidenciar la distribución de material para cada porcentaje de asfalto, dicha distribución se obtuvo de acuerdo a las franjas granulométricas expuestas en el artículo 450 de la normativa INVIAS (INVIAS, 2013).

Tabla 10.5 Distribución de material granular para cada porcentaje de asfalto

Tamiz	% Material Retenido	5%	5,5%	6%
1/2	12.5	142.50	141.75	141.00
3/8	9.5	108.30	107.73	107.16
Nº 4	23	262.20	260.82	259.44
Nº 10	21	239.40	238.14	236.88
Nº 40	28.5	210.90	209.79	208.68
Nº 80	8	91.20	90.72	90.24
Nº 200	7.5	85.50	85.05	84.6
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>1140</b>	<b>1134</b>	<b>1128</b>

**Nota:** En esta tabla se presenta la cantidad de agregados que deben contener las briquetas de acuerdo con el porcentaje de asfalto a utilizar.

Para la elaboración de las briquetas o muestras se calentó previamente el asfalto para que tuviera la fluidez necesaria para poder mezclarse con la cantidad de agregados pétreos respectivos según el porcentaje de asfalto a trabajar, luego se mezcló y calentó la mezcla el tiempo suficiente para homogenizar la mezcla y llegar a la temperatura óptima de compactación. Una vez la mezcla llega a la temperatura de compactación se vierte en el molde y se compacta con 75 golpes por cada lado de la muestra. en las próximas 24 horas de haber realizado las briquetas se determina la densidad y se deben meter a baño maría a 60° C durante 30 minutos para pasar a fallarlas con la Master Loader.

*Figura 10.11 Ensayo Marshall para determinar contenido óptimo de asfalto*



Nota: Fotografía tomada por Autor.

#### **10.2.2.9 Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas empelando especímenes saturados y superficialmente secos.**

Para realizar este ensayo es necesario tomar el peso de las briquetas en diferentes condiciones, la primera condición es pesar las briquetas totalmente secas, luego se sumergen las muestras en agua a 25° C durante 4 minutos para determinar su masa bajo el agua y por últimos se sacan las muestras de agua y se secan superficialmente para determinar su masa en condición superficialmente seca. La gravedad específica de Bulk se determina como masa del espécimen seco sobre la resta de las masas superficialmente seca y masa bajo el agua.

Figura 10.12 Ensayo para determinar la gravedad específica de Bulk



Nota: Fotografía tomada por Autor.

### 10.3 Etapa II

#### 10.3.1 Modificación de la mezcla asfáltica

Una vez determinado el contenido óptimo de asfalto se procede a realizar briquetas de control con dicho contenido de asfalto. Se elaboraron en total 12 briquetas, 3 de control, 3 briquetas con 0,15% de nylon, 3 briquetas reemplazando un 30% del filler con ceniza y 3 briquetas combinando ambos modificantes es decir con 0,15% de nylon y 30% de ceniza. En la tabla 10.6 se presenta la cantidad de material granular y asfalto que debe contener cada briketa según cada caso de modificación.

Tabla 10.6 Distribución de agregados según cada caso de modificación

Tamiz	5,3% asfalto	0,15% Nylon	30% ceniza volante	30% ceniza volante y 0,15% Nylon
1/2	142.050	141.825	142.050	141.825
3/8	107.960	107.787	107.960	107.787
Nº 4	261.372	260.958	261.372	260.958
Nº 10	238.644	238.266	238.644	238.266
Nº 40	210.234	209.901	210.234	209.901
Nº 80	90.912	90.768	90.912	90.768
Nº 200	85.23	85.095	59.661	59.566
Nylon	-	1.8	-	1.8
Ceniza	-	-	25.569	25.528
Asfalto	63,6	63,6	63,6	63,6
<b>Total</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>

**Nota:** Cantidad necesaria de agregados y modificantes para cada caso de modificación (valores en gramos).

Para la elaboración de las briquetas o muestras se calentó previamente el asfalto para que tuviera la fluidez necesaria para poder mezclarse con la cantidad de agregados pétreos y material modificante según el caso de modificación, luego se mezcló y calentó la mezcla el tiempo suficiente para homogenizar la mezcla y llegar a la temperatura óptima de compactación. Una vez la mezcla llega a la temperatura de compactación se vierte en el molde y se compacta con 75 golpes por cada lado de la muestra. en las próximas 24 horas de haber realizado las briquetas se determina la densidad y se deben meter a baño maría a 60° C durante 30 minutos para pasar a fallarlas con la Master Loader.

