

**Análisis Comparativo de la Adición de Fibras de Polipropileno de Desechos de  
Tapabocas en una Mezcla Convencional Tipo MD-12 con Asfalto 60/70 de la Refinería  
de Barrancabermeja**

**Luis Alberto Navia Camargo ID:150966**

**Luis Ernesto Pereira Bermúdez ID:150945**

**Juan Fernando Sarasti Berni ID:150952**



**Universidad Católica de Colombia**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Especialización en Ingeniería de Pavimentos**

**Bogotá**

**2021**

**Análisis Comparativo de la Adición de Fibras de Polipropileno de Desechos de  
Tapabocas en una Mezcla Convencional Tipo MD-12 con Asfalto 60/70 de la Refinería  
de Barrancabermeja**

**Luis Alberto Navia Camargo ID:150966**

**Luis Ernesto Pereira Bermúdez ID:150945**

**Juan Fernando Sarasti Berni ID:150952**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Especialista en Ingeniería de Pavimentos**

**Director**

**Eduardo Rueda**

**I.C., P. h. D**

**Universidad Católica de Colombia**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Especialización en Ingeniería de Pavimentos**

**Bogotá**

**2021**



## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

## Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Generalidades	13
1.1 Línea de Investigación y Tipo de Investigación	13
1.2 Planteamiento del Problema	13
1.2.1 Pregunta de investigación	17
1.2.2 Variables del Problema	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.3 Justificación	18
2. Marcos de Referencia	20
2.1 Marco Conceptual	20
2.1.1 Asfalto	20
2.1.2 Propiedades físicas del asfalto	21
2.1.3 Envejecimiento del asfalto	22
2.1.4 Asfalto Modificado	23
2.1.5 Polipropileno	25
2.1.6 Fibras de polipropileno	27
2.2 Marco Teórico	29
2.2.1 Mezclas asfálticas	29

2.3 Marco Normativo	30
2.4 Estado del Arte	31
3. Metodología	34
3.1 Tipo de Investigación	34
3.1 Diseño Metodológico	34
3.2 Alcances y Limitaciones	35
4. Resultados	36
4.1 Consideraciones Previas	36
4.1.1 Elección de los Materiales y Proceso de Extracción del Agente Modificador	36
4.1.2 Caracterización Física de un Asfalto Base de Ecopetrol	38
4.2 Análisis de las Propiedades Físicas de la Mezcla Convencional y Modificada con Adición de Fibras de Polipropileno de Desechos de Tapabocas al 1%, 1.5% y 3%	42
4.2.1 Elaboración del Asfalto Modificado con la Adición de Polipropileno de Desecho de Tapabocas	42
4.2.2 Comparación de las Características Físicas de los Asfaltos Base y Modificado con Fibras de Tapabocas de Desecho al 1%, 1.5% y 3%.	46
4.3 Análisis de Variables de Estabilidad, Fluencia, Densidad y Vacíos de la Mezcla Asfáltica Tipo MD-12 Convencional y Modificada con Fibras de Polipropileno de Tapabocas	52
4.3.1 Ensayos Marshall Mezcla Asfáltica Convencional y Modificada	52
4.3.1.1 Determinación del agregado para la mezcla	52
4.3.1.2 Análisis de Comportamiento de Mezcla Asfáltica Convencional vs. Modificada	61

4.4 Comparación Estructuras de Pavimento Mezcla asfáltica Tipo MD-12 Convencional	
Vs. Mezcla Modificada con Fibras de Polipropileno de Tapabocas	63
4.4.1 Diseño de la Estructura de Pavimento	63
4.4.2 Generalidades Caso de Estudio	64
4.4.2.1 Estudio de Tránsito	65
4.4.3 Diseño de la Estructura	67
4.4.3.1 Capacidad de Soporte de la Subrasante	67
4.4.3.2 Módulo Resiliente de la Capa de Subbase y Base	68
4.4.3.3 Coeficiente de Aporte Estructural de la Mezcla Asfáltica	68
4.4.3.4 Dimensionamiento de las Estructuras de Pavimento	69
4.5 Evaluación Económica del Empleo de las Fibras de Polipropileno de Tapabocas	
Usados en Mezclas Asfálticas	70
5. Conclusiones	73
6. Recomendaciones	75
Referencias Bibliográficas	76

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Estado de la Red Vial Pavimentada I Semestre 2021	15
Figura 2. Productos Bituminosos	20
Figura 3. Asfalto	21
Figura 4. Estructura Molecular del Polipropileno	26
Figura 5. Fibras de Polipropileno	28
Figura 6. Penetración de los Materiales Bituminosos	39
Figura 7. Densidad de Materiales Bituminosos Sólidos y Semisólidos - Método del Picnómetro	40
Figura 8. Puntos de Inflamación y de Combustión Mediante la Copa Abierta Cleveland	40
Figura 9. Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos - Aparato de Anillo y Bola	41
Figura 10. Efecto del Calor y del Aire sobre el Asfalto en Lámina Delgada y Rotatoria	42
Figura 11. Proceso de Agitación del Asfalto Base de la Refinería de Barrancabermeja	43
Figura 12. Agitación Mecánica del Asfalto	44
Figura 13. Comprobación de la Incorporación del Polímero Modificador en el Asfalto Base	45
Figura 14. Penetración Vs. Porcentaje de Polipropileno	48
Figura 15. Densidad vs Porcentaje del Polipropileno	48
Figura 16. Punto de Ablandamiento vs Porcentaje del Polipropileno	49
Figura 17. Recuperación Elástica por Torsión vs Porcentaje del Polipropileno	50
Figura 18. Gradación Obtenida	53
Figura 19. Proceso de Preparación de la Mezcla Asfáltica	55
Figura 20. Proceso de Elaboración de Probetas para el Ensayo Marshall	55

Figura 21. Densidad vs % Asfalto-Diseño Marshall	58
Figura 22. %Vacíos con Aire vs % Asfalto-Diseño Marshall	58
Figura 23. %Vacíos en el Agregado Mineral vs % Asfalto-Diseño Marshall	59
Figura 24. %Vacíos Llenos con Asfalto vs % Asfalto-Diseño Marshall	59
Figura 25. Estabilidad vs % Asfalto -Diseño Marshall	60
Figura 26. Flujo vs % Asfalto -Diseño Marshall	60
Figura 27. Estabilidad Mezcla	62
Figura 28. Flujo Marshall	63
Figura 29. Ubiación Zona de Estudio	64
Figura 30. Metodología AASTHO-Diseño de Pavimento Flexible	65
Figura 31. Estructura Propuesta Mezcla Asfáltica Convencional	69
Figura 32. Estructura Propuesta Mezcla Asfáltica Modificada con Fibras de Polipropileno al 3%.	70

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades Físicas del Asfalto	22
Tabla 2. Tipos de Envejecimiento del Asfalto	23
Tabla 3. Propiedades Físicas del Polipropileno	26
Tabla 4. Propiedades Térmicas del Polipropileno	27
Tabla 5. Propiedades Químicas del Polipropileno	27
Tabla 6. Normatividad Aplicada para el Diseño de Mezclas Asfálticas	31
Tabla 7. Fases del Trabajo	34
Tabla 8. Equivalencias % en peso adición de fibras de tapabocas	42
Tabla 9. Ensayos de Verificación de Características Físicas de Mezclas Asfálticas	46
Tabla 10. Resultados Ensayos de Verificación de Características Físicas de Mezclas Asfálticas	47
Tabla 11. Comparación Mezcla Modificada al 3% según Clasificación Cementos Asfálticos Según Grado de Viscosidad del IDU	51
Tabla 12. Granulometría de Agregados ET-IDU	52
Tabla 13. Dosificación de Agregados para el Diseño de la Mezcla Asfáltica	53
Tabla 14. Características de las Probetas de Mezcla Asfáltica	56
Tabla 15. Determinación de la Estabilidad y Flujo Empleando el Equipo Marshall	57
Tabla 16. Resultados ensayo diseño Marshall mezcla Tipo MD-12	61
Tabla 17. Resultados ensayo Marshall Mezcla Asfáltica Convencional vs Modificada con Fibras de polipropileno de Tapabocas al 3%	62
Tabla 18. Tasas de Crecimiento de Tránsito por Localidades	65

Tabla 19. TPDs Proyectados Localidad de Engativá	66
Tabla 20. Número de Ejes Equivalentes 8.2 Ton	67
Tabla 21. Resultados ensayo módulo dinámico mezclas asfálticas	68
Tabla 22. Coeficiente de aporte estructural de las mezclas asfálticas.	69
Tabla 23. Estructuras de Pavimentos Dimensionadas	69
Tabla 24. Costo Desinfección de Tapabocas	71
Tabla 25. Costo Producción Mezcla Asfáltica Convencional	71
Tabla 26. Costo Producción Mezcla Asfáltica Modificada	71
Tabla 27. Evaluación Económica de la Implementación de las Estructuras Asfálticas	72

## Introducción

La evolución positiva en la economía de un país, región, municipio, está directamente relacionada con la facilidad de accesos que éstas tengan con sus diferentes clientes o proveedores y tal como evidencia Durango-Agudelo (2016) la inversión que se realiza en materia de infraestructura vial en Colombia tiene un impacto positivo en su desarrollo económico, dado que un buen sistema de carreteras se convierte en la base para acceder al empleo, la atención médica, la educación y las conexiones sociales, siendo por tanto, un elemento crucial en el desarrollo a nivel local y el crecimiento económico del país como nación en mercados mundiales.

El desarrollo en infraestructura vial se puede traducir entonces, en mayor cantidad de kilómetros de vías, pero en un estado óptimo que permita la comunicación eficiente entre las diferentes regiones del país. Sin embargo, a nivel nacional e internacional, debido a diferentes condiciones como las climáticas, las vías y carreteras suelen verse afectadas, necesitándose entender de primera mano el desempeño de las mezclas asfálticas convencionales, sus características físicas y químicas, agentes que juegan un papel primordial a la hora de constatar su durabilidad y comportamiento, para de esta manera establecer mecanismos de mejora que brinden la posibilidad de aumentar su vida útil y resistencia a las condiciones a las que son sometidas en los diferentes tráficos y que así puedan cumplir eficientemente con su propósito para el desarrollo socioeconómico del país.

Dado lo anterior, el desarrollo de esta investigación profundiza en la práctica de la modificación de mezclas asfálticas, técnica que se ha desarrollado desde hace varios años según lo indica Múnera (2012), dado que la modificación polimérica que data de los años 70,

ha permitido que los diferentes asfaltos alrededor del mundo puedan desarrollar un mejor comportamiento y a su vez puedan cumplir con las solicitaciones a las que se someten. Es así que el propósito es analizar el desempeño físico de una mezcla de asfalto con la adición por vía húmeda de fibras de polipropileno producto del desecho de tapabocas, para lo cual, en primera instancia se realizan ensayos de caracterización y elaboración de la mezcla, para luego realizar las respectivas pruebas de laboratorio, necesarias para evaluar las características físico mecánicas del asfalto, así como las pruebas necesarias para realizar una verificación de los cambios conseguidos en una mezcla asfáltica convencional y otra modificada con fibras de polipropileno, para finalmente y teniendo en cuenta los resultados obtenidos, establecer si el diseño de la mezcla modificada es económicamente viable.

## **1. Generalidades**

### **1.1 Línea y Tipo de Investigación**

La línea de investigación del presente proyecto de grado involucra las áreas de Geotecnia, Materiales, Diseño de pavimentos y Costos.

### **1.2 Planteamiento del Problema**

Las mezclas asfálticas, que consisten en agregados minerales unidos con un ligante bituminoso (Read y Whiteoak, 2003), se utilizan ampliamente como materiales de superficie de carreteras, por su durabilidad y resistencia, sus fortalezas lo convierten en un material muy utilizado para muchas aplicaciones de pavimento y el material preferido para la mayoría de los proyectos de carreteras e infraestructura vial. A pesar de la longevidad del pavimento de asfalto correctamente colocado, como todas las superficies pavimentadas, también es susceptible al deterioro debido a las leyes de la naturaleza, acortando su vida útil, debido a una mala preparación de la superficie y técnicas de construcción o simplemente a una exposición prolongada a los elementos.

Según Cui et al. (2014), el deterioro es natural porque con el tiempo los materiales que componen el asfalto comienzan a descomponerse y se ven afectados por elementos como la lluvia, la luz solar y los insumos químicos que se puedan vertir con la superficie del pavimento. El aglomerante asfáltico líquido que es el pegamento del pavimento comienza a perder su resistencia natural al agua, lo que le permite penetrar dentro y debajo del pavimento y, una vez que esto sucede, la superficie puede caer rápidamente presa de varios tipos diferentes de deterioro.

Es así que, un aspecto que se observa con regularidad, es como los agregados tienden a desprenderse afectando la durabilidad de los asfaltos y, por tanto, la vida útil de las superficies de las carreteras. En este sentido, López (2019) citando a Betancourt (2018), señala que:

La vida útil de las capas asfálticas en las obras viales tiende a ser relativamente corta y a requerir de inversiones económicas elevadas, aunque es dependiente tanto del origen y de la susceptibilidad al deterioro de los asfaltos componentes, como de las características de los procesos empleados para su producción y construcción. (párr. 5)

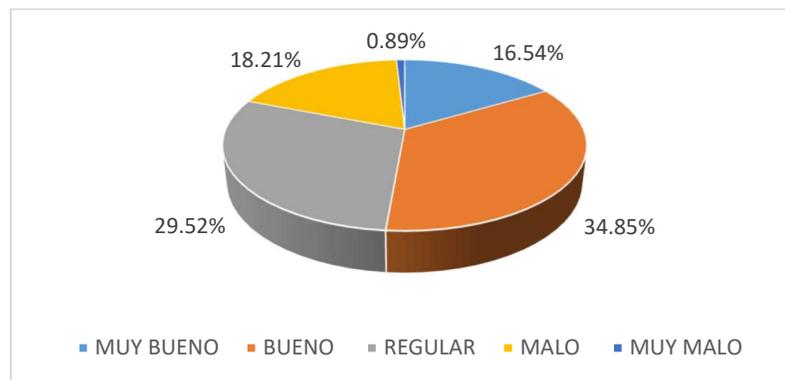
Por otro lado, el deterioro según Vargas y Reyes (2017) se presenta debido a que las propiedades mismas del asfalto van cambiando con el tiempo, por lo que, las especificaciones iniciales para el diseño de infraestructura vial basadas en asfalto, no puede asegurar un buen desempeño soportando esfuerzos mecánicos característicos del transporte, menos aún, cuando éste es mezclado con agregados, resultando en problemas de homogeneidad y estabilidad según la evolución de la composición de la carga de crudos (Álvarez et al., 2019).

Para el caso de Colombia, Cuevas, 2002 y Arenas 2010 citados por Betancourt (2018), explican que “el asfalto colombiano presenta deficiencias como cementante para garantizar la obtención de mezclas asfálticas con desempeño confiable y de larga duración” (p. 31), lo que, generalmente impacta en el deterioro o envejecimiento temprano de los pavimentos flexibles, el cual se deriva entre otras cosas, por procesos de elaboración en caliente y procesos constructivos deficientes. Es así que, en el país, este fenómeno persiste en el comportamiento de la infraestructura vial basada en el asfalto, según López-Plazas, (2019) por el envejecimiento acelerado, el cual también se presenta por las altas temperaturas y la exposición constante a factores climáticos, influyendo en la calidad de las mezclas asfálticas.

Al respecto, una revisión del estado actual de la red vial colombiana se pudo encontrar

publicado por el Instituto nacional de Vías INVIAS (2021), a corte 30 de junio de 2021, la red vial del país se compone de la siguiente manera red pavimentada 9.300,60 kilómetros y red sin pavimentar 2.175,96 kilómetros, según el informe de los principales tramos viales pavimentados el 34.85% está en buen estado, el 29.52% en regular, el 18.21% es malo, el 0,89% es muy malo, mientras que el 16.54% es muy bueno (véase la Figura 1):

**Figura 1. Estado de la Red Vial Pavimentada I Semestre 2021**



Fuente: Instituto Nacional de Vías [INVIAS] (2021). Estado de la Red Vial. Instituto Nacional de Vías.

En este sentido, se tiene que en Colombia esta problemática trata de solucionarse a través del estudio de la implementación de mezclas asfálticas modificadas, las cuales han evolucionado con el transcurso de los años, debido al continuo desarrollo de diferentes tecnologías a nivel mundial para reducir la problemática que se presenta en la ingeniería de pavimentos, pero caso contrario se evidencia al momento de emplear las mezclas modificadas como una opción para los proyectos de infraestructura vial (Figuroa, et al., 2007).

A nivel global existen múltiples tecnologías para la modificación de asfalto y las más empleadas en el sector de la infraestructura vial, son polímeros tales como el estireno-butadieno-estireno (SBS por sus siglas en Inglés) y el Grano de caucho reciclado de llanta (GCR). El SBS es obtenido mediante procesos químicos industrializados y dentro de sus efectos notables están, optimizar su intervalo de plasticidad y disminución de la susceptibilidad térmica mientras que el GCR es producto de un proceso de reciclaje de llantas y sus efectos son similares al SBS, pero con unas dosificaciones mayores (Camargo y Suárez, 2010).

En este sentido, a raíz del inicio de la pandemia mundial ocasionada por el virus SARS-CoV2 (Covid – 19), la demanda de tapabocas ha ido en aumento (Paredes, 2020), lo que ha empezado a generar una problemática en relación a la generación de desechos que según la ONG Oceans Asia llevan a una cifra superior a 1500 millones, residuos que llegan principalmente a fuentes hídricas, provocando una problemática ambiental (Toro, 2021). Teniendo en consideración esto, en aras de reducir el impacto ambiental generado por el uso masivo de los tapabocas, se tiene como propósito evaluar las diferencias que puede presentar una mezcla asfáltica modificada con fibras de polipropileno producto del desecho de los tapabocas, comparando las características físicas de esta mezcla con una mezcla convencional tipo MD-12 producida con asfalto 60-70 de la refinería de Barrancabermeja, como alternativa para el mejoramiento de mezclas asfálticas a emplear en la infraestructura vial colombiana y medida de mitigación del efecto ambiental generado por los desechos de tapabocas.

### ***1.2.1 Pregunta de investigación***

Según lo expuesto en la descripción del problema, se plantea como pregunta de investigación la siguiente: ¿Cuál es el beneficio de utilizar fibras de desechos de tapabocas (polipropileno) como un agente modificador de las mezclas asfálticas?

### ***1.2.2 Variables del Problema***

-  Mezclas asfálticas
-  Condiciones Ambientales.
-  Costos.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Evaluar el desempeño de la adición de fibras de polipropileno producto de desechos de tapabocas en una mezcla asfáltica tipo MD-12 con asfalto de la refinería de Barrancabermeja.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Realizar ensayos de caracterización física de asfalto base 60-70 de la refinería de Barrancabermeja, según normas INVIAS.

Analizar propiedades físicas de asfalto base 60-70 de la refinería de Barrancabermeja adicionando fibras de polipropileno de desechos de tapabocas al 1%, 1.5% y 3%, según normas INVIAS.

Analizar las variables de estabilidad, fluencia, densidad y vacíos de una Mezcla

asfáltica tipo MD-12 convencional y modificada con fibras de polipropileno de desechos de tapabocas modificada con porcentaje óptimo, por vía de los ensayos Marshall.

Comparar las estructuras de pavimento obtenidas para una Mezcla asfáltica Tipo MD-12 convencional y una mezcla asfáltica modificada con fibras de polipropileno de desechos de tapabocas, mediante la utilización de la metodología AASTHO

Analizar la variación de costo- beneficio entre las estructuras diseñadas (convencional y modificada).

### **1.3 Justificación**

Las mezclas asfálticas se encuentran entre los materiales más importante para la construcción de pavimentos, razón por la cual, de manera constante se desarrollan investigaciones que permitan mejorar el desempeño y aumentar la durabilidad de las carpetas asfálticas utilizadas en las carreteras y vías del país.

En este sentido, se ha observado que el uso considerable de agregados naturales para la construcción de vías y, al mismo tiempo, la creciente generación de desechos sólidos, ha llamado la atención de la industria para investigar la viabilidad de la aplicación de algunos de los materiales de desecho en la construcción de pavimentos a base de asfalto, buscando materiales que no solo puedan mejorar las características relacionadas con el rendimiento de la mezcla modificada, sino que también sean fáciles y rápidas de realizar.

Es por lo anterior, que se realiza esta investigación con la cual se busca determinar si el uso de fibras de polipropileno de desechos tapabocas en una mezcla asfáltica mejora su rendimiento, para de este modo, evaluar su aplicabilidad dentro de la industria de las mezclas asfálticas para pavimentos viales; al mismo tiempo que se pueda contribuir con la mitigación

de las afectaciones ambientales que se están presentando por el uso masivo de mascarillas tapabocas desechables para contrarrestar el contagio del virus SARS-CoV-2 (Covid – 19); dado que éstos se han insertado en la cotidianidad de las personas convirtiéndose en un accesorio de uso obligatorio, generando una cantidad de desperdicios que no tienen ninguna aplicabilidad ni ningún tipo de tratamiento para su reutilización.

Por otro lado, a nivel personal, como ingenieros con experiencia en el campo, en aras de ofrecer soluciones viables y sostenibles, desarrollar esta investigación va a permitir tener una aproximación a lo que en un futuro podría ser una realidad, en cuanto a la reutilización de diferentes materiales de desecho en mezclas asfálticas resistentes, de calidad y cuya vida útil no se vea disminuida antes de tiempo, esto teniendo en cuenta que, de acuerdo a las necesidades de pavimentos flexibles más resistentes en las vías, las constantes investigaciones encaminadas a encontrar alternativas para la mejora de las mezclas asfálticas empleando insumos modificadores han demostrado que la adición de modificadores al aglutinante asfáltico mejora sus propiedades para cumplir con las especificaciones que regulan la construcción de vías, lo que hace importante seguir realizando investigaciones como ésta, que encuentren nuevos componentes modificantes para ser usados de manera eficiente.

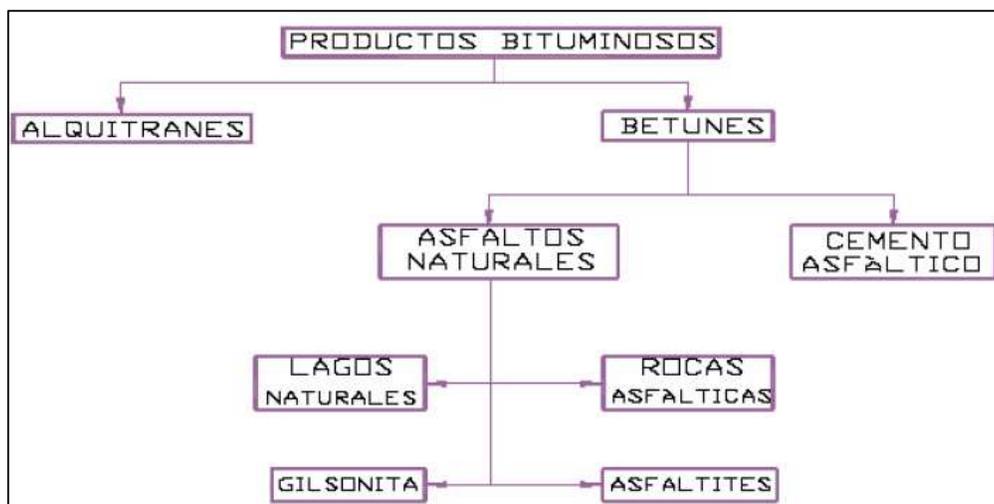
## 2. Marcos de Referencia

### 2.1 Marco Conceptual

#### 2.1.1 Asfalto

El asfalto es “un material similar al petróleo negro o marrón que tiene una consistencia que varía de líquido viscoso a sólido vítreo. Se obtiene como residuo de la destilación del petróleo o de depósitos naturales (véase la Figura 2). El asfalto consta de compuestos de hidrógeno y carbono con proporciones menores de nitrógeno, azufre y oxígeno (Construmine, 2015).

**Figura 2. Productos Bituminosos**

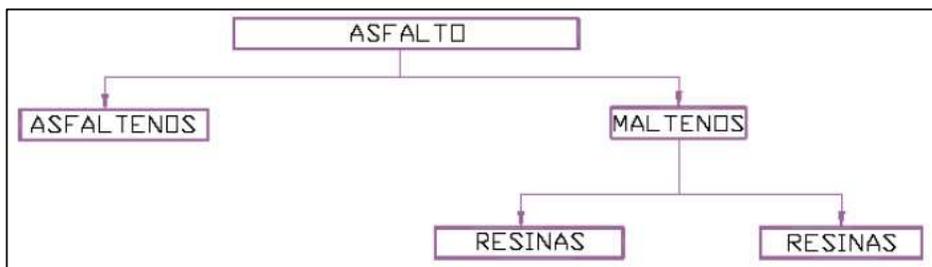


Fuente: Wulf Rodríguez (2008). Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero

El asfalto es, además, “un material termoplástico, que comprende una mezcla de hidrocarburos aglomerante, compuesto por asfaltenos que le dan el color y dureza, y por maltenos que le dan el valor cohesivo” (Galvis, 2006, p. 1) (véase la Figura 3), así mismo, por aceites y resinas, que le otorgan una consistencia aglutinante otorgándole propiedades cementantes a temperatura ambiente normal. Es un material que cuando se somete a altas

temperaturas se ablanda adoptando una consistencia líquida

**Figura 3. Asfalto**



Fuente: Wulf Rodríguez (2008). Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero.

Los elementos que conforman el asfalto hacen posible que éste logre características distintivas como la consistencia, la aglutinación y la ductilidad, adicionalmente, presenta propiedades cementantes a temperatura ambiental normal, aunque puede ser sólido semisólido, se puede ablandar de manera gradual si es calentado, alcanzando una consistencia líquida (Wulf, 2008).

### 2.1.2 Propiedades físicas del asfalto

Según Wulf (2008), el asfalto al ser un líquido viscoso que se compone principalmente por hidrocarburos o sus derivados, se puede clasificar por su composición química y propiedades físicas, sin embargo, comúnmente la industria del pavimento se basa en las propiedades físicas, que son el resultado directo de la composición química del mismo, para realizar la caracterización de su desempeño. De acuerdo con Sierra-Hernández y Mejía-Umbarila (2017) las propiedades físicas del asfalto, más relevantes para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos son:

**Tabla 1. Propiedades Físicas del Asfalto**

<b>Propiedad</b>	<b>Descripción</b>
Consistencia	Se refiere a la dureza del material, la cual depende de la temperatura, a altas temperaturas se considera el concepto de viscosidad para definirla
Durabilidad	Capacidad para mantener sus propiedades con el paso del tiempo y la acción de agentes envejecedores. En general, a medida que un aglutinante de asfalto envejece, su viscosidad aumenta y se vuelve más rígido y quebradizo.
Susceptibilidad Térmica	Variación de sus propiedades con la temperatura. El cemento asfáltico es un material termoplástico se endurece (viscoso) a medida que la temperatura disminuye y se ablanda (fluido) cuando la temperatura aumenta
Reología	La reología es el estudio de la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y en general la deformación y del flujo de la materia, esta última, junto con el flujo de la carpeta de asfalto son importantes en el funcionamiento del pavimento. Los pavimentos de mezcla asfáltica que se deformen demasiado debido al flujo pueden ser susceptibles a llenarse de baches, mientras que los que son demasiado rígidos pueden agrietarse debido a fatiga
Pureza	Definición de su composición química y el contenido de impurezas que posee. Las impurezas no son componentes cementantes activos y pueden ser perjudiciales para el rendimiento del asfalto.
Seguridad	Capacidad de manejar el asfalto a altas temperaturas sin peligros de inflamación, dado que el cemento asfáltico, como la mayoría de los otros materiales, se volatiliza (emite vapor) cuando se calienta, por tanto, el punto de inflamación del cemento asfáltico se prueba y se controla.

Fuente: Chávarri (2010). Equipo de Pavimentación.

### **2.1.3 Envejecimiento del asfalto**

El envejecimiento del asfalto se refiere a una serie de volatilización, oxidación, polimerización y otros cambios bajo la acción de factores ambientales (calor, oxígeno, luz solar y agua). En el proceso de envejecimiento, los componentes ligeros del asfalto se volatilizan y absorben, la estructura molecular cambia, el asfalto se vuelve duro y quebradizo y la propiedad adhesiva se reduce para generar grietas (Zhang , 2019). El envejecimiento del asfalto se manifiesta principalmente por el aumento del punto de ablandamiento y la

disminución de la penetración (Reyes et al., 2013). Aunque el envejecimiento puede mejorar la resistencia a los surcos del pavimento asfáltico a alta temperatura, el rendimiento a baja temperatura y la resistencia a la fatiga se reduce significativamente; por lo tanto, la capacidad de adhesión y unión del pavimento puede empeorar (Bustos et al., 2018). El envejecimiento del asfalto es un proceso gradual y su velocidad afecta directamente la vida útil del pavimento. Por otro lado, se tiene que el envejecimiento del asfalto puede clasificarse en diferentes formas:

**Tabla 2. Tipos de Envejecimiento del Asfalto**

Tipo de Envejecimiento	Descripción
A corto plazo por el proceso de transporte y almacenamiento	El transporte de asfalto es de aproximadamente 170 ° C, el número de asfalto de proceso es grande y la profundidad es grande, por lo que el aire de contacto es pequeño y el grado de envejecimiento es pequeño
A corto plazo por el proceso de mezcla	El envejecimiento del asfalto en este proceso se agravará aún más porque el asfalto en este proceso está completamente en contacto con muchos factores, como el aire.
A corto plazo por el período de construcción	Asfalto desde el transporte hasta la construcción, reducción de temperatura y recuperación a la temperatura natural, pavimentación del sitio, laminado, para que el asfalto envejezca un mayor desarrollo.
Envejecimiento a largo plazo	El envejecimiento a largo plazo del asfalto es un proceso complejo y lento, continuo e ininterrumpido, y los factores de acción son complejos. El grado de envejecimiento aumenta aún más con la influencia de la carga y la temperatura del vehículo.

Fuente: Zhang (2019). Introductory Chapter: Asphalt and Asphalt Mixture, Asphalt and Asphalt Mixtures

Adicionalmente, se observación condiciones que favorecen envejecimiento del asfalto, por ejemplo, cuanto mayor sea la vida útil del pavimento asfáltico, peor será el envejecimiento, el rango de 0.5-1 cm en la profundidad del pavimento vuelve más severo envejecimiento, el tipo de clasificación de mezcla entre otros.

#### **2.1.4 Asfalto Modificado**

El llamado asfalto modificado (mezcla) se refiere a un aglutinante de asfalto hecho de caucho, resina, polímero de alto peso molecular, asfalto natural, polvo de caucho molido u

otro aditivo externo o modificador el cual se refiere a un material orgánico o inorgánico natural o artificial agregado al asfalto, mejorando así el asfalto o el rendimiento de la mezcla de asfalto (Zhang , 2019). Al respecto, Guerrero (2019) explica que un solo modificador tiene un cierto efecto en vida útil de la mezcla asfáltica, pero su capacidad para resistir el envejecimiento, la deformación plástica, la fatiga y otras duraciones es relativamente débil, por lo que el efecto de la modificación no puede cumplir con los requisitos de rendimiento del pavimento existente, por lo tanto, ha surgido el asfalto modificado con compuestos.

En cuanto a la clasificación del asfalto modificado, no existe un estándar de clasificación uniforme en el mundo, y actualmente se clasifica principalmente según la variedad de modificadores utilizados. El asfalto modificado se puede dividir aproximadamente en tres categorías de acuerdo con los diferentes modificadores:

➤ Asfalto modificado con caucho y elastómero termoplástico, incluido asfalto modificado con caucho natural, SBS, caucho de estireno-butadieno, neopreno, caucho de butadieno, caucho de butilo, caucho de desecho y caucho reciclado -asfalto modificado, otro asfalto modificado con caucho (como caucho de etileno propileno, caucho de nitrilo, etc.).

➤ Asfalto modificado de clase de resina sintética y plástica, incluido asfalto modificado con polietileno, polímero de etileno-acetato de vinilo, poliestireno, resina de cumarina, resina epoxi, polímero aleatorio de  $\alpha$ -olefina.

➤ Asfalto modificado con polímeros de tipo resonancia: el asfalto se modifica añadiendo dos o más polímeros al asfalto al mismo tiempo. Los dos o más tipos de polímeros pueden ser dos polímeros de alto peso molecular separados o pueden ser una denominada aleación de polímero que se ha mezclado previamente para formar una red

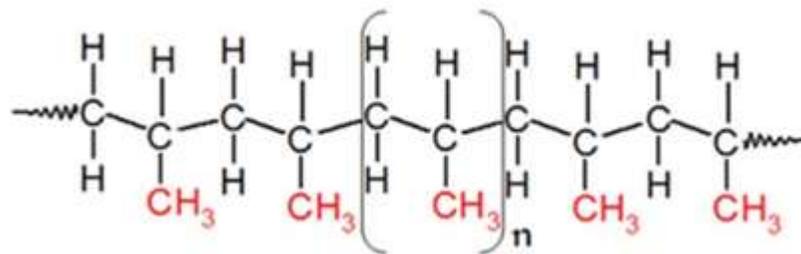
de interpenetración de polímeros. (Zhang , 2019)

Como hidrocarburo polimérico complejo, el asfalto exhibe una viscoplasticidad elástica típica bajo ciertas temperaturas y cargas. El objetivo principal de la adición de modificadores según Guerrero Raga (2019) es mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas a altas y bajas temperaturas (anti-formación de surcos, anti-fatiga, anti-envejecimiento, resistencia al agrietamiento por baja temperatura, etc.).

Ahora bien, de acuerdo con Zhang (2019) el mecanismo de acción del modificador se puede resumir de la siguiente manera: el modificador es suficientemente miscible con el asfalto. En base a esto, el modificador adsorbe los componentes ligeros en el asfalto y se hincha, el modificador de hinchamiento y el resto del asfalto. Los componentes interactúan para formar un nuevo sistema resultante, combinado con las propiedades inherentes del propio modificador para proporcionar una mejora correspondiente en el rendimiento del asfalto. Al mismo tiempo, en el proceso de trituración y bajo la acción del estabilizador o el catalizador, se produce la ruptura de la cadena y la reacción de reticulación, y se forman algunas estructuras de red, de modo que se mejoran la viscosidad y la estabilidad de almacenamiento del asfalto modificado. Por lo tanto, el asfalto modificado es un nuevo material estructural que tiene las características básicas del asfalto y del polímero (Galvis Ariza, 2006).