Figura 10.13 Marshall para mezcla asfáltica modificada



Nota: Fotografía tomada por Autor.

## 10.4 Etapa III

### 10.4.1 Obtención del contenido óptimo de asfalto

Para obtener los valores que se presentan en la Tabla 10.7, se realizan varios análisis a los resultados obtenidos en la caracterización de las briquetas y los datos arrojados por la el maquina usada para fallar las briquetas “Master Loader”. Se selecciona el valor máximo del peso específico y estabilidad, mientras que para los parámetros de fluidez y porcentaje de vacíos se seleccionan los datos intermedios, una vez obtenidos estos datos se promedian y se determina que el contenido óptimo de asfalto para este caso es de 5,3%.

Tabla 10.7 Determinación del contenido óptimo de asfalto

Propiedad	Contenido de asfalto %
Peso específico	5.0
Estabilidad	5.0
Porcentaje de vacíos	5.5
luidez	5.5
Contenido Optimo	5.3

**NOTA:** Análisis a los parámetros para determinar el contenido óptimo de asfalto.

## 10.5 Etapa IV

### 10.5.1 Resultados

#### 10.5.1.1 Caracterización materiales

Con base en la normativa invias descrita en el Marco normativo se realizaron los diferentes ensayos para evaluar las características físicas del material bituminoso y los resultados se muestran a continuación en la Tabla 10.8.

Tabla 10.8 Caracterización del asfalto

<b>Asfalto</b>		
Penetración	44,56	Mm
IP	-1,3	-
punto de llama (Destello)	230	°C
punto de inflamación	270	°C
punto de combustión	295	°C
punto de ablandamiento	50,6	°C

Se realizó la caracterización de los agregados finos y gruesos de acuerdo con la normativa INVIAS, específicamente los ensayos INV E-213 y INV E- 218 obteniendo los resultados que se muestran a continuación.

Figura 10.14 Curva granulométrica para agregado grueso

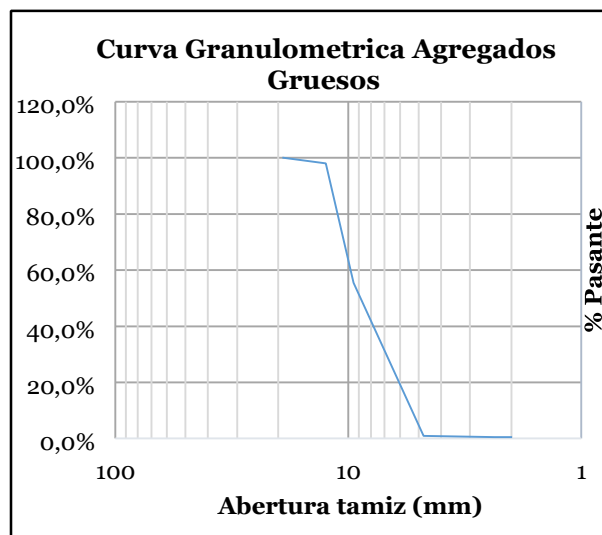
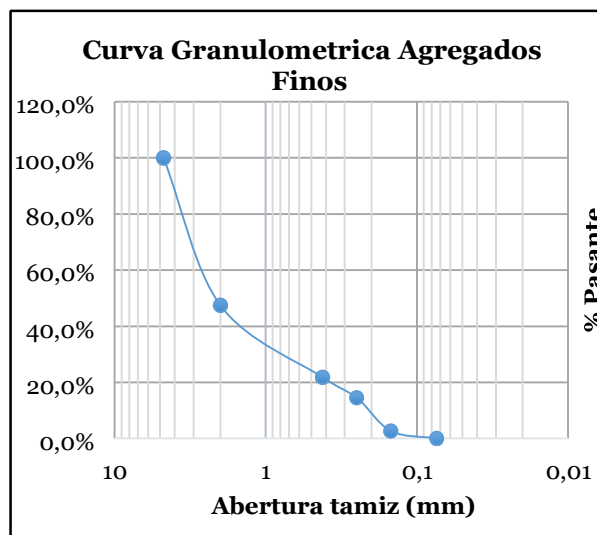