### ***2.1.5 Polipropileno***

El polipropileno, propeno o metil-etileno, es un compuesto orgánico perteneciente a la familia de los polímeros de poliolefinas, insaturado, termoplástico cristalino, Semi rígido, translúcido, de baja densidad, con buena resistencia química, a la fatiga y a calor, que se produce desde un monómero de propeno y cuya estructura molecular es la siguiente (véase la Figura 4):

**Figura 4. Estructura Molecular del Polipropileno**

Fuente: Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química [INTEC] (2010).

### Polimeros

El polipropileno no presenta problemas de agrietamiento por tensión y ofrece una excelente resistencia eléctrica y química a temperaturas más altas, sus propiedades incluyen además de una densidad más baja, un punto de ablandamiento más alto, ya que éste no se funde por debajo de 160C° ([INTEC], 2010), y una mayor rigidez y dureza (véase la Tabla 3, 4 y 5):

**Tabla 3. Propiedades Físicas del Polipropileno**

Propiedades Físicas	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	D-792	53479	0,91
Resistencia a la tracción (fluencia / rotura)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53455	300 / –
Resistencia a la compresión ( 1 y 2 % def)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-695	53454	80 / 120
Resistencia a la flexión	Kg/cm <sup>2</sup>	D-790	53452	230
Resistencia al choque sin entalla	Kg/cm <sup>2</sup>	D-256	53453	NO ROMPE
Alargamiento a la rotura	%	D-638	53455	600
Modulo de elasticidad (tracción)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53457	11500
Dureza	Shore D	D-2240	53505	71 – 74
Coefficiente de roce estático s/acero		D-1894		–
Coefficiente de roce dinámico s/acero		D-1894		0,30 a 0,45
Resistencia al desgaste por roce				REGULAR
Límite superior de temperatura de trabajo	°C	–	–	100
Límite inferior de temperatura de trabajo	°C	–	–	-40

Fuente: Broncesval (2017). Polipropileno – PP

**Tabla 4. Propiedades Térmicas del Polipropileno**

Propiedades Térmicas	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Calor Específico	Kcal/Kg.°C	C-351	–	0,48
Temperatura de flexión bajo carga (18.5Kg/cm <sup>2</sup> )	°C	D-648	53461	55
Temperatura de uso continuo en aire	°C	–	–	0 a 100
Temperatura de fusión	°C	–	–	160
Coefficiente de dilatación lineal de 23 a 100°	°C	D-696	52752	0,00018
Coefficiente de conducción térmica	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0,19

Fuente: Broncesval (2017). Polipropileno – PP

**Tabla 5. Propiedades Químicas del Polipropileno**

Propiedades Químicas	Unidad
Resistencia a hidrocarburos	Regular
Resistencia a ácidos débiles a temperatura ambiente	Muy buena
Resistencia a álcalis débiles a temperatura ambiente	Muy buena
Resistencia a productos químicos definidos	Consultar
Efecto de los rayos solares	Lo afectan
Aprobado para contacto con alimentos	Si
Comportamiento a la combustión	Arde fácilmente
Propagación de llama	Mantiene la llama
Comportamiento al quemarlo	Funde y gotea
Color de la llama	Azul punta amarilla

Fuente: Broncesval (2017). Polipropileno – PP

Por otro lado, se tiene que el polipropileno es 100% reciclable, su procesamiento incluye principalmente la fusión de los residuos plásticos a 250C° para eliminar los contaminantes, seguida de la eliminación de las moléculas residuales al vacío y la solidificación a casi 140C°. Este PP reciclado se puede mezclar con PP virgen en una proporción de hasta el 50%. Así mismo, su uso se considera seguro porque no tiene ningún efecto notable de la seguridad y salud en el trabajo en términos de toxicidad química (Broncesval, 2017).

### 2.1.6 Fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno son fibras de polímero que se define como fragmentos rectos o deformados de material polimérico extruido, orientado y cortado (Blazy & Blazy,

2021) (véase la Figura 5).

**Figura 5. Fibras de Polipropileno**



**Microfibras de polipropileno**



**Macrofibras de polipropileno**

Fuente: Blazy y Blazy (2021). Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces.

De acuerdo con Blazy y Blazy (2021) se pueden distinguir dos tipos microfibras y macrofibras (véase la Figura 6), que principalmente, difieren en la longitud. Las macrofibras también se denominan fibras estructurales porque son capaces de reemplazar el refuerzo tradicional en forma de barras de acero y transferir cargas que actúan sobre la estructura, por tanto, se ahorra el tiempo necesario para fabricar el refuerzo de acero y, por costes de inversión; su longitud suele oscilar entre 30 y 50 mm. Por otro lado, las microfibras miden menos de 30 mm y no cumplen la función de soporte de carga, su función principal es superar la contracción plástica y limitar la formación de grietas en el pavimento, como resultado, aumentan la durabilidad y prolongan la vida útil del elemento.

Las fibras de polipropileno se pueden obtener de dos formas: mediante la técnica de hilado en fusión y creación de monofilamentos o a partir de una hoja de película de polipropileno que produce fibras fibriladas (Yin et al., 2015). Dependiendo del método de producción, las fibras tienen diferentes propiedades mecánicas, se puede concluir que la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de microfibra de polipropileno es igual a

300 450 MPa y alrededor de 3.8-7.0 GPa, respectivamente. Para la macrofibra de polipropileno, los valores son más altos, 400 760 MPa para la resistencia a la tracción y 3.5–12.0 GPa para el módulo de elasticidad (Blazy y Blazy, 2021).

## **2.2 Marco Teórico**

### ***2.2.1 Mezclas asfálticas***

La mezcla asfáltica es un sistema de dispersión multifásico con estructura de red espacial, que se compone de agregado y aglutinante, y la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica está compuesta principalmente por la resistencia a la fricción interna y la fuerza de incrustación entre las partículas minerales y la fuerza adhesiva entre el cemento asfáltico y el material mineral.

Aunque el desempeño de un solo material en la mezcla asfáltica tiene un rol muy importante en su desempeño, las características de combinación del asfalto y el sistema de composición de agregados en la mezcla asfáltica tienen mayor influencia en el desempeño de ésta. Las propiedades de la mezcla asfáltica incluyen deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento a baja temperatura.

En este sentido, Lijun (2016) explica que la mezcla de asfalto es un material típicamente sensible a la temperatura, es así que ésta funciona de manera diferente, sus características mecánicas y rendimiento operativo cambian drásticamente bajo diferentes condiciones o variaciones de temperatura. Cuando la temperatura es alta, la viscosidad del aglutinante disminuye drásticamente, al igual que la adhesión entre los agregados. Mientras tanto, la rigidez de la mezcla de asfalto también disminuye, y habrá una gran deformación acumulada y permanente bajo cada carga repetida. Por lo tanto, en condiciones donde la

temperatura es elevada, la estructura de mezclas asfálticas presenta compresión y formación de surcos, debido a la viscosidad de éstas. Por otro lado, cuando la temperatura disminuye, a pesar que se incrementa la resistencia de la mezcla asfáltica, también se incrementa el estrés térmico en la misma; en ocasiones también se supera la resistencia del material lo que generalmente, puede causar agrietamiento térmico.

En cuanto a las características o propiedades generales de las mezclas asfálticas, se tiene que éstas cambian según el tipo de mezcla utilizada, sin embargo, las que más interés se tienen en cuenta a la hora de realizar un diseño de pavimento, se tiene la estabilidad que es la resistencia que ésta soporte al paso de las cargas o deformaciones permanentes en determinadas ocasiones tienen que soportar estados tensionales que conducen a deformaciones apreciables no recuperables que comprometen su funcionalidad. En cuanto a la resistencia a la fatiga, es decir la capacidad de soportar la repetición continua de aplicación de carga que va acumulando el deterioro, la flexibilidad teniendo en cuenta que las mezclas asfálticas, dado que éstas hacen parte de los pavimentos flexibles, debe ser capaz de soportar movimientos; la impermeabilidad / drenabilidad la cual entre más arriba se sitúe en la sección estructural debe ser más impermeable para que el agua no se infiltre; resistencia al deslizamiento especialmente en estructuras viales; finalmente la durabilidad que está estrechamente ligada al envejecimiento del ligante, en la medida en que éste pierda sus características debido a elementos ambientales las características de la mezcla asfáltica se va resistiendo por tanto, debe ser sustituida.

### **2.3 Marco Normativo**

En Colombia, los temas relacionados con la infraestructura vial en cuanto a su diseño, estructuración, rehabilitación y mantenimiento, se rige según la normatividad establecida por el

INVIAS, por lo tanto, la presente investigación se realiza teniendo en cuenta las siguientes normas:

**Tabla 6. Normatividad Aplicada para el Diseño de Mezclas Asfálticas**

<b>Norma</b>	<b>Vigencia</b>	<b>Descripción</b>
INVIAS. CAP 4	2013	Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras
Instituto de Desarrollo Urbano IDU	2018	Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C.
INV E-706	2013	Penetración de los materiales bituminosos
INV E-707	2013	Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro)
INV E-709	2013	Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland
INV E-712	2013	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato anillo y bola)
INV E-713	2013	Solubilidad de los materiales asfálticos en tricloroetileno
INV E-717	2013	Determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional
INV E-720	2013	Efectos del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria (RTFOT)
INV E-724	2013	Índice de penetración de los cementos asfálticos (a partir de los ensayos de penetración y punto de ablandamiento)
INV E-726	2013	Estabilidad al almacenamiento de los asfaltos modificados
INV E-727	2013	Recuperación elástica por torsión de asfaltos modificados
ART. 440	2013	Mezcla densa en frío
ART. 442P	2017	Mezcla asfáltica natural

Fuente: elaboración propia

## 2.4 Estado del Arte

La modificación de asfaltos mediante procesos industriales con polímeros naturales y sintéticos datan del año 1943 pero en el continente europeo ya para la década de los 30's existían proyectos piloto con mezclas modificadas (Palma et al., 2016).

Según Reyes (2007) la función principal de la modificación de asfalto es de optimizar las propiedades de las mezclas asfálticas por medio de una serie de aditivos que incrementan su desempeño. Con el transcurrir de los años la investigación relacionada en pro de encontrar diferentes alternativas de agentes modificadores en la mezcla asfáltica para beneficio de esta ha ido en aumento.

En este sentido, se tiene que algunas de las nuevas investigaciones han incluido el uso del PVC como modificador de la mezcla asfáltica y que ha mostrado mejoramiento en la resistencia al ahuellamiento, estabilidad y rigidez, en diferentes temperaturas. Así mismo, existen resultados como la adición de granulo de caucho reciclado como agente modificador, el cual logra que la mezcla asfáltica tenga un mejor comportamiento ante la aparición de ahuellamientos y fisuras superficiales a altas temperaturas y de cargas de alto nivel (Mejía y Sierra, 2017).

En relación a la utilización del polipropileno como un agente modificador de las mezcla asfáltica, el estudio realizado por Srikanth et al. (2019), muestra que la adición del polipropileno por vía húmeda en una dosificación del 3% presenta las mejores condiciones basadas en las propiedades del asfalto modificado, en contraste con la adición del polipropileno por vía seca, en el cual el porcentaje óptimo estaría en 5%, el aumento la dosificación del PP, mostrando como resultado que con estos porcentajes la estabilidad de la mezcla disminuye.

Por otro lado, en una evaluación mecánica conducida por profesionales de diferentes universidades de Egipto, se encontró que la adición del polipropileno incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla, alcanzando su pico con una dosificación del 7%. Adicionalmente, se encontró que incrementar el uso del PP por porcentajes mayores al 5% disminuye la rigidez Marshall (Moubark et al., 2017).

En relación con el empleo de desperdicios del polipropileno en mezclas asfálticas se evidencian que, el porcentaje óptimo de dosificación del PP de desechos en la mezcla por vía húmeda oscila en una dosificación del 4% y por vía seca se incrementa hasta el 8%, encontrándose que en ambos procesos se aumenta la estabilidad de la mezcla (Yeole et al.,

2018).

Finalmente, otra investigación relacionada con la adición del polipropileno reciclado muestran variaciones en diferentes propiedades físicas del asfalto, en términos de penetración la adición del PP, el valor disminuye de 55 a 40, con respecto a la ductilidad esta aumenta de 85 al 159 con una adición del 15% de PP reciclado, evidenciándose una gran adhesión que se traduce en un buen rendimiento en servicio, además de mostrar una viscosidad que incrementa de 195 a 1180 por tanto, hay un aumento en la cohesión (Mahmood et al., 2018).

### 3. Metodología

#### 3.1 Tipo de Investigación

La presente investigación se basa en lo experimental, dado que, a través de ensayos de laboratorio y principios encontrados en el método científico, se analiza el desempeño de las propiedades físicas de una mezcla asfáltica adicionada con un agente modificador para luego ser comparada con las propiedades físicas de una mezcla de asfalto convencional, y así poder establecer si la mezcla modifica cumple con los requisitos establecidos por la normatividad colombiana para ser usada en el diseño de pavimentos asfálticos para carreteras, estableciendo adicionalmente, si el agente modificador permite obtener una mezcla más resistente que prevenga el envejecimiento prematuro de las asfalto alargando su vida útil. Así mismo, se tiene un enfoque cuantitativo, ya que el análisis de resultados se realiza a partir de datos y mediciones numéricas.

#### 3.1 Diseño Metodológico

**Tabla 7. Fases del Trabajo**

<b>Objetivo</b>	<b>Técnica – Instrumento</b>	<b>Resultado Esperado</b>
Objetivo 1	Ensayos de laboratorio según normas INVIAS	Caracterización física del asfalto base 60/70 Caracterización física del asfalto modificado con agente modificador
Objetivo 2	Ensayos de laboratorio según normas INVIAS	Análisis de propiedades físicas asfalto base 60-70 con adición de agente modificador en diferentes porcentajes
Objetivo 3	Ensayos de laboratorio Marshall	Análisis comparativo de variables de estabilidad fluencia, densidad y vacíos de una Mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional y modificada con agente modificador
Objetivo 4	Ensayo de modulo dinámico y diseño con metodología AASTHO Estudio de caso	Análisis de coeficientes de aporte estructural de la mezcla y estructura de pavimento según parámetros establecidos por Transito, CBR subrasante.
Objetivo 5	Índice de costos y presupuesto	Análisis de la variación costo - beneficio de las estructuras convencional y modificada para establecer su viabilidad económica

Fuente: elaboración propia

### 3.2 Alcances y Limitaciones

El alcance de esta investigación incluye

- Presentar resultados de la caracterización de la mezcla asfáltica 60-70 de Barrancabermeja para verificar que ésta es acorde con los requerimientos establecidos por la normatividad INVIAS para mezclas de asfalto
- Resultados pruebas de laboratorio realizadas a las mezclas asfálticas tipo MD-12 convencional y modificada con fibras de polipropileno de desechos de tapabocas al 1%, 1.5% y 3% según variables de estabilidad, fluencia, densidad y vacíos por vía de los ensayos Marshall
- Informe de resultados comparativos de estructuras de pavimento obtenidas para una Mezcla asfáltica Tipo MD-12 convencional y una mezcla asfáltica modificada con fibras de polipropileno de desechos de tapabocas, mediante la utilización de la metodología AASTHO
- Análisis de viabilidad económica para la utilización de mezclas asfálticas tipo MD-12 modificada con fibras de polipropileno de desechos de tapabocas

En cuanto a las posibles limitaciones para el avance de esta investigación se tienen las siguientes:

- Dificultad en la disponibilidad y utilización de los equipos requeridos para realizar los ensayos, teniendo en cuenta las medidas de bioseguridad establecidas por el laboratorio de la empresa de Pavimentos Colombia.
- Recursos económicos para el Transporte del material y realización de ensayos, desde la fuente de origen hasta la entidad para realizar los ensayos de laboratorio
- Escasa información de referencia, respecto a la reutilización de fibras de polipropileno de tabocas desechables usados para comparar resultados obtenidos.
- Recolección y reciclaje de tapabocas.

## 4. Resultados

### 4.1 Consideraciones Previas

#### *4.1.1 Elección de las Materiales y Proceso de Extracción del Agente Modificador*

La modificación de un asfalto base, tiene como propósito obtener mejoras en sus propiedades físicas lo que ayuda a mejorar las características y comportamiento en la mezcla asfáltica, para esto se realiza la selección del tipo de agente modificador a adicionar, teniendo en cuenta las especificaciones relacionadas con el diseño y producción de asfalto:

➤Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, capítulo 4 INVIAS (INVIA, 2018)

➤ Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C., capítulo 3 (IDU, 2018<sup>a</sup>).

Ahora bien, la obtención de la modificación óptima de un ligante asfáltico con un agente modificador, requiere así mismo, seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para ser usado; en esta investigación se empleó un asfalto producido por la refinería de Ecopetrol Barrancabermeja ubicada en el Departamento de Santander - Colombia, cuyas características físicas se relacionan más adelante. Cabe mencionar que los ensayos de laboratorio realizados al asfalto base se llevaron a cabo en el laboratorio de la firma Pavimentos Colombia S.A.S.

Por otro lado, un segundo aspecto de relevancia fue la búsqueda de un agente modificador con base en el polipropileno para ser adicionado al asfalto y que, permitiera modificar las propiedades físicas del aglutinante mejorando sus características al desgaste y resistencia y, de este modo, poder más adelante repicar dicha mezcla.

En este sentido, se tiene que en esta investigación el agente modificador usado para ser adicionado al asfalto base son fibras de polipropileno provenientes del aprovechamiento de

tapabocas desechables, esto con el fin de encontrar una forma de reutilizar los elementos aprovechables de este tipo de elementos antes de realizar su disposición final, con lo cual, no solo se está aprovechando en la modificación de asfaltos, sino como estrategia ambiental para el aprovechamiento de residuos, debido al uso masivo de tapabocas que se viene presentando a raíz de la emergencia sanitaria por evitar el contagio del Covid – 19, como medida de bioseguridad.

Es importante aclarar que en este proceso de extracción de las fibras de polipropileno para el diseño de la mezcla modificada se utilizaron tapabocas sin usar, debido a la dificultad que se presentó al momento de recolectar los tapabocas usados, pues, la normatividad colombiana en relación a la gestión de residuos peligrosos establece que este tipo de elementos al presentar un riesgo biológico tiene unos parámetros para su disposición final. Ahora bien, se conoce que en procesos de desinfección e higienización hospitalaria mediante la utilización de técnicas químicas y físicas, esto permite matar o inhibir virus y bacterias. De acuerdo a esto como primera instancia, se creería que esta sería la mejor opción a realizar; debido a que con un proceso de lavado usando un agente químico y la exposición a una temperatura superior a 60 ° C se lograría una desinfección satisfactoria de los tapabocas a emplear; condición que no está dentro del alcance de esta investigación.

El tratamiento realizado a cada uno de los tapabocas para extraer sus fibras fue:

➤ Primero que todo se retiró las partes de los tapabocas que dentro de sus materias primas no tuvieran polipropileno. (Cintas elásticas en látex de hule natural y el alambre que se encuentra en la parte de la nariz).

➤ Se retiraron las costuras que unen las tres partes de tela cuya materia prima principal fuese de polipropileno.

➤ Se procede a cortar las partes de tela en tiras muy pequeñas para poder ser adicionadas al asfalto base.

#### ***4.1.2 Caracterización Física de un Asfalto Base de Ecopetrol***

Como se mencionó anteriormente los ensayos realizados en esta investigación se realizaron en el laboratorio de Pavimentos Colombia S.A.S., en la actualidad se encuentra certificado bajo la norma internacional ISO 9001:2015 con la firma certificadora BUREAU VERITAS (Anexo B) y acreditado mediante la norma internacional ISO/IEC 17025:2017, de acuerdo con el alcance establecido en el anexo 19-LAB-008 del 20 de marzo de 2020, ante el ente acreditador ONAC – Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (Anexo B). Pavimentos Colombia S.A.S., y que suministró de manera diligente, todos los certificados de calibración y verificación vigentes de los equipos utilizados para los ensayos a la fecha de su realización.

Ahora bien, la caracterización física se realizó al asfalto sin envejecer, mediante los procedimientos de ensayo indicados en las “Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras – 2013”, (INVIAS, 2018, Capítulo 4) del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, mediante los siguientes ensayos y de acuerdo con lo definido en cada una de las normas de ensayo del INVIAS de 2013, que se enumeran a continuación:

➤ **Penetración de los Materiales Bituminosos (INV E – 706 – 13):** en este ensayo se mide la consistencia de los materiales bituminosos sólidos o semisólidos donde el componente principal es el asfalto. Este es basado en la determinación de la consistencia de un material bituminoso la cual se calcula midiendo en décimas de milímetro, la penetración vertical de una aguja normalizada en el asfalto en condiciones determinadas de carga, tiempo y

temperatura. Es importante aclarar que este ensayo se realiza a 25° C, (77° F) en un lapso de tiempo de 5 segundos, con una carga móvil total que incluye la aguja de 100 g (INVIAS, 2018, p. 47 -51), a continuación, se hace el registro fotográfico del ensayo (véase la Figura 6):

**Figura 6. Penetración de los Materiales Bituminosos**



Fuente: elaboración propia

➤ **Densidad de Materiales Bituminosos Sólidos y Semisólidos - Método del Picnómetro (INV E – 707 – 13):** Empleando un picnómetro, este ensayo determina la densidad y la densidad relativa (gravedad específica) de insumos bituminosos semisólidos, cementos asfálticos y alquitranes blandos. Para la realización de este ensayo es necesario un picnómetro calibrado, para lo cual se pesa la muestra y el picnómetro, el volumen remanente del picnómetro debe ser completado con agua y posteriormente se alcanza la temperatura del ensayo para así determinar su masa. Calculando la densidad de la muestra a partir de su masa y de la masa del agua desplazada por la muestra en el picnómetro lleno. (INVIAS, 2018, p. 57 -63). (véase la Figura 7).

***Figura 7. Densidad de Materiales Bituminosos Sólidos y Semisólidos - Método del Picnómetro***



Fuente: elaboración propia

➤ **Puntos de Inflamación y de Combustión Mediante la Copa Abierta Cleveland** (INV E – 709 – 13): en este ensayo se debe determinar los puntos de inflamación y de combustión de productos de petróleo, en el cual se usa una copa abierta de Cleveland de manejo manual. Esta prueba es dinámica y su resultado depende del control de la velocidad a la cual se incrementa la temperatura del producto (INVIAS, 2018, p. 69-72) (véase la Figura 8).

***Figura 8. Puntos de Inflamación y de Combustión Mediante la Copa Abierta Cleveland***



Fuente: elaboración propia

➤ **Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos - Aparato de Anillo y Bola** (INV E – 712 – 13): para este ensayo se debe hallar el punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30 a 157° C (86 a 315° F), y se debe usar el aparato de anillo y

bola sumergido en agua destilada (30 a 80° C) o en glicerina USP (más de 80 hasta 157° C). El punto de ablandamiento es la temperatura (grados Celsius) medida en el líquido del baño, en el instante en el que se produce el contacto entre la masa bituminosa y la placa de referencia (INVIAS, 2018, p. 105-107). (véase la Figura 9).

**Figura 9. Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos - Aparato de Anillo y Bola**



Fuente: elaboración propia

➤ **Efecto del Calor y del Aire sobre el Asfalto en Lámina Delgada y Rotatoria**

**(INV E – 720 – 13):** Este ensayo es usado para medir el efecto del calor y del aire sobre una lámina delgada de materiales asfálticos semisólidos en movimiento, cuyos efectos se determinan a partir de la medición de ciertas propiedades del asfalto, antes y después del ensayo, como son la penetración a 25 °C (norma INV E–706), el punto de ablandamiento con anillo y bola (norma INV E– 712) y la viscosidad a 60 °C del asfalto residual y el asfalto original, empleando un viscosímetro rotacional (norma INV E–717).

Para la realización de esta prueba se usa una película de material asfáltico en movimiento a calentamiento durante 85 minutos en un horno a 163 °C, lo anterior con el fin de medir los efectos que producen el calor y el aire sobre el material asfáltico y así determinar los cambios experimentados en los valores de los ensayos físicos efectuados antes y después del tratamiento en el horno (INVIAS, 2018, p. 195-196). (véase la Figura 10):

**Figura 10. Efecto del Calor y del Aire sobre el Asfalto en Lámina Delgada y Rotatoria**

Fuente: elaboración propia

## 4.2 Análisis de las Propiedades Físicas de la Mezcla Convencional y Modificada con Adición de Fibras de Polipropileno de Desechos de Tapabocas al 1%, 1.5% y 3%

### 4.2.1 Elaboración del Asfalto Modificado con la Adición de Polipropileno de Desecho de Tapabocas

Para el proceso de elaboración del asfalto modificado por la vía húmeda, adicionando fibras de tapabocas de polipropileno, se realiza la clasificación por peso, en recipientes metálicos resistentes a altas temperaturas donde es vertido el asfalto base; así mismo se realiza la clasificación por peso según la proporción a incorporar del agente modificador (fibras de tapabocas) las cuales fueron al **1%**, **1.5%** y **3%** respectivamente, siendo vertidas en recipientes cerámicos (véase la Tabla 8).

**Tabla 8. Equivalencias % en peso adición de fibras de tapabocas**

Modificación	Cantidad Fibras de Tapabocas	Número de Tapabocas Usado	Cantidad de Asfalto 60/70 (g)	Cantidad de Asfalto 60/70 (litros)	Cantidad Total de Asfalto Modificado (g)
1.0%	10	3.57	990	0.974	1000
1.5%	15	5.36	985	0.969	1000
3.0%	30	10.71	970	0.955	1000

Nota: Peso de un Tapabocas = 2.8g

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, y una vez se tiene separados los diferentes recipientes se procede a

realizar la modificación del asfalto base en cada una de las proporciones escogidas para incorporar por la vía húmeda, teniendo presente que el proceso de modificación se realiza bajo las mismas condiciones, involucrando las variables de tiempo y temperatura.

En este proceso se lleva a cabo el calentamiento del asfalto a una misma temperatura, y se somete al mismo tiempo de agitación para cada muestra, en la cual el asfalto y las fibras de polipropileno se encuentran en una etapa de incorporación, garantizando así que dicho proceso se esté realizando bajo las mismas condiciones para cada uno de los pesos escogidos para ser adicionados como agentes modificadores. Ahora bien, durante el proceso de mezclado del asfalto base se realiza la agitación mecánica con varillas de corte, como se puede observar en la Figura 11.

***Figura 11. Proceso de Agitación del Asfalto Base de la Refinería de Barrancabermeja***



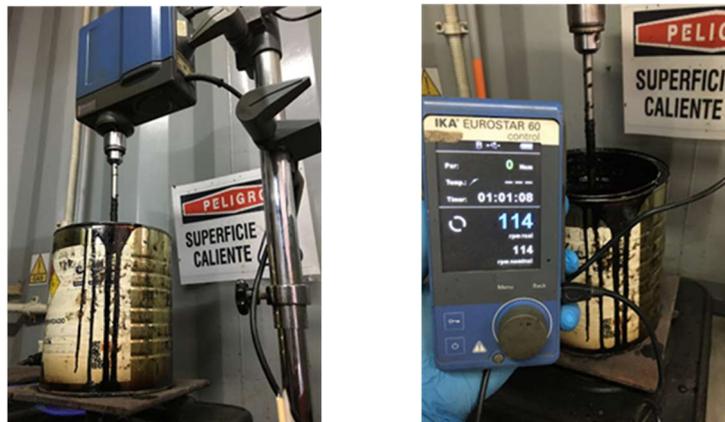
Fuente: elaboración propia

Durante el proceso cada recipiente metálico fue sometido a una temperatura de mezclado que oscilaba entre 170 °C y 180 °C, temperaturas a las cuales se realiza la fusión de las fibras de polipropileno que fueron adicionadas al asfalto base como agente modificador. Es importante mencionar que a una temperatura por encima de los 200 °C podría provocar la degradación de las fibras y la oxidación del ligante asfáltico y que éstas no se funden por debajo de los 160°C ([INTEC], 2010), por tal razón la temperatura máxima de agitación para

el caso de estudio de esta investigación fue de 180 ° C máximo.

Luego de ubicar el recipiente metálico sobre una plancha de calentamiento y que el asfalto base llegara a la temperatura óptima indicada, se procede a realizar la agitación mecánica por medio del agitador de hélice durante 30 minutos, esto con el fin de obtener una homogenización del asfalto base (véase la Figura 12). Una vez verificado que el asfalto se encuentra en las condiciones adecuadas se procede a la adición de las fibras de tapabocas las cuales se constituyen como agente modificador, teniendo en cuenta de efectuar este proceso de manera paulatina, se divide la proporción de fibras en tres partes iguales las cuales se adicionan en intervalos de 15 minutos hasta alcanzar la adición total de los porcentajes estimados.

**Figura 12. Agitación Mecánica del Asfalto**



Fuente: elaboración propia

Luego de completar el proceso de mezclado de la totalidad de las fibras, se procede a realizar la prueba de la incorporación del polímero en el asfalto, la cual se lleva a cabo tomando una muestra del asfalto que se encuentra en proceso de modificación, que es llevada a un recipiente con agua a una temperatura de 25° C, esto con el fin de bajar la temperatura del compuesto, para posteriormente realizar un estiramiento de la mezcla para verificar a contra luz si las fibras se encuentran incorporadas con el asfalto y no se presentan grumos que muestren

que el agente modificador no se encuentra incorporado en su totalidad (véase la Figura 13). En este caso, esta prueba se realizó en intervalos cada hora, hasta lograr una inclusión total de las fibras de tapabocas, obteniendo la homogeneidad del asfalto modificado fabricado luego de cuatro horas de proceso de agitación de la mezcla. Cabe mencionar que, para futuros ensayos, los tiempos de mezclado pueden variar, dependiendo del proceso de homogeneización a utilizar.

**Figura 13. Comprobación de la Incorporación del Polímero Modificador en el Asfalto Base**



Fuente: elaboración propia

Una vez finalizado el tiempo de mezclado, la mezcla está lista para el muestreo; para tal fin es importante aclarar que, una vez obtenida esta mezcla, se puede proceder a la realización de las pruebas pertinentes relacionadas a las propiedades físicas de la misma. En este aspecto,

se debe tener sumo cuidado en los procesos de enfriamiento y recalentamiento, así como durante el proceso de agitación, para no alterar las propiedades de las mezclas, dado que se podrían obtener datos erróneos sobre el comportamiento de éstas.

#### ***4.2.2 Comparación de las Características Físicas de los Asfaltos Base y Modificado con Fibras de Tapabocas de Desecho al 1%, 1.5% y 3%.***

Parte de los objetivos de la investigación están orientados al análisis de la variación física que experimenta un asfalto convencional al ser modificado con fibras de polipropileno de tapabocas al 1%, 1.5% y 3%, cuyo propósito es lograr características en la mezcla asfáltica que mejoren su comportamiento y aumenten el tiempo de envejecimiento del asfalto. Estas características fueron verificadas mediante la realización de los siguientes ensayos:

***Tabla 9. Ensayos de Verificación de Características Físicas de Mezclas Asfálticas***

<b>Características del Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma de Ensayo</b>
Penetración de los materiales bituminosos	0.1 mm	INV E-706:2013
Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.		INV E-707:2013
Punto de Inflamación	°C	INV E-709:2013
Punto de Combustión	°C	INV E-709:2013
Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola)	°C	INV E -712:2013
Penetración de los materiales bituminosos luego de la pérdida por calentamiento, en % de la penetración original.	%	INV E-706:2013
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento.	°C	INV E -712:2013
Recuperación Elástica por Torsión	%	INV E -727:2013

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a lo establecido anteriormente, para la modificación con fibras polipropileno de tapabocas y enmarcados en los diferentes porcentajes de adición de agente modificador usados para esta investigación, se resumen los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio de Pavimentos Colombia S.A.S, con los cuales se verifica la

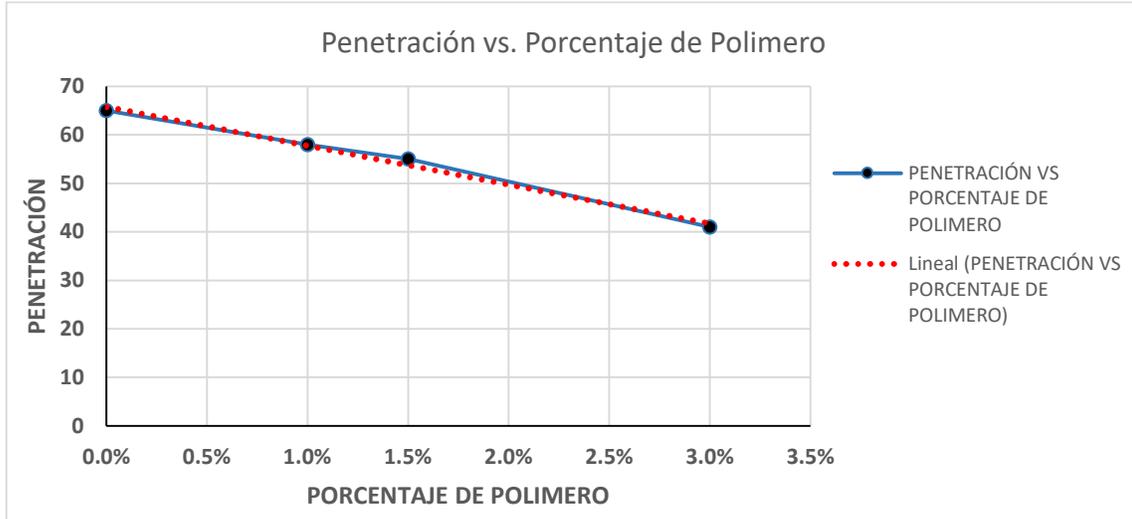
incidencia que tuvo de la adición de las fibras de tapabocas en proporciones de 1%, 1.5% y 3% en el asfalto (véase la Tabla 10):

**Tabla 10. Resultados Ensayos de Verificación de Características Físicas de Mezclas Asfálticas**

Tipo de Ensayo	Unidad	Norma	Tipo de Asfalto			
			Asfalto Base	Asfalto Mod. 1.0%	Asfalto Mod. 1.5 %	Asfalto Mod. 3 %
Penetración de los materiales bituminosos	0.1 mm	INV E-706:2013	65	58	55	41
Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.		INV E-707:2013	1012.9	1013.8	1012.9	1012.7
Punto de Inflamación	°C	INV E-709:2013	305	305	304	306
Punto de Combustión	°C	INV E-709:2013	326	320	321	322
Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola)	°C	INV E -712:2013	48	55	59	62
Penetración de los materiales bituminosos luego de la pérdida por calentamiento, en % de la penetración original.	%	INV E-706:2013	60	70	71	72
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento.	°C	INV E -712:2013	5	5	5	4
Recuperación Elástica por Torsión	%	INV E -727:2013	N/A	11	12	15

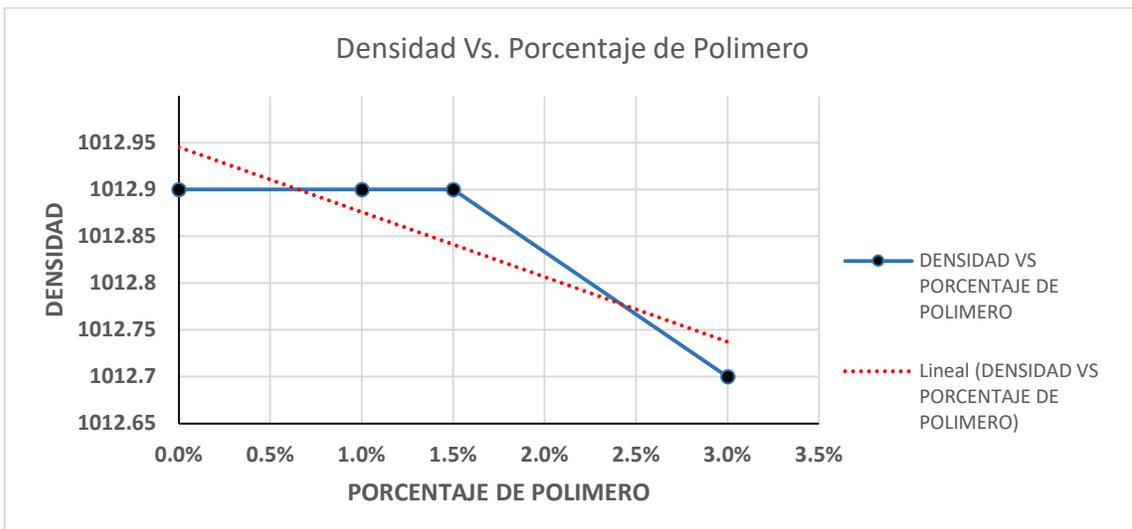
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos se evidencia como a medida que se va incorporando el polímero del agente modificador a la mezcla asfáltica, la penetración baja en su valor, haciendo que el asfalto adquiera una mayor consistencia, es decir, es más resistente a las altas temperaturas de trabajo (véase la Figura 14):

**Figura 14. Penetración Vs. Porcentaje de Polipropileno**

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, la Figura 15 muestra como al incorporar polímero modificador a la mezcla con el asfalto, la densidad del asfalto no presenta una variación significativa a pesar del pico presentado en el valor correspondiente a la adición de polímero del 1%.