Figura 10.15 Curva granulométrica para agregado fino

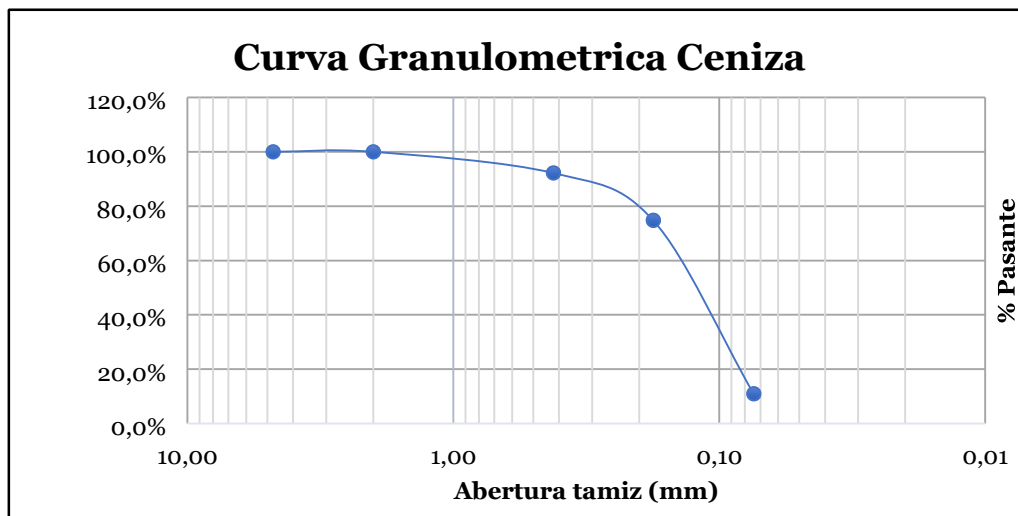


Nota: Suministrada por empresa PASOLIN S.A.S

De acuerdo con la caracterización granulométrica el 97% de los agregados gruesos se encuentran concentrados entre el tamiz de 3/8" y el No. 4, y en el caso de los finos el 75% se encuentra retenido en los tamices No. 10 y No. 40. El porcentaje de pérdidas obtenido mediante el ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángeles es del 15.81% por lo que está cumpliendo con lo establecido por la normativa, la cual indica que para tránsito de nivel 2 el porcentaje máximo de desgaste es del 25%.

Se realizó la caracterización de la ceniza volante teniendo en cuenta el ensayo INV E- 213 para agregados finos, dicha caracterización se presenta en la Figura 10.16. De acuerdo con los resultados el 70% del material queda retenido en el tamiz #200 y ya que la mayor concentración de ceniza volante se encuentra en este tamiz es el que se escoge para reemplazar el 30% del filler de la mezcla asfáltica.

Figura 10.16 Granulometría de la ceniza volante



### 10.5.1.2 Ensayo Marshall con la mezcla asfáltica modificada

Una vez determinado el contenido óptimo de asfalto se realizan briquetas de control para tener datos necesarios de la mezcla sin modificar y poder realizar la comparación con la mezcla modificada. De igual manera se realizan las briquetas modificadas con ceniza volante, nylon y ceniza volante + nylon de acuerdo con lo mencionado en las etapas anteriores. Durante la elaboración de las briquetas se presentaron problemas debido a que no se estaba controlando la temperatura de mezclado y compactación, esto ocasiono que las briquetas no se compactaran de forma adecuada. Dichas briquetas fueron desechadas y se optó por controlar la temperatura de mezclado con ayuda del termómetro.

En la siguiente figura se presenta la gráfica de fuerza vs deformación del espécimen de control que mejor se comportó, con una estabilidad de 9.83 Kn y fluidez de 4.028 mm. Además, se presenta la tabla con los datos referentes a las briquetas de control que serán tenidos en cuenta como punto de partida para realizar la comparación con las briquetas modificadas más adelante.