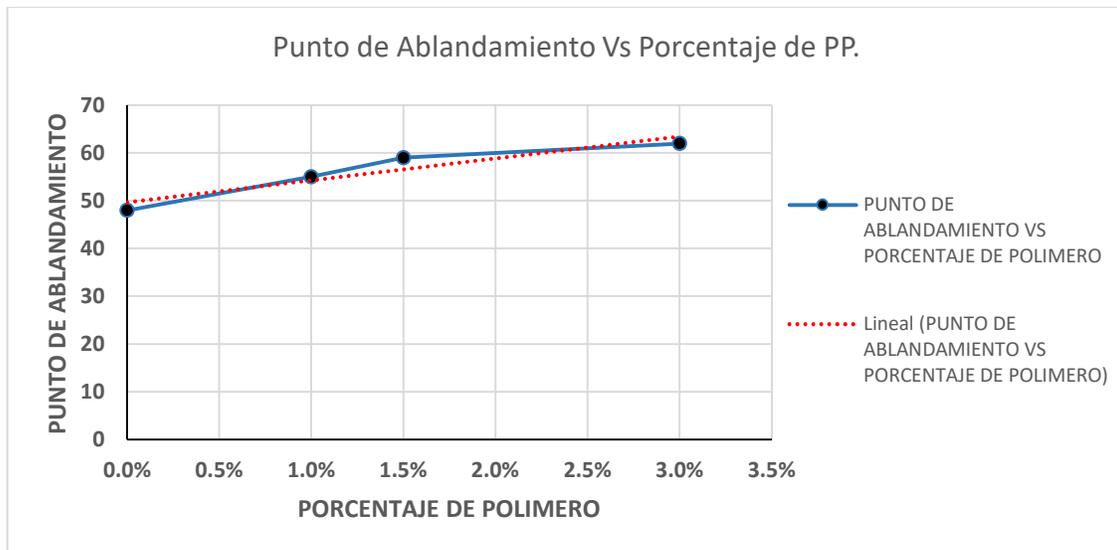
**Figura 15. Densidad vs Porcentaje del Polipropileno**

Fuente: elaboración propia

Así mismo, se pudo observar que, a medida que se incrementa gradualmente el polímero modificador a la mezcla con el asfalto, el punto de ablandamiento aumenta

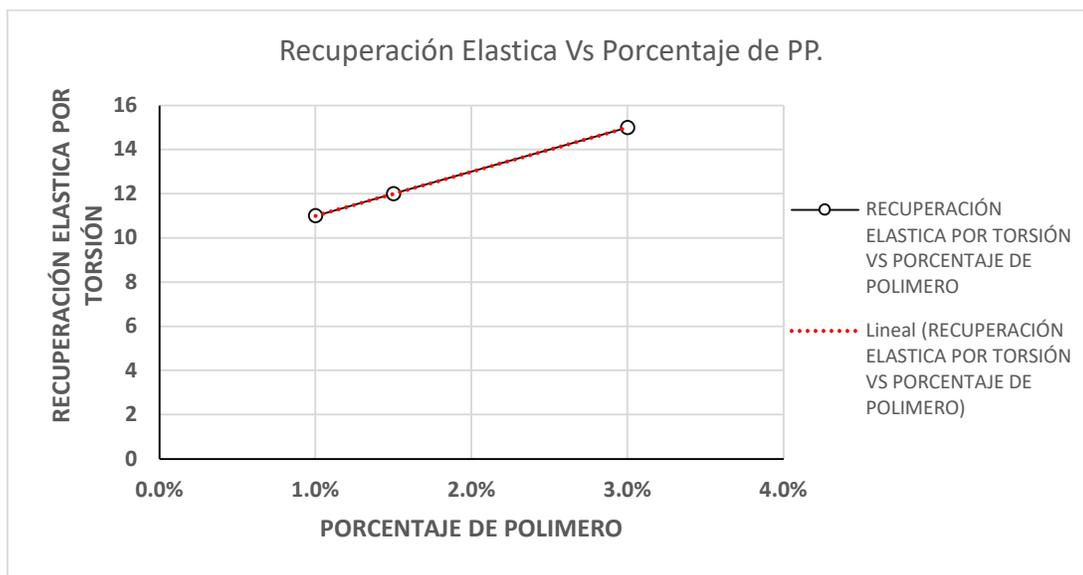
considerablemente, adoptando una mayor consistencia, otorgándole a la mezcla una mayor resistencia a altas temperaturas de trabajo, condición que a su vez contrarresta la cualidad que tienen los cementos asfálticos a fluir cuando están sometidos a temperaturas elevadas durante su vida expuesta al tráfico (véase la Figura 16):

**Figura 16. Punto de Ablandamiento vs Porcentaje del Polipropileno**



Fuente: elaboración propia

En cuanto al parámetro de la recuperación elástica por torsión, los resultados mostraron que, con la adición de los porcentajes de fibras de polipropileno de tapabocas al 1%, 1.5% y 3% al asfalto base convencional de penetración 60-70, proveniente de la refinería de Ecopetrol Barrancabermeja (Santander – Colombia), éste desarrolló una recuperación elástica por torsión a 25°C – 30 minutos del 15% con una adición de fibras de polipropileno de tapabocas al 3% (véase la Figura 17), por tanto, se puede pensar que este tipo de asfalto tiene características similares a las de un asfalto modificado con polímeros SBS, otorgándole parámetros similares a los de un asfalto tipo IV modificado.

**Figura 17. Recuperación Elástica por Torsión vs Porcentaje del Polipropileno**

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta lo establecido por el IDU (2018) en su capítulo 2 especificación 203-18, mediante la cual establece tres tipos de cementos asfálticos en función de su clasificación por viscosidad (CA 24, CA 14 y CA 8), en la Tabla 11 se observa que los resultados obtenidos para el asfalto modificado con el 3% de adición de fibras de polipropileno de tapabocas de desecho, se comporta muy similar a un asfalto tipo V; siendo uno de los parámetros de más importancia la recuperación elástica por torsión a 25°C, en la cual se obtuvo un resultado de 15%, encontrándose dentro del mínimo del rango exigido por el IDU (2018).

**Tabla 11. Comparación Mezcla Modificada al 3% según Clasificación Cementos Asfálticos Según Grado de Viscosidad del IDU**

Tipo de Ensayo	TIPO DE ASFALTO							Asfalto Mod. 3%
	NORMA	TIPO I	TIPO II a	TIPO II b	TIPO III	TIPO IV	TIPO V	
Penetración (25°C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	55-70	40-70	55-70	55-70	80-130	15-40	41
Punto de Ablandamiento, °C, mínimo.	E-712	58	58	58	65	60	65	62
Ductilidad (5°C, 5 cm/min), cm, mínimo	E-702	-	15	15	15	30	-	-
Recuperación elástica por torsión a 25°C, % mínimo.	E-727	15	40	40	70	70	15	15
Estabilidad al almacenamiento (Nota 1) - Diferencia en el punto de ablandamiento, °C, máximo	E-726 Y E-712	5	5	5	5	5	5	
Contenido de agua, %, máximo	E-704	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland, °C, mínimo	E-709	230	230	230	230	230	230	

Fuente: elaboración propia

### 4.3 Análisis de Variables de Estabilidad, Fluencia, Densidad y Vacíos de la Mezcla Asfáltica Tipo MD-12 Convencional y Modificada con Fibras de Polipropileno de Tapabocas

#### 4.3.1 Ensayos Marshall Mezcla Asfáltica Convencional y Modificada

Para analizar los parámetros de fluencia y estabilidad se realizaron los ensayos Marshall para la mezcla asfáltica convencional tipo MD-12 y para las mezclas modificadas con las fibras del polipropileno al 1.0%, 1.5 % y 3.0 %. Para esto se llevó a cabo la verificación del porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla tipo MD-12 y a partir de este valor se prepararon las probetas para los diferentes porcentajes de adición de fibras.

Por otro lado, para evaluar el comportamiento que presenta la mezcla asfáltica con adición de fibras de polipropileno al 3%, se tomó como base el diseño de una mezcla asfáltica convencional tipo MD-12.

##### 4.3.1.1 Determinación del agregado para la mezcla

Para el diseño de la mezcla se seleccionó una granulometría para los agregados de las muestras Marshall, que cumplieran con las características de la Tabla 12 las cuales son establecidas por las Especificaciones Técnicas del IDU.

**Tabla 12. Granulometría de Agregados ET-IDU**

Tipo de Mezcla	Granulometría de Agregados									
	Tamiz (mm/U.S. Standard)									
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
MD-12	-	-	100	80-95	71-87	49-65	30-44	14-22	8-16	4-9

Fuente: Elaboración Propia

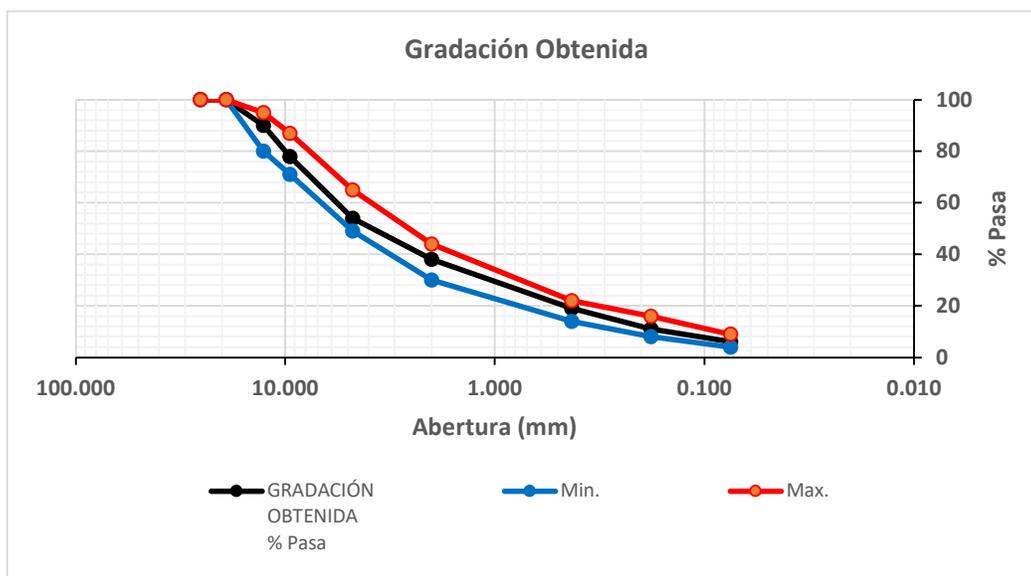
Para este diseño se emplearon agregados de dos fuentes, la fuente del río Guayuriba y la fuente del río Coello, las cuales se distribuyeron como se muestra en la Tabla 13, para ajustarse a las especificaciones del Tipo de Mezcla.

**Tabla 13. Dosificación de Agregados para el Diseño de la Mezcla Asfáltica**

Tamiz Abertura (mm)	Dosificación de Agregados % en Masa				Gradación Obtenida % Pasa	Mínimo E.T.	Máximo E.T.
	24.00%	18.00%	35.00%	23.00%			
	Fuente Río Guayuriba	Fuente Río Guayuriba	Fuente Río Coello	Fuente Río Coello			
	Grava 11/16"	Grava 7/16"	Arena Triturada T1	Arena Triturada T2			
25.400	100	100	100	100	100	100	100
19.100	100	100	100	100	100	100	100
12.700	57	100	100	100	90	80	95
9.500	19	91	100	97	78	71	87
4.760	3	19	88	83	54	49	65
2.000	2	5	61	68	38	30	44
0.430	1	3	31	32	19	14	22
0.180	1	3	19	15	11	8	16
0.075	0.7	1.1	11.1	8.1	6.1	4	9

Fuente: elaboración propia

**Figura 18. Gradación Obtenida**



Fuente: elaboración propia

Una vez se verificó que la gradación escogida cumpliera con los requisitos de las

especificaciones técnicas se procedió a preparar las muestras para realizar la verificación del porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla convencional.

**Figura 19. Proceso de Preparación de la Mezcla Asfáltica**

Fuente: elaboración propia

Se elaboraron quince probetas con diferentes porcentajes de asfalto en grupos de 3 probetas para cada porcentaje, para una mezcla convencional con cemento asfáltico 60-70 de la refinería de Barrancabermeja a una temperatura de mezcla entre  $148\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 155\text{ }^{\circ}\text{C}$  y se realizaron 75 golpes por cada una de las caras a una temperatura de compactación que oscilaba entre  $138\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 20. Proceso de Elaboración de Probetas para el Ensayo Marshall**

Fuente: elaboración propia

Para cada una de las probetas realizadas se obtuvo las siguientes características (véase la Tabla 14):

**Tabla 14. Características de las Probetas de Mezcla Asfáltica**

Características	Probetas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>% Asfalto Probeta</b>	4.5	4.5	4.5	5.0	5.0	5.0	5.5	5.5	5.5	6.0	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5
<b>Masa Seca (%)</b>	1174.60	1176.20	1181.40	1170	1173	1172	1202	1182.6	1194.6	1176.3	1193.1	1184.5	1183.7	1184.5	1181.9
<b>Masa SSS en el aire (g)</b>	1180.4	1181	1186	1174	1178	1176	1204	1184.5	1196.7	1177.6	1194.5	1185.3	1184.3	1185.6	1182.7
<b>% De Agua absorbida por volumen</b>	665.80	666.60	668.50	664.60	668.80	666.90	683.60	672.80	680.50	669.90	679.30	675.00	672.80	674.60	671.90
<b>% De Agua absorbida por volumen</b>	1.1	1	1	1	0.8	0.7	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2
<b>Volumen</b>	514.6	514.7	517.8	509	508.8	509.3	519.9	511.7	516.2	507.7	515.2	510.3	511.5	511	510.8
<b>Gbm</b>	2.283	2.285	2.282	2.299	2.306	2.302	2.312	2.311	2.314	2.317	2.316	3.321	2.314	2.318	2.314
<b>Densidad g/cm<sup>3</sup></b>	2.276	2.278	2.275	2.292	2.299	2.295	2.305	2.304	2.307	2.31	2.309	2.314	2.307	2.311	2.307

Fuente: Elaboración propia

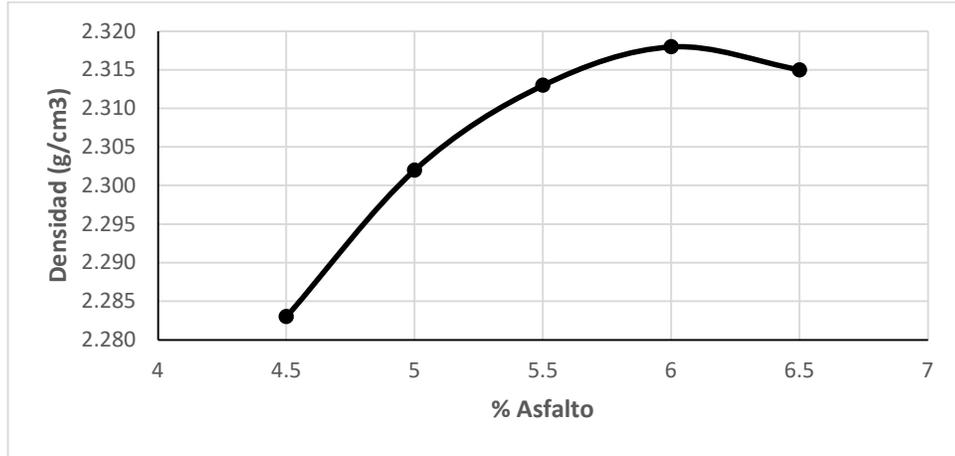
Con la realización de los ensayos Marshall se analizó el comportamiento de las probetas que se sometieron a cargas monotónicas con los diferentes contenidos de asfalto. Pevio a la realización del ensayo como indica la norma INV E-748-13, las probetas se pasaron por baño maría durante 30 minutos con una temperatura controlada de  $60^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Posterior a este procedimiento las probetas se sometieron a esfuerzos para obtener los resultados de flujo y estabilidad, con el cual se obtiene el porcentaje óptimo de asfalto a emplear en la mezcla asfáltica. En la Tabla 15 se resumen los resultados obtenidos con los cuales se puede determinar el porcentaje de asfalto óptimo para el tipo de mezcla seleccionado.