Figura 10.17 Estabilidad vs Flujo del espécimen de control

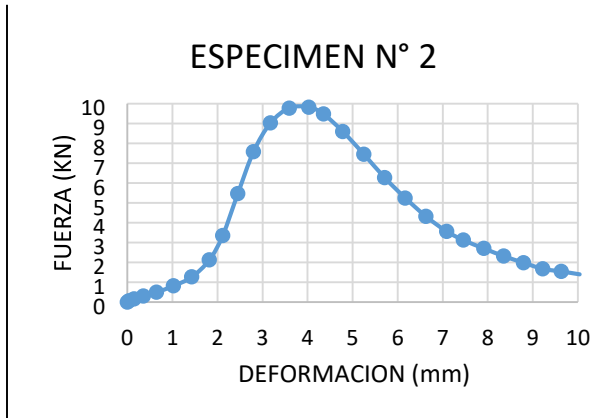


Tabla 10.9 Datos de las briquetas de control N° 2

Propiedad	Valor
Peso Especifico	2257,93
Estabilidad	8,1538
Flujo	3,583
% Vacíos	1,60885

A continuación, se presentan las gráficas fuerza vs deformación de los especímenes modificados que mejor se comportaron, además se presenta una tabla en donde se resumen los datos obtenidos de las propiedades de las briquetas modificadas y de control mediante el ensayo Marshall.

Figura 10.18 Estabilidad vs flujo del espécimen 2 con 30% ceniza volante

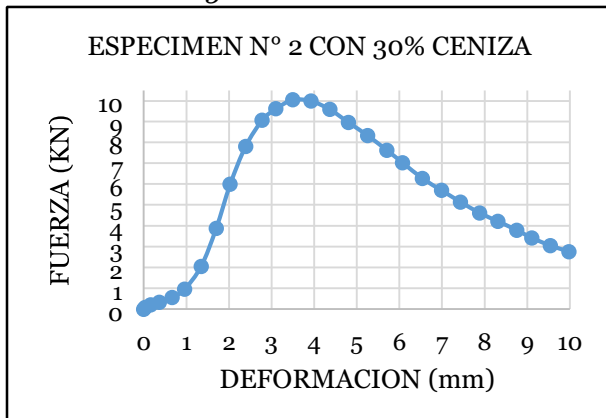


Figura 10.19 Estabilidad vs flujo del espécimen 3 con 0,15% nylon

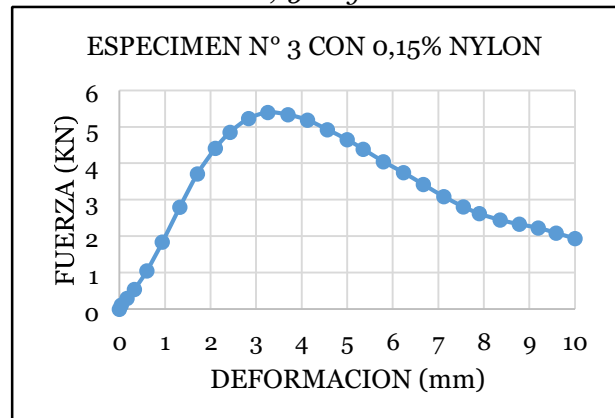


Figura 10.20 Estabilidad vs flujo del espécimen 3 con ceniza volante + nylon

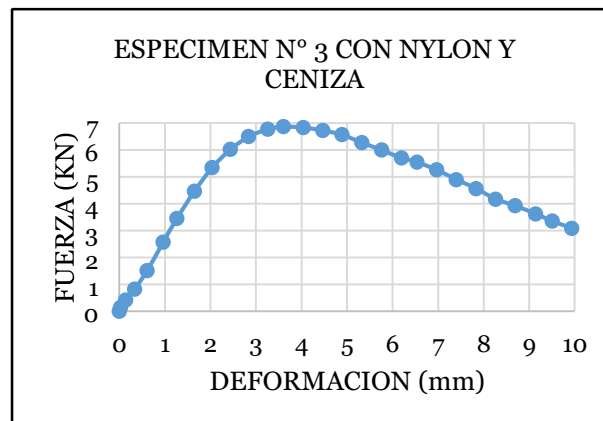


Tabla 10.10 Resumen de las propiedades obtenidas de las briquetas modificadas

Propiedad	Briquetas			
	Control	30% Ceniza volante	0,15% Nylon	30% Ceniza volante y 0,15% Nylon
Peso Especifico	2257,93	2283,44	2222,51	2239,36
Estabilidad	8,15	8,79	4,36	5,33
Flujo	3,58	3,25	3,01	3,27
% Vacíos	1,61	1,53	1,85	1,80

**Nota:** Resumen de los datos obtenidos del ensayo Marshall para las briquetas modificadas y las de control.

Observando los resultados del ensayo Marshall, con el cual se determinaron las propiedades de la mezcla como el peso específico, la estabilidad, el flujo y el porcentaje de vacíos, se evidencia que la mayor estabilidad la presentan las briquetas con 30% de ceniza volante y la menor estabilidad se presenta en los especímenes modificados con nylon, sin embargo los valores correspondientes al porcentaje de vacíos para todos los especímenes no se encuentran cercanos a los rangos establecidos por la normativa (3% – 5%).

Tomando como base los valores obtenidos con las briquetas de control, la modificación que mejor se comporta es la realizada con 30% de ceniza volante.

### 10.5.1.3 Diseño del pavimento mediante la metodología Shell

Para el diseño se debe tener en cuenta la temperatura media anual ponderada (TMAP °C) junto con un factor de ponderación, los datos de la temperatura se obtuvieron gracias a la herramienta

CLIMA del software TOPO 3 para lo cual se tuvieron en cuenta 3 estaciones climáticas de la ciudad de Villavicencio (APTO VANGUARDIA, UNILLANOS Y LIBERTAD LA).

Para el diseño por medio de la metodología Shell es necesario el uso de cartas de diseño ya establecidas mediante las cuales podemos obtener los valores de temperatura w-MAAT, el módulo de resiliencia MR y el código final de la mezcla con la cual podemos determinar la carta HN que usaremos para definir las dimensiones de la estructura del pavimento. A continuación, se presentan los datos necesarios para llevar a cabo esta metodología y el resumen de los resultados obtenidos (El procedimiento completo se encuentra en el Anexo 3).

Tabla 10.11 Datos iniciales para el diseño

Datos		
CBR	5,0	%
Mr	5,0,E+07	N/m <sup>2</sup>
N8,2	1,0,E+06	
TMAP	26,05	° C
FP	2,11	° C
Asfalto	5,3	%
Agregados	93,09	%

**Nota:** Datos iniciales para determinar el módulo de resiliencia, y el código final de la mezcla.

Tabla 10.12 Diseño metodología Shell

Datos el Diseño		
w-MAAT	25,7	° C
T800	5,2,E+01	° C
IP	-1,2,E+00	
Tmix	35,70	° C
ΔT	16,30	° C
Rigidez del asfalto (Sb)	2,0,E+06	N/m <sup>2</sup>
Rigidez de la mezcla (Smix)	1,0,E+09	N/m <sup>2</sup>
ε fat	1,9,E-04	
<b>Código final de la mezcla</b>	<b>S1 F2 50</b>	

**Nota:** Datos obtenidos mediante el uso de las cartas establecidas por la metodología Shell.

Con estos datos de diseño obtenidos mediante el uso de las cartas de diseño ya es posible seleccionar la carta HN para determinar los espesores de la estructura del pavimento (Subbase granular, Base granular y carpeta asfáltica), quedando distribuidos de la siguiente manera.

Tabla 10.13 Distribución de la estructura del pavimento

Distribución		
Espesor de Carpeta	12	cm
Espesor de granulares	40	cm
Base granular	15	cm
Subbase Granular	25	cm

**Nota:** Distribución de las capas que componen la estructura del pavimento. Elaborada

Figura 10.21 Estructura del pavimento

<b>Carpeta Rodadura</b> Modulo Rigidez mezcla = $1,0 \times 10^9$ N/m <sup>2</sup> Espesor = 12 cm
<b>Base Granular</b> Modulo = $8,0 \times 10^8$ N/m <sup>2</sup> Espesor = 15 cm
<b>Subbase Granular</b> Modulo = $4,0 \times 10^8$ N/m <sup>2</sup> Espesor = 25 cm
<b>Subrasante</b> Mr = $5,0 \times 10^7$ N/m <sup>2</sup>

### 10.5.2 Ventajas y desventajas

A continuación, se presenta una comparación entre la mezcla convencional y una mezcla asfáltica modificada con ceniza volante y nylon, de acuerdo con los resultados obtenidos se establecen algunas ventajas y desventajas que podrían presentar estas mezclas.