**Tabla 15. Determinación de la Estabilidad y Flujo Empleando el Equipo Marshall**

		Probetas														
Características	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Espesor (cm)	6.3	6.3	6.4	6.3	6.3	6.3	6.5	6.4	6.4	6.3	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	
Carga corregida (kg)	1172	1194	1153	1446	1419	1500	1522	1629	1630	1645	1690	1734	1549	1557	1611	
Flujo Marshall (mm)	2.5	2.3	2.5	2.8	3.0	2.8	3.0	3.3	3.3	3.6	3.6	3.8	4.3	4.3	4.6	
Relación E/F	456	518	454	511	460	531	513	496	504	460	483	458	361	363	353	

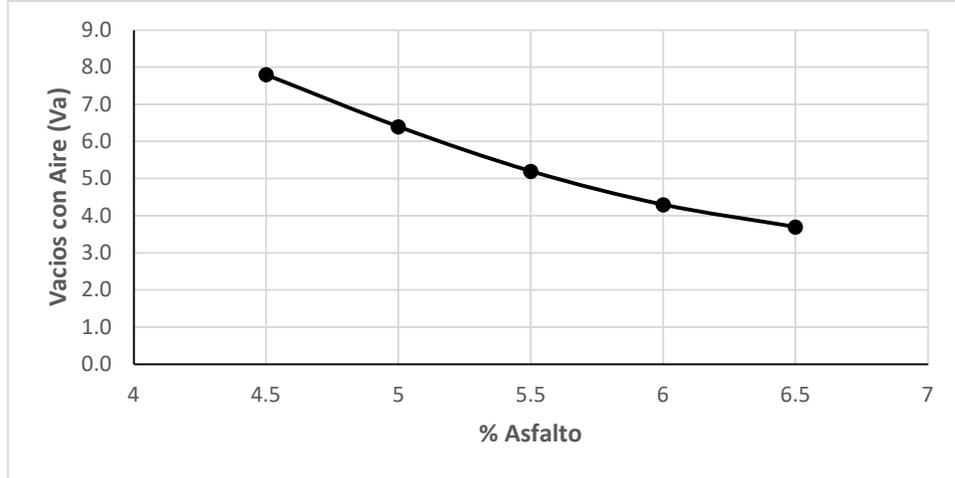
Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan las gráficas producto del ensayo Marshall para la mezcla Tipo MD-12 (véase la Figura 21):

**Figura 21. Densidad vs % Asfalto-Diseño Marshall**

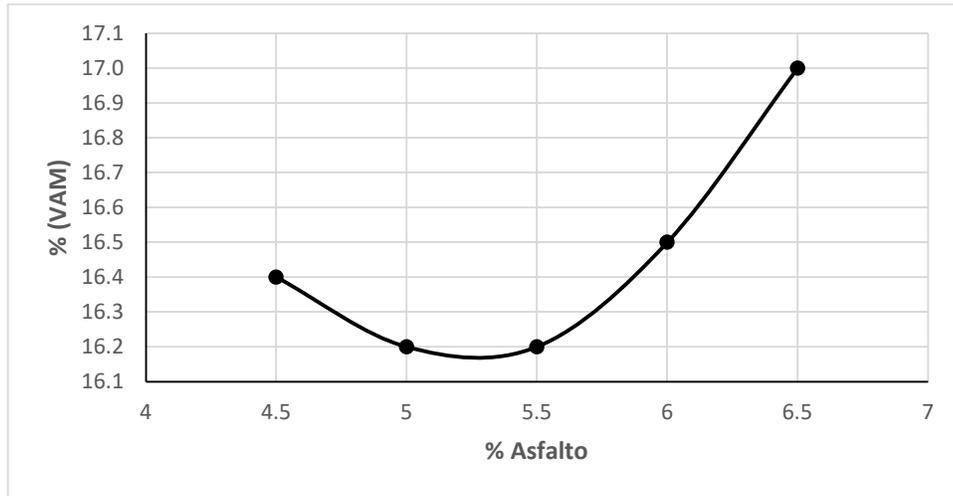
Fuente: elaboración propia

En la Figura 22, se encontró que la densidad máxima se encuentra al 6% de asfalto con un valor de 2.318 g/cm<sup>3</sup>.

**Figura 22. %Vacíos con Aire vs % Asfalto-Diseño Marshall**

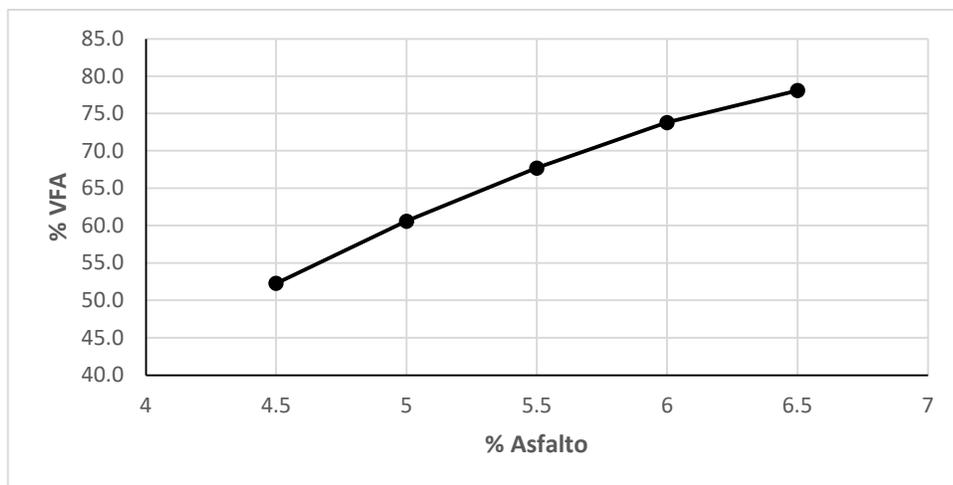
Fuente: elaboración propia

En la Figura 23, se encontró que el porcentaje de vacíos con aire mayor se encuentra al 4.5% de asfalto con un valor de 7.8%.

**Figura 23. %Vacíos en el Agregado Mineral vs % Asfalto-Diseño Marshall**

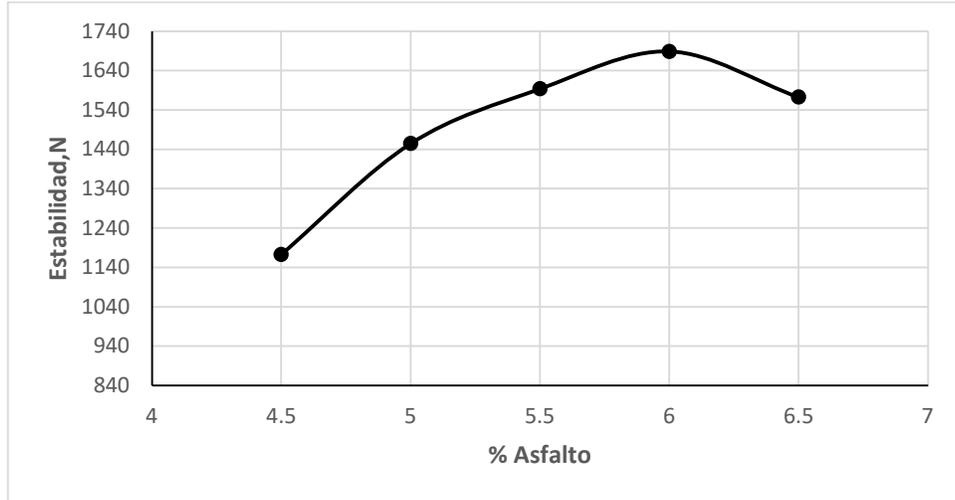
Fuente: elaboración propia

En la Figura 24, se encontró que el porcentaje menor de vacíos en el agregado mineral se encuentra al 5.5% de asfalto con un valor de 16.2%.

**Figura 24. %Vacíos Llenos con Asfalto vs % Asfalto-Diseño Marshall**

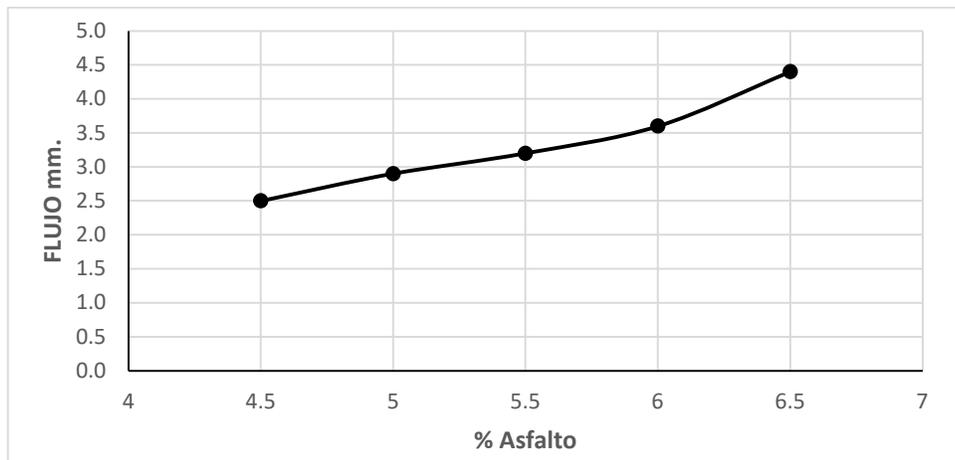
Fuente: elaboración propia

En la Figura 25, se encontró que el porcentaje menor de vacíos llenos con asfalto se encuentran entre 52.3 % -78.1 %.

**Figura 25. Estabilidad vs % Asfalto -Diseño Marshall**

Fuente: elaboración propia

En la Figura 26, se encontró que el mayor valor de estabilidad está a 1689 N para un porcentaje de asfalto de 6%.

**Figura 26. Flujo vs % Asfalto -Diseño Marshall**

Fuente: elaboración propia

En la Figura 27, se encontró que el mayor valor de flujo está a 4.4 mm para un porcentaje de asfalto de 6.5%.

**Tabla 16. Resultados ensayo diseño Marshall mezcla Tipo MD-12**

Valores Obtenidos para diferentes dosificaciones						
% Asfalto	Gravedad Espe. Bulk Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	% Vacíos con Aire Va	% de vacíos en el agregado Mineral VAM	% Vacíos Llenos de asfalto VFA	Estabilidad Marshall N	Flujo Marshall en mm
4.5	2.283	7.8	16.4	52.3	1173	2.5
5	2.302	6.4	16.2	60.6	1455	2.9
5.5	2.313	5.2	16.2	67.7	1594	3.2
6	2.318	4.3	16.5	73.8	1689	3.6
6.5	2.315	3.7	17.0	78.1	1573	4.4

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla MD-12 convencional es de **5.6%**. Con este resultado se procede a realizar las briquetas para la mezcla asfáltica modificada con fibras de polipropileno al 3%.

#### **4.3.1.2 Análisis de Comportamiento de Mezcla Asfáltica Convencional vs. Modificada**

Ahora bien, para analizar la variación de estabilidad y el flujo de mezcla asfáltica con adición de fibras de polipropileno de tapabocas al 3%, se elaboraron dos briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto encontrando para la mezcla MD-12 convencional (5.6 %), éstas a su vez se compararon con los resultados obtenidos con la mezcla convencional (véase la Tabla 17):

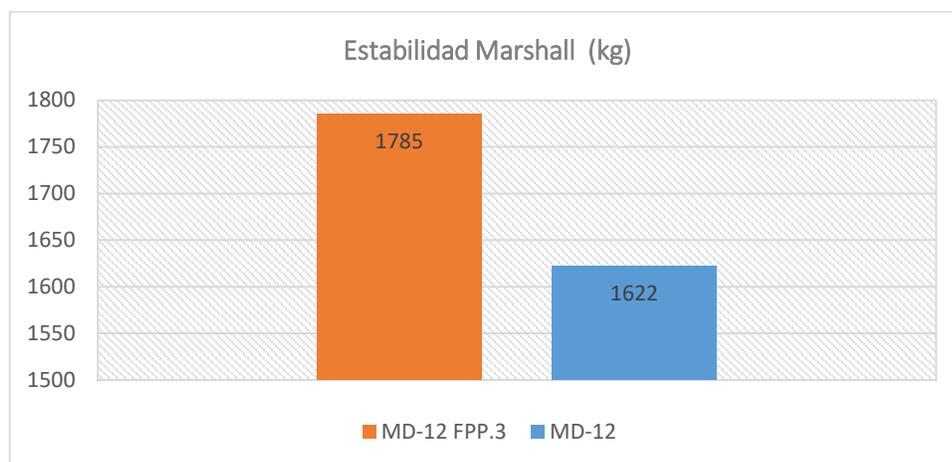
**Tabla 17. Resultados ensayo Marshall Mezcla Asfáltica Convencional vs Modificada con Fibras de polipropileno de Tapabocas al 3%**

Características	Norma INVIAS	Especificación		Resultado Obtenido	
		Mínimo	Máximo	MD-12	MD-12 FPP.3
Compactación (golpes/cara)		75	75	75	75
Contenido de asfalto añadido			-	5.6	5.6
Estabilidad mínima (kg)	E-748	900		1622	1785
Flujo (mm)	(E-800)	2.0	3.5	3.3	3.4
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)		300	600	491	456
Gravedad específica bulk	E-733	-	-	2.315	2.258
Densidad g/cm <sup>3</sup>	E-733	-	-	2.308	2.251
Gravedad específica máxima Gmm g/cm <sup>3</sup>	E-735	-	-	2.437	2.444
Vacíos con aire (Va), %	E-736 E-799	4	6	5	5.6

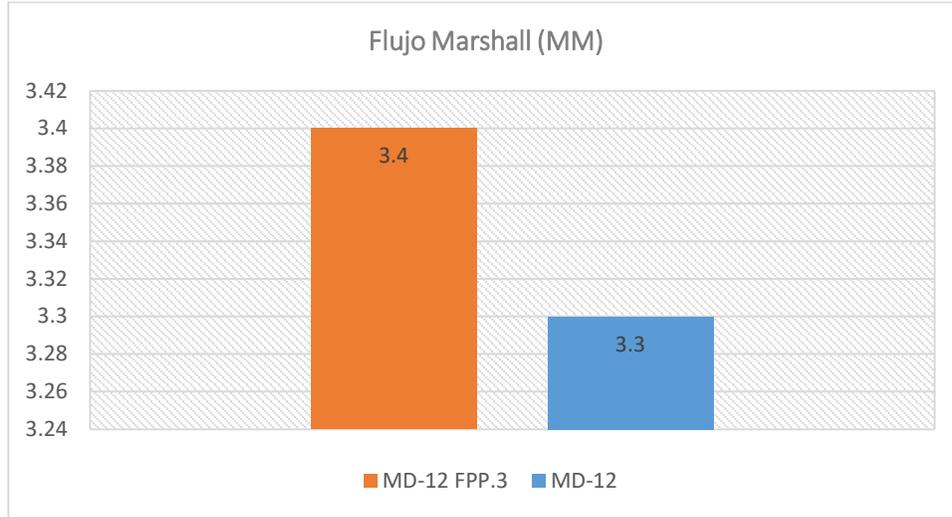
Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, los resultados de la mezcla asfáltica con adición de las fibras de Polipropileno de tapabocas al 3% mantuvo sus características principales dentro de los rangos estipulados por la especificación técnica. Adicionalmente, se puede evidenciar que al incorporar el agente modificar los valores de Estabilidad y Flujo de la mezcla incrementan en 10% y 3% respectivamente (véase las Figuras 27 y 28):

**Figura 27. Estabilidad Mezcla**



Fuente: elaboración propia

**Figura 28. Flujo Marshall**

Fuente: elaboración propia

Con lo anterior se puede decir que al momento de incorporar el cemento asfáltico modificado a la mezcla asfáltica, existe una mayor resistencia a la deformación y desplazamientos debido a las cargas expuestas. Con estos resultados se deduce que la adición de fibras genera un impacto positivo en la mezcla asfáltica ya que el comportamiento como se ha evidenciado en la caracterización física inicial se asemeja al comportamiento de una mezcla modificada con polímeros.