Tabla 10.14 Comparación Mezcla convencional Vs Mezcla modificada

Mezcla asfáltica convencional		Mezcla asfáltica modificada	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Poseen buena resistencia al ahuellamiento y fatiga bajo las condiciones de tránsito para las que fue diseñada.	Requiere mayor cantidad de agregados pétreos para su elaboración.	Presentan la misma funcionalidad que las mezclas convencionales.	Requiere de mayor cuidado durante su elaboración.
Son las más utilizadas ya que las mezclas modificadas aun no tienen suficientes estudios sobre su comportamiento en situaciones reales. (ya instaladas y en funcionamiento).	Su costo puede ser más elevado que las mezclas modificadas, ya que requiere más agregados.	Presentan mayores valores de estabilidad que la mezcla convencional por lo que soportará mejor las cargas del tránsito.	No se sabe que efectos puede tener la composición química de la ceniza volante a la mezcla con el paso del tiempo.
		Ayuda a disminuir la cantidad de cenizas	Como no se tienen suficientes estudios o

Mezcla asfáltica convencional		Mezcla asfáltica modificada	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
		volantes que son liberadas al ambiente.	datos sobre su comportamiento en un ambiente real, puede presentarse cierto rechazo a su implementación.

**Nota:** ventajas y desventajas que presentan las mezclas convencionales vs mezclas modificadas. Se realizo la comparación de la mezcla convencional únicamente con la mezcla modificada con ceniza volante ya que presento los mejores resultados.

## 11. Conclusiones

- Se evidenció que los agregados provenientes de la planta de asfalto PASOLIN SAS cumplen con lo establecido en el art 450 de la norma INVIAS, de esta forma se garantiza que la mezcla no vaya a presentar problemas de durabilidad o degradación relacionados con los agregados.
- Se llevó a cabo la identificación y visita a las principales empresas encargadas del proceso de reciclaje ubicadas en el barrio industrial de Villavicencio, con el fin de obtener información sobre el uso y disposición que se le da al nylon. De acuerdo con la información obtenida, dicho material no es reciclable y por tanto los recicladores no lo recogen ya que no obtendrán ningún beneficio por este, solo una empresa cuenta con una bodega de material NO RECICLABLE, pero al momento de la visita a la EMPRESA RECUPERADORA DE PLÁSTICO S.A el contenido de dicha bodega ya había sido llevado al relleno sanitario y por tal motivo no fue posible obtener desechos de nylon.
- Se seleccionaron los porcentajes de modificación para la mezcla asfáltica tomando como base las investigaciones que utilizaron los mismos materiales de modificación propuestos, quedando de la siguiente manera: para la ceniza volante se eligió reemplazar el 30 % del filler y para el nylon el 0.15% del total de la mezcla asfáltica. Esta elección se hizo analizando los resultados que se obtenían en las investigaciones revisadas.
- Mediante el uso de la metodología Marshall se determinó que el contenido óptimo de asfalto es de 5.3%, con este valor se realizaron briquetas de control que obtuvieron valores de estabilidad de 8.15 Kn y 3.58 mm de fluidez por lo que se garantiza el cumplimiento de los requisitos mínimos establecidos en la norma.
- Según lo establecido por el art 450 de la norma INVIAS para un tránsito NT2 los valores de estabilidad deben ser mínimo de 7.5 Kn y el flujo debe estar entre 2 y 4 mm, por lo que la mezcla modificada que cumple con estos requisitos es la mezcla que contiene 30% de ceniza volante que presenta un valor de 8.79 Kn para estabilidad y 3.25 mm de fluidez. Evidenciando un aumento en la estabilidad y garantizando su resistencia al ahuellamiento, ondulaciones y demás cambios que afecten la vida del pavimento.

- De acuerdo con los resultados de la mezcla modificada solo con nylon y la modificada con nylon + ceniza volante, cumplen con los requisitos mínimos de flujo, pero no presentan la estabilidad mínima que exige la norma INVIAS. Esto se debe a que las fibras de nylon que se utilizaron en la modificación presentaban cierto desgaste que pudo haber afectado su resistencia.
- El diseño de la estructura de pavimento mediante el uso de la metodología Shell para una mezcla convencional presentan mínimas variaciones con el diseño para la mezcla modificada, varían muy poco los módulos de rigidez de la mezcla, la deformación del asfalto por fatiga y los espesores de la estructura del pavimento se mantienen iguales. Sin embargo, mediante el uso de la mezcla modificada se estaría reduciendo el impacto ambiental de las cenizas volantes y el nylon.
- Finalmente, con los resultados obtenidos en esta investigación se demuestra que es posible utilizar materiales contaminantes como materia prima en la elaboración de mezclas asfálticas para mejorar sus propiedades, haciéndolas más resistentes a las cargas ejercidas por el tránsito y contribuyendo a la reducción del impacto ambiental.

## **12. Recomendaciones**

Se debe controlar la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica para obtener mejores resultados, ya que si la mezcla se encuentra demasiado caliente durante la compactación se presentará baja cohesión y tenderá a deformarse rápidamente y si se encuentra demasiado fría la mezcla será demasiado rígida para una compactación adecuada, además se debe evitar recalentar demasiadas veces el asfalto para evitar la oxidación del mismo y que sus propiedades se vean afectadas.

Manipular con precaución las briquetas durante el proceso de desmolde posterior al proceso de compactación para evitar que se deformen. De igual manera tener precaución durante el baño maría previo a fallar las briquetas ya que estarán de 30 a 40 minutos a 60° C y estarán más propensas a deformarse durante su manipulación antes de fallarlas en la Master Loader.

Se recomienda usar fibras de nylon de calibres pequeños para asegurar una mejor integración a la mezcla, ya que si el nylon no es lo suficientemente delgado no se integrará de forma adecuada a la mezcla y afectará la resistencia de la misma.

También es recomendable realizar una caracterización química de la ceniza volante para saber su composición, determinar que tipo de sustancias químicas contiene y determinar cómo pueden estas afectar las propiedades de la mezcla asfáltica.

### 13. Referencias bibliográficas

- Aguilar Pedrozo, L. & Ayala Robayo, E. (2015). Determinación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo 2 utilizando ceniza como una proporción del agregado fino y como llenante. [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. Repositorio. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/5077>
- Cabezas López, P. (2020). Caracterización física de un ligante asfáltico 60/70 modificado con desechos de polietileno de alta densidad (D-PEAD). [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/21778>
- Cepeda, J. (2015). *Análisis de desempeño de mezclas asfálticas tibias*. [Trabajo de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas]. Repositorio <http://repository.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/8431>
- El periódico. (12 de 11 de 2018). Expertos: Contaminación de mares y ríos por plásticos es alarmante en Colombia. <https://www.elperiodico.com/es/medio-ambiente/20181112/contaminacion-mares-rios-plasticos-colombia-7141963>.
- Forigua Orjuela, J. E., & Pedraza Díaz, E. (2014). *Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos*. [trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2575/1/Dise%C3%B1o-mezclas-asf%C3%A1lticas-modificadas-adici%C3%B3n-desperdicios-pl%C3%A1sticos.pdf>
- Fundación conama. (Nov de 2018). *Las cifras del desperdicio textil: alrededor del 90% de los residuos textiles acaban en vertederos*. <https://iresiduo.com/noticias/espana/fundacion-conama/18/11/08/cifras-desperdicio-textil-alrededor-90-residuos-textiles>
- Instituto Nacional de Vías - INVÍAS. (2013). Norma INVIAS - Pavimentos asfálticos. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*, 1–440. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>
- Joel K. Bourne, J. (2019). El otro lado oscuro del carbón: su ceniza puede envenenar el agua y a las personas. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2019/02/el-otro-lado-oscuro-del-carbon-su-ceniza-puede-envenenar-el-agua-y-las>
- Lara Pérez, M. Y. (2016). *Ceniza De Biosó*