#### **4.4 Comparación Estructuras de Pavimento Mezcla asfáltica Tipo MD-12 Convencional Vs. Mezcla Modificada con Fibras de Polipropileno de Tapabocas**

##### **4.4.1 Diseño de la Estructura de Pavimento**

Se realizó el diseño de una estructura de pavimento empleando una mezcla convencional y una mezcla modificada con fibras del polipropileno al 3%, para esto se realizó el ensayo de modulo dinámico para obtener el módulo de la mezcla asfáltica, para a través de la metodología AASTHO identificar los coeficientes de aporte estructural de la mezcla, con

unos parámetros establecidos (Transito, CBR subrasante) para la elaboración del diseño de la estructura.

#### 4.4.2 Generalidades Caso de Estudio

En el marco de esta investigación, se seleccionaron datos de entrada para poder hacer una comparación con los mismos parámetros de entrada para ambos diseños de la mezcla convencional tipo MD-12 y la Mezcla modificada con fibras del polipropileno de tapabocas al 3%.

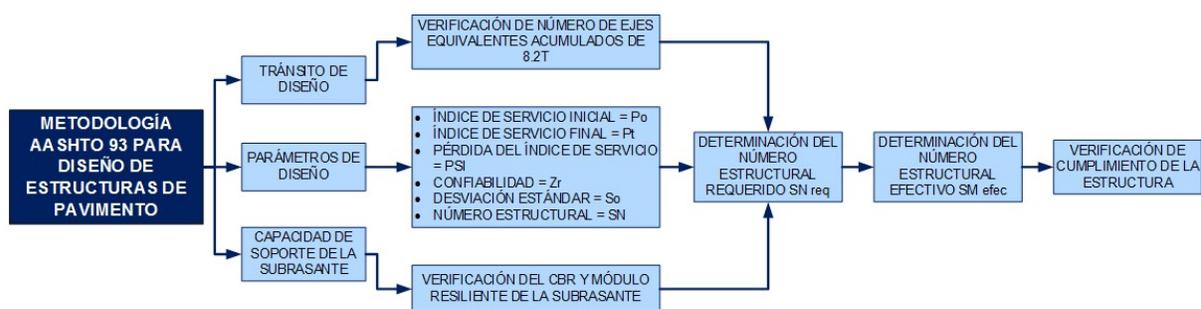
En este sentido, para enfocar este análisis a un caso con condiciones reales se seleccionó un tramo de la localidad de Engativá en la ciudad de Bogotá (véase la Figura 29), ya que se tiene información relacionada con aforos de tránsito lo que permite aterrizar la evaluación de las estructuras de pavimentos en condiciones reales.

**Figura 29. Ubiación Zona de Estudio**



Fuente: Mapa de Servicios-IDRD

La metodología aplicada para el diseño de estas estructuras se basó en la AASTHO-93, como se representa a continuación (véase la Figura 30):

**Figura 30. Metodología AASTHO-Diseño de Pavimento Flexible**

Fuente: elaboración propia

#### 4.4.2.1 Estudio de Tránsito

Se escogió un tránsito con unas características similares al comportamiento del sector y a partir de éste y, de acuerdo con las tasas de crecimiento proyectadas por la Secretaría Distrital de Movilidad se procedió a tener el tránsito proyectado para el período de diseño de 10 años, como se evidencia a continuación, donde se encuentran los valores del TPD (véase la Tabla 18):

**Tabla 18. Tasas de Crecimiento de Tránsito por Localidades**

Localidad	Periodo							
	Liviano 2013 - 2017	Camión	Liviano 2018 - 2022	Camión	Liviano 2023 - 2027	Camión	Liviano 2027 - 2032	Camión
Usaquén	2,35%	3,71%	1,98%	3,50%	1,76%	2,80%	1,61%	3,67%
Chapinero	3,54%	4,62%	3,68%	4,80%	3,48%	4,13%	3,33%	5,00%
Santa Fe	3,32%	4,46%	3,50%	4,67%	3,32%	4,00%	3,07%	4,80%
San Cristóbal	2,03%	3,46%	1,63%	3,23%	1,44%	2,56%	1,30%	3,43%
Usme	3,43%	4,54%	3,40%	4,59%	3,18%	3,90%	3,01%	4,76%
Tunjuelito	2,39%	3,74%	2,05%	3,55%	1,84%	2,86%	1,66%	3,72%
Bosa	2,70%	3,97%	2,39%	3,81%	2,16%	3,11%	1,99%	3,97%
Kennedy	3,00%	4,21%	2,87%	4,19%	2,67%	3,51%	2,46%	4,33%
Fontibón	2,76%	4,02%	2,46%	3,87%	2,23%	3,17%	2,06%	4,02%
Engativá	2,98%	4,20%	2,86%	4,18%	2,64%	3,48%	2,49%	4,35%
Suba	3,23%	4,39%	3,17%	4,42%	2,95%	3,72%	2,78%	4,57%
Barrios Unidos	3,14%	4,32%	3,09%	4,35%	2,90%	3,68%	2,76%	4,56%
Teusaquillo	2,61%	3,91%	2,32%	3,76%	2,11%	3,07%	1,95%	3,94%
Los Mártires	3,04%	4,24%	2,99%	4,28%	2,80%	3,61%	2,66%	4,49%
Antonio Nariño	2,66%	3,95%	2,41%	3,83%	2,21%	3,15%	2,00%	3,98%
Puente Aranda	2,73%	4,00%	2,51%	3,91%	2,32%	3,24%	2,18%	4,11%
La Candelaria	3,05%	4,46%	2,57%	4,21%	2,31%	3,40%	2,12%	4,42%
Rafael Uribe	2,47%	3,80%	2,18%	3,65%	1,99%	2,98%	1,75%	3,79%
Ciudad Bolívar	2,71%	3,99%	2,51%	3,91%	2,30%	3,22%	2,11%	4,06%
<b>Prom. Localidades</b>	<b>2,85%</b>	<b>4,10%</b>	<b>2,66%</b>	<b>4,04%</b>	<b>2,45%</b>	<b>3,35%</b>	<b>2,28%</b>	<b>4,21%</b>

Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) - Dirección de Seguridad Vial y

## Comportamiento del Tránsito.

Con la tasa de crecimiento encontrada para la localidad de Engativá se realiza la siguiente la proyección del Tránsito (véase la Tabla 19):

**Tabla 19. TPDs Proyectados Localidad de Engativá**

TRANSITO PROMEDIO DIARIOS TPDs												
AÑO No.	AÑO	TIPO DE VEHÍCULO									TOTAL CAMIONES	TOT VH COMERCIALES
		AUTOS	BUSES	BUS ALIMENTADOR	C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5		
0	2021		2262	259	504	1323	90	6	12	9	1945	4466

PROYECCIÓN DEL TPD												
AÑO No.	AÑO	TIPO DE VEHÍCULO									TOTAL CAMIONES	TOT VH COMERCIALES
		AUTOS	BUSES	BUS ALIMENTADOR	C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5		
0	2021	0	2262	259	504	1323	90	6	12	9	1945	4466
1	2022	0	2314	265	526	1379	94	7	12	9	2026	4605
2	2023	0	2368	271	540	1417	97	7	13	9	2083	4721
3	2024	0	2422	277	559	1466	100	7	13	10	2155	4854
4	2025	0	2478	283	578	1517	104	7	13	10	2230	4991
5	2026	0	2535	290	599	1570	107	7	14	10	2308	5165
6	2027	0	2972	340	780	2046	140	10	18	13	2388	5345
7	2028	0	2972	340	780	2046	140	10	18	13	2471	5531
8	2029	0	2972	340	780	2046	140	10	18	13	2557	5723
9	2030	0	2972	340	780	2046	140	10	18	13	2646	5922
10	2031	0	2972	340	780	2046	140	10	18	13	2761	5926
11	2032	0	2972	340	780	2046	140	10	18	13	2881	6119
12	2033	0	2972	340	780	2046	140	10	18	13	3007	6319
13	2034	0	3041	348	814	2135	146	10	19	14	3137	6525
14	2035	0	3111	355	849	2228	152	11	20	15	3274	6740
15	2036	0	3182	364	886	2325	159	11	21	15	3416	6962
16	2037	0	3255	372	925	2426	165	12	21	16	3565	7192
17	2038	0	3330	381	965	2531	173	12	22	17	3720	7431
18	2039	0	3407	389	1007	2641	180	13	23	17	3882	7678
19	2040	0	3485	398	1051	2756	188	13	24	18	4051	7934
20	2041	0	3565	407	1096	2876	196	14	25	19	4227	8200
21	2042	0	3647	417	1144	3001	205	14	27	20	4411	8475

Fuente: elaboración propia

Luego de tener la proyección se estiman el número de ejes equivalentes de acuerdo con el TPD proyectado (véase la Tabla 20):

**Tabla 20. Número de Ejes Equivalentes 8.2 Ton**

NUMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 8.2 TON													
AÑO	TPDS	CLASE DE VEHÍCULO										EJES EQUIVALENTES PAVIMENTO FLEXIBLE	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS PAVIMENTO FLEXIBLE
		AUTOS	BUSES	ALIMENTADOR	CAMIONES						TOTAL CAMIONES		
					C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5			
2021	4466	0	743,208	157,140	188,903	1,495,527	111,517	13,896	16,932	13,512	1,840,288	2,740,636	2,740,636
2022	4605	0	760,302	160,755	196,800	1,558,040	116,179	14,477	17,640	14,076	1,917,212	2,838,268	5,578,904
2023	4721	0	777,789	164,452	202,280	1,601,427	119,414	14,881	18,131	14,468	1,970,601	2,912,841	8,491,745
2024	4854	0	795,678	168,234	209,319	1,657,157	123,570	15,398	18,762	14,972	2,039,178	3,003,090	11,494,835
2025	4991	0	813,978	172,104	216,604	1,714,826	127,870	15,934	19,415	15,493	2,110,141	3,096,223	14,591,058
2026	5165	0	832,700	176,062	224,141	1,774,502	132,320	16,489	20,090	16,032	2,183,574	3,192,336	17,783,393
2027	5345	0	851,852	180,111	243,890	1,930,852	143,978	17,942	21,860	17,445	2,375,968	3,407,931	21,191,324
2028	5531	0	871,444	184,254	254,500	2,014,844	150,241	18,722	22,811	18,204	2,479,322	3,535,021	24,726,345
2029	5723	0	891,488	188,492	265,570	2,102,490	156,777	19,536	23,804	18,995	2,587,173	3,667,152	28,393,497
2030	5922	0	911,992	192,827	277,123	2,193,948	163,597	20,386	24,839	19,822	2,699,715	3,804,534	32,198,031
2031	5926	0	932,968	197,262	289,177	2,289,385	170,713	21,273	25,920	20,684	2,817,152	3,947,382	36,145,413
<b>2032</b>	<b>6119</b>	<b>0</b>	<b>954,426</b>	<b>201,799</b>	<b>301,757</b>	<b>2,388,973</b>	<b>178,139</b>	<b>22,198</b>	<b>27,047</b>	<b>21,584</b>	<b>2,939,698</b>	<b>4,095,924</b>	<b>40,241,337</b>
2033	6319	0	976,378	206,441	314,883	2,492,894	185,888	23,164	28,224	22,523	3,067,575	4,250,394	44,491,730
2034	6525	0	998,834	211,189	328,581	2,601,335	193,974	24,172	29,451	23,502	3,201,015	4,411,038	48,902,768
2035	6740	0	1,021,808	216,046	342,874	2,714,493	202,412	25,223	30,733	24,525	3,340,259	4,578,113	53,480,881
2036	6962	0	1,045,309	221,015	357,789	2,832,573	211,217	26,320	32,069	25,592	3,485,560	4,751,885	58,232,765
2037	7192	0	1,069,351	226,099	373,353	2,955,790	220,405	27,465	33,464	26,705	3,637,182	4,932,632	63,165,397
2038	7431	0	1,093,946	231,299	389,593	3,084,367	229,993	28,660	34,920	27,866	3,795,399	5,120,645	68,286,042
2039	7678	0	1,119,107	236,619	406,541	3,218,537	239,997	29,907	36,439	29,079	3,960,499	5,316,225	73,602,267
2040	7934	0	1,144,847	242,061	424,225	3,358,543	250,437	31,208	38,024	30,344	4,132,781	5,519,689	79,121,956
2041	8200	0	1,171,178	247,628	442,679	3,504,640	261,331	32,565	39,678	31,663	4,312,557	5,731,363	84,853,319
<b>2042</b>	<b>8475</b>	<b>0</b>	<b>1,198,115</b>	<b>253,324</b>	<b>461,936</b>	<b>3,657,092</b>	<b>272,699</b>	<b>33,982</b>	<b>41,404</b>	<b>33,041</b>	<b>4,500,153</b>	<b>5,951,592</b>	<b>90,804,911</b>

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, para el período de diseño de la estructura de pavimento flexible (10 años), se tienen **36,146,313** ejes equivalentes de 8.2 T, a partir del cual se realiza el diseño de la estructura de pavimento asfáltico a analizar.

#### 4.4.3 Diseño de la Estructura

##### 4.4.3.1 Capacidad de Soporte de la Subrasante

El diseño de pavimento asfáltico tuvo como referencia un CBR de 2.8% y a su vez el Módulo resiliente en  $280 \text{ Kg/cm}^3$ , para un suelo con un módulo resiliente menor a  $300 \text{ Kg/cm}^3$  no es recomendable utilizarlo como cimentación directa de la estructura de pavimento, es por esto por lo que se debe realizar un tratamiento especial con un material como rajón.

A partir de la formulación de IVANOV, se calculó el módulo equivalente de la subrasante para este caso  $546 \text{ Kg/cm}^2$  con un mejoramiento de 40 cm.

#### 4.4.3.2 Módulo Resiliente de la Capa de Subbase y Base

Para el material de subbase se escogió una subbase granular con un valor de CBR de 25%, con un módulo de 13,900 psi y que tiene un coeficiente de aporte  $a_3=0,10$ .

Para el material de base se escogió una subbase granular con un valor de CBR de 85%, con un módulo de 29,000 psi y que tiene un coeficiente de aporte  $a_2=0,14$ .

#### 4.4.3.3 Coeficiente de Aporte Estructural de la Mezcla Asfáltica

Para determinar el coeficiente de aporte estructural de la mezcla asfáltica, se necesitó realizar los ensayos de módulo dinámico de las mezclas asfáltica convencional y la mezcla modificada con fibras de Polipropileno de tapabocas al 3%. Teniendo en consideración que el módulo de las mezclas es función de la temperatura y la frecuencia de aplicación de las cargas se estiman los siguientes módulos con su respectivo coeficiente de aporte estructural (véase la Tabla 21):

**Tabla 21. Resultados ensayo módulo dinámico mezclas asfálticas**

Módulo dinámico				
Temperatura (°C)				
Tipo de Mezcla	Frec. (Hz)	10	20	35
MD-12	10	8196	4381	2298
MD-12 FPP.3	10	12612	6703	3753

Fuente: Elaboración propia

Al realizar el ensayo del módulo dinámico para las mezclas asfálticas se pudo evidenciar que la adición de las fibras de polipropileno de tapabocas a la mezcla asfáltica, impacta de manera positiva obteniendo un módulo dinámico mayor, el cual tiene un impacto significativo en el diseño de la estructura de pavimento.