- lido De Ptar Como Llenante Mineral En La Elaboración De Mezclas Asfálticas Tipo Mdc-19. 1. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/29857>
- Lizcano, O. F., Deyber, G., & Felix, A. R. (2020). *Estudio del comportamiento fisicomecanico de mezclas asfalticas modificadas con llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz*. [Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia]. Repositorio. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24575>
- Mejía, C., & Sierra, C. (2017). *Estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: caso de estudio universidades de Bogotá D.C.* [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio. <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00003837.pdf>
- Ministerio de Transporte. (2018). Transporte en Cifras - Estadísticas 2018. Transportation in statistical figures. [https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/o/Estudios BID/Transporte en Cifras - Estadísticas 2018 \(4\).pdf?ver=2019-11-19-142924-863&timestamp=1574191787084](https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/o/Estudios%20BID/Transporte%20en%20Cifras%20-%20Estadisticas%202018%20(4).pdf?ver=2019-11-19-142924-863&timestamp=1574191787084)
- Revelo Corella, M. (2014). Diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas con elastómero (caucho) y tereftalato de polietileno reciclados con ligante asfáltico AC-20. [Artículo Académico, Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador]. Repositorio <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9635>
- Reyes Ortiz, O., Troncoso Rivera, J., & Camacho Tauta, J. (2006). Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de ceniza volantes. *Ingeniería y Universidad*, 10(1), 2. 19-30. <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/910/509>
- Rodríguez, E. (2016). Uso de polvo de caucho de llantas en pavimentos asfálticos. *Boletín Técnico PITRA-LanammeUCR*. 7(4). 1-7. <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/50625112500/316/4.pdf?sequence=1>
- Rondón Quintana, H., & Reyes Lizacano, F. (2015). *Pavimentos Materiales, construcción y diseño*. Ecoe ediciones.
- Rosales Lecca, J. (2019). *Resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica en caliente con adición de un 10% por ceniza volantes de carbón mineral*. [Trabajo de grado, Universidad San Pedro]. Repositorio. [http://www.repositorio.usanpedro.edu.pe/bitstream/handle/USANPEDRO/10403/Tesis\\_59858.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.repositorio.usanpedro.edu.pe/bitstream/handle/USANPEDRO/10403/Tesis_59858.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Universidad Nacional del Rosario. (n.d.). *Método Shell. Diseño de pavimentos asfálticos método Shell* 78.

[https://www.academia.edu/32027797/DISE%C3%91O\\_DE\\_PAVIMENTOS\\_ASF%C3%81LTICOS\\_M%C3%89TODO\\_SHELL\\_78\\_C%C3%81TEDRA\\_TRANSPORTE\\_III\\_ES\\_CUELA\\_DE\\_INGENIER%C3%8DA\\_CIVIL\\_FACULTAD\\_DE\\_CIENCIAS\\_EXACTAS\\_INGENIER%C3%8DA\\_Y\\_AGRIMENSURA\\_UNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_DE\\_ROSARIO](https://www.academia.edu/32027797/DISE%C3%91O_DE_PAVIMENTOS_ASF%C3%81LTICOS_M%C3%89TODO_SHELL_78_C%C3%81TEDRA_TRANSPORTE_III_ES_CUELA_DE_INGENIER%C3%8DA_CIVIL_FACULTAD_DE_CIENCIAS_EXACTAS_INGENIER%C3%8DA_Y_AGRIMENSURA_UNIVERSIDAD_NACIONAL_DE_ROSARIO)

Vanegas Manrique, E., & Segura Calleja, L. (2021). Evaluación de una mezcla asfáltica modificada con vidrio templado molido por medio de la metodología Marshall. . [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/35194>

Vanegas Miranda, J. (2016). Caracterización mecánica de una mezcla asfáltica modificada con fibras sintéticas. [Tesis de Maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13873>

## **14. Anexos**

A continuación, encontrará la lista de anexos que contienen información relevante que le ayudarán a comprender mejor el contenido de esta investigación.

**Anexo 1** CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

**Anexo 2** ENSAYO MARSHALL

**Anexo 3** METODOLOGÍA SHELL