Según lo anterior, con los resultados obtenidos se procede a calcular el coeficiente de aporte de la mezcla asfáltica, obteniéndose los siguientes valores (véase la Tabla 22):

**Tabla 22. Coeficiente de aporte estructural de las mezclas asfálticas.**

Tipo de Mezcla	Coficiente (a1)
MD-12	0.50
MD-12 FPP.3	0.58

Fuente: Elaboración propia

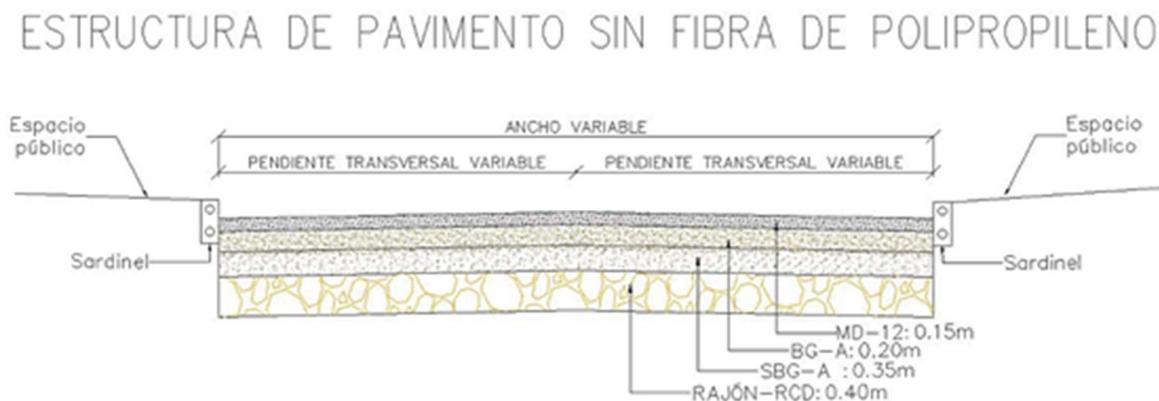
#### 4.4.3.4 Dimensionamiento de las Estructuras de Pavimento

Con los valores obtenidos se procedió al cálculo de la estructura de pavimento, dimensionándose a partir de la metodología AASHTO de 1993, donde la capacidad estructural requerida por el pavimento se define en términos del número estructural requerido. Con los valores encontrados anteriormente se obtuvo las siguientes opciones de estructuras de pavimento (véase la Tabla 23 y las Figuras 31 y 32):

**Tabla 23. Estructuras de Pavimentos Dimensionadas**

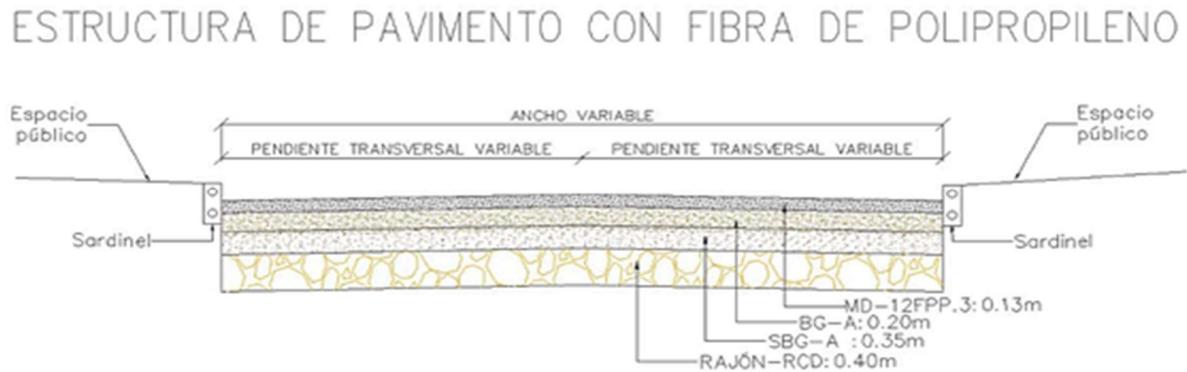
Tipo de Mezcla	Mr (Kg/cm <sup>2</sup> )	SN <sub>req</sub>	SN <sub>eff</sub>	Carpeta Asfáltica (cm)	BG-A (cm)	SBG-A (cm)	Mejoramiento Rajón (cm)
MD-12	546	5.06	5.18	15	20	35	40
MD-12 FPP.3	546	5.06	5.2	13	20	35	40

Fuente: Elaboración propia

**Figura 31. Estructura Propuesta Mezcla Asfáltica Convencional**

Fuente: elaboración propia

**Figura 32. Estructura Propuesta Mezcla Asfáltica Modificada con Fibras de Polipropileno al 3%.**



Fuente: elaboración propia

Luego de obtener el diseño de las estructuras de pavimento, se evidencio el aporte que generan las fibras de polipropileno de tapabocas a la mezcla asfáltica, ya que se puede notar una reducción de 2 cm de carpeta asfáltica para la estructura utilizada. Este resultado permite identificar el beneficio que genera la adición de este modificador en la mezcla asfáltica, puesto que al lograr reducir el espesor en un 14% se genera un impacto significativo en los costos de la estructura de pavimento.

#### 4.5 Evaluación Económica del Empleo de las Fibras de Polipropileno de Tapabocas

##### Usados en Mezclas Asfálticas

Finalmente, con la información del diseño de la estructura de pavimento y tomando siempre como punto de comparación la mezcla convencional. Se realizó un análisis económico del empleo de esta mezcla modificada, evaluando desde la etapa de tratamiento hasta la etapa final de producción de la mezcla asfáltica.

Para esto fue necesario estimar un costo asociado a la desinfección de los tapabocas y un costo de procesamiento de la mezcla. Teniéndose que, el costo de la metodología

propuesta para la desinfección de los tapabocas por cada metro cubico de mezcla está en \$3.307 pesos colombianos a noviembre del 2021 (véase la Tabla 24):

**Tabla 24. Costo Desinfección de Tapabocas**

COSTO DE DESINFECCIÓN POR M3 DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA (PESOS COLOMBIANOS)				
Descripción	UM	Rendimiento	Valor Unitario	Valor Total
FILTRO 3M 2097 PARA VAPORES ORGANICOS Y SOLDADURA PAQUETE X 2 UNDS	UN	0.003	\$ 31,200	\$ 94
RESPIRADOR PIEZA FACIAL MEDIA CARA ELABORADA EN LATERIAL ELASTOMERICO TALLA M REF 6200	UN	0.001	\$ 39,350	\$ 39
TRAJE DE POTECCION ANTIFLUIDOS BLANCO	UN	0.002	\$ 81,340	\$ 163
DESINFECTANTE POR 20 LTS	UN	0.022	\$ 136,850	\$ 3,011
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 3,307</b>

Fuente: elaboración propia

Para la producción de la mezclas convencional y modificada se estimaron los siguientes costos asociados a la producción (véase las Tablas 25 y 26):

**Tabla 25. Costo Producción Mezcla Asfáltica Convencional**

Costo De Producción Mezcla Convencional				
Ítem	Unidad	Cantidad	Vr. Unitario	Costo total
ARENA	m <sup>3</sup>	0.5	\$ 33,600	\$ 16,800
ASFALTO PENETRACION 60-70	kg	108	\$ 1,875	\$ 202,500
AGREGADOS	m <sup>3</sup>	0.8	\$ 37,510	\$ 30,008
TRANSPORTE	m <sup>3</sup>	1	\$ 34,510	\$ 34,510
COSTOS DE PRODUCCIÓN	m <sup>3</sup>	1	\$ 85,000	\$ 85,000
				<b>\$ 368,818</b>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 26. Costo Producción Mezcla Asfáltica Modificada**

Costo De Producción Mezcla Modificada FPP.3				
Ítem	Unidad	Cantidad	Vr. Unitario	Costo total
ARENA	m <sup>3</sup>	0.5	\$ 33,600	\$ 16,800
ASFALTO PENETRACION 60-70 MOD.	kg	108	\$ 1,875	\$ 202,500
DESINFECCIÓN	m <sup>3</sup>	1	\$ 3,307	\$ 3,307
AGREGADOS	m <sup>3</sup>	0.8	\$ 37,510	\$ 30,008
TRANSPORTE	m <sup>3</sup>	1	\$ 34,510	\$ 34,510
COSTOS DE PRODUCCIÓN	m <sup>3</sup>	1	\$ 105,000	\$ 105,000
				<b>\$ 392,125</b>

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede deducir que existe un mayor costo de producción de la mezcla asfáltica modificada debido al incremento en el proceso de producción derivados del proceso de incorporación del asfalto con el agente modificador, dado que se requiera un mayor tiempo de trabajo, lo que incrementa el valor de la mezcla en un 6.3%.

Ahora bien, para poder comparar el costo asociado al uso de la mezcla modificada en la estructura de pavimento, se definió una sección de siete (7) metros de ancho con una longitud de un (1) kilómetro. Con estos parámetros los costos al emplear las estructuras de pavimento encontradas se resumen a continuación (véase la Tabla 27):

**Tabla 27. Evaluación Económica de la Implementación de las Estructuras Asfálticas**

Ítem	Evaluación Económica			
	Unidad	Cantidad	Vr. Unitario	Costo total
<b>Mezcla Asfáltica Convencional</b>				
(Suministro, Extendido, Nivelación y compactación mecánica)	m3	1050	\$ 643,818	\$ 676,008,900
<b>Mezcla Asfáltica Mod. FPP.3</b>				
(Suministro, Extendido, Nivelación y compactación mecánica)	m3	910	\$ 667,125	\$ 607,083,750

Fuente: elaboración propia

Luego de realizar el estudio económico en un tramo con una sección transversal de siete (7) metros y un (1) kilómetro de longitud, se puede evidenciar que, aunque existe un mayor costo de producción de la mezcla asfáltica modificada con fibras de polipropileno de tapabocas, este costo se ve minimizado en un 10%, debido a que la reducción de la carpeta asfáltica que obedece a dos (2) centímetros aproximadamente.

## 5. Conclusiones

La investigación permitió establecer que, la razón primordial para continuar en la búsqueda de alternativas para modificar asfaltos por la línea humedad que tengan un vida útil más largas, se constituye en el aumento del tráfico y las solicitaciones de carga a las que son sometidas las vías del país, razón por la cual, cada aporte en la consecución de alternativas de agentes modificadores como los usados en este proyecto, es el punto de partida para futuros estudios, que permitan mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas frente a las fallas por fatiga y ahuellamiento durante su vida útil.

Ahora bien, se concluye que, para el proceso de modificación del asfalto y determinar la cantidad total del polipropileno de fibras de tapabocas a incorporar como agente modificador, se hace necesario mantener el asfalto en agitación de corte, realizando estiramiento y su respectiva verificación a contraluz para visualizar la no presencia de grumos, proceso realizado cada hora, hasta completar 3 horas, período necesario para obtener una incorporación total de las fibras de polipropileno al asfalto modificado.

Así mismo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos al incorporar como agente modificador fibras de polipropileno obtenidas del reciclaje de tapabocas, en un asfalto base convencional de Ecopetrol de penetración 60-70, proveniente de la refinería de Barrancabermeja en el departamento de Santander, se pudo concluir que, las fibras de tapabocas se incorporaron y homogenizaron al mezclarse con el asfalto, obteniendo un asfalto modificado con unas características físicas semejantes a las propiedades de un asfalto modificado con SBS tipo V.

Ahora bien, al modificar un asfalto base convencional de la refinería de

Barrancabermeja con porcentajes del 1%, 1.5% y 3% de fibras de polipropileno obtenidas del reciclaje de tapabocas, se presenta un aumento en la recuperación por torsión que crece con el porcentaje de fibras adicionadas, obteniendo para el asfalto adicionado al 3% una recuperación elástica del 15%, parámetro medido teniendo en cuenta la norma de ensayo “Recuperación Elástica por Torsión de Asfaltos Modificados (INV E – 727 -13)” de las “Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras” (INVIAS, 2018).

En cuanto a la variación de los parámetros físicos como la densidad del asfalto y el punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, se pudo concluir que las mezclas modificadas con los tres porcentajes objeto de estudio, no presentaron cambios significativos con la adición del polipropileno en fibras. Adicionalmente, al evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica modificada mediante los ensayos Marshall, se evidenció que la adición de las fibras de polipropileno, genera una mayor resistencia a la deformación y desplazamientos debido a las cargas expuestas.

Al someter la mezcla asfáltica a los ensayos dinámicos se evidencia una mejoría que, en el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica aumenta considerablemente, aun así, esta esté sometida a altas temperaturas con respecto a una mezcla convencional.

Finalmente, la evaluación económica para empleo de la mezcla asfáltica modificada con fibras de polipropileno de tapabocas, mostró que, a pesar que el costo de producción aumenta en un 6.3%, éste aumento en el valor se ve compensado por el costo asociado al empleo de la estructura de pavimento, ya que, al utilizar una mezcla modificada los módulos de ésta aumentan considerablemente, generando menores espesores de carpeta asfáltica en la estructura de pavimento, lo que se traduce en menores costos finales (aproximadamente 10%).

## 6. Recomendaciones

Se recomienda realizar una investigación para evaluar diferentes alternativas para la desinfección y producción de las fibras de polipropileno de tapabocas usados, para la utilización en la mezcla asfáltica. Luego de obtener diferentes alternativas de procesamiento del agente modificador, reevaluar la incidencia económica dentro de la producción de la mezcla.

Es importante realizar los ensayos de caracterización física del asfalto modificado con fibras de tapabocas, luego de que estas sean sometidas al proceso de desinfección; esto con el fin de verificar que no haya cambios en las características del asfalto modificado debido al uso del desinfectante en la desinfección del tapabocas.

Para evaluar el comportamiento de la estructura de pavimento con una mezcla asfáltica modificada con fibras de polipropileno de tapabocas, sometida a condiciones reales, sería de gran utilidad construir un tramo de prueba donde se pueda implementar esta mezcla y así evidenciar su comportamiento ante los agentes externos a los que normalmente se ven sometida las vías y carreteras del país.

Finalmente, se recomienda realizar estudios para desarrollar una especificación técnica y someterla a consideración ante los entes locales y nacionales, para así poder implementar el uso masivo de este tipo de mezcla modificada, como una alternativa adicional, para el manejo y disposición de residuos que contribuya además con la preservación del medio ambiente.

### Referencias Bibliográficas

- Alvarez , A., Ovalles, E., Rodríguez, M., Rodríguez, A., Castillo, P., Rivas, J., Rincón-Morantes, J. (2019). Calidad de adhesión y propiedades reológicas de asfaltos residuales, no modificados y nano-modificados, obtenidos de crudos pesados de pavimentación. *DYNA*, 86(209), 357-366. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.73588>
- Blazy, J., & Blazy, R. (2021). Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. *Case Studies in Construction Materials*, 14 (e00549), 1-19.<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00549>
- Broncesval. (2017). *Polipropileno - PP*. Plásticos Técnicos : <https://www.broncesval.com/plasticos-tecnicos/pp-polipropileno/>
- Bustos Castañeda, H., Sosa Martínez, P., Rodríguez Ramírez, N., & Calderón Bustos, J. (2018). Fundamentos micro y macroscópicos de la modificación del asfalto convencional con polímeros: una revisión. *Inventum*, 13(24), 58-77.
- Camargo, H., & Suarez, A. (2010). *Diagnóstico de las nuevas tecnologías empleadas para el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2*. [Tesis de Especialización en Pavimentos]. Bogotá : Facultad de ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada.
- Chávarri , C. (2010). *Equipo de Pavimentación*. Fundación para la Enseñanza de la Construcción.
- Construmine. (10 de mayo de 2015). *Tecnología del Asfalto*. <https://construmine.webnode.cl/tecnologia-del-asfalto/>

- Cui, S., Blackman, B., Kinloch, A., & Taylor, A. (2014). Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 54, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.009>
- Durango-Agudelo, E. (2016). *Relación entre infraestructura vial y desarrollo económico en los municipios de Antioquia: aplicación espacial*. Universidad EAFIT: [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11897/EdiliaAndrea\\_DurangoAgudelo\\_2016.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11897/EdiliaAndrea_DurangoAgudelo_2016.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Figuerola Infante, A., Reyes Lizcano, F., Hernández Barrera, D., Jiménez, C., & Bohórquez, N. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. Bogotá D.C. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(3), 5-15.
- Galvis Ariza, R. (2006). *El asfalto*. Universidad del Quindío: <https://bdigital.uniquindio.edu.co/bitstream/handle/001/5947/Presentaci%C3%B3n%20Power%20Point.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Guerrero Raga, E. (2019). *Influencia de la temperatura y el tiempo de mezclado en la modificación de un cemento asfáltico*. [Tesis de Maestría en Infraestructura Vial]: Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomás .
- Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química [INTEC]. (2010). *Polimeros*. <http://www.gp.santafe-conicet.gov.ar/cursos/b/b.21b.pdf>
- Instituto Nacional de Vías [INVIAS]. (30 de junio de 2021). *Estado de la Red Vial*. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>

- Lijun , S. (2016). Chapter 2 - Distribution of the temperature field in a pavement structure. En *Structural Behavior of Asphalt Pavements* (págs. 61-177). Butterworth-Heinemann.
- López Plazas, M. (11 de abril de 2019). Tratamientos agresivos, razón por la que el asfalto dura menos. *Periódico UNAL*. <https://unperiodico.unal.edu.co/pages/detail/tratamientos-agresivos-razon-por-la-que-el-asfalto-dura-menos/>
- Mahmood, R., Mershed Eweed, K., & Mizher Rahma, N. (2018). Recycled Polypropylene to Improve Asphalt Physical Properties. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(12), 1260–1266.
- Mejía Umbarila, C., & Sierra Hernández, C. (2017). *Estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: caso de estudio universidades de Bogotá D.C.* [Tesis de Pregrado].: Facultad de Ingeniería. Universidad Piloto de Colombia.
- Moubark, S., Khodary, F., & Othman, A. (2017). Evaluation of Mechanical properties for polypropylene Modified Asphalt concrete Mixtures. *International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM)*, 5(12), 7797-7801.
- Múnera-Ossa, J. (2012). *Modificación Polimérica de Asfaltos*. [Tesis de Magister en Ingeniería]. Medellín : Escuela de Ingeniería. Universidad EAFIT.
- Palma, C. V., Ortiz-Cisneros, J., Ávalos-Belmonte, F., & Castañeda-Facio, A. (2016). Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos. *Afinidad*, LXXIII(574), 119-124.
- Paredes, N. (9 de julio de 2020). Mascarillas: cuál es la mejor manera de deshacerse de los tapabocas usados para evitar la transmisión de covid-19 y la contaminación. *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-53333206>.

- Read , J., & Whiteoak , D. (2003). *The Shell bitumen handbook* (5 ed.). London: Thomas Telford Publishing.
- Reyes Lizcano, F., Guáqueta Echeona, C., Porras Salcedo, L., & Rondón Quintana, H. (2013). Comportamiento de un cemento asfáltico modificado con un desecho de PVC. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(22), 75-84.
- Srikanth, G., Arpita , S., & Rajiv , K. (2019). An Experimental Investigation on the Effect of Mixing Procedures on Polypropylene Modified Bituminous Mix. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(1), 1204 - 1210.
- Wulf Rodríguez , F. (2008). *Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero*. [Tesis de Pregrado].: Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Universidad Austral de Chile.
- Yeole, C., Khanapure, V., Joshi, V., & Shelake, A. (2017). Industrial Polypropylene Waste Used as Modifier in Asphalt Binder for Flexible Pavements. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 6(6), 1119 - 1123.
- Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., & Sivakugan, N. (2015). Use of macro plastic fibres in concrete: a review. *Construction and Building Materials*(93), 180-188. [https://researchonline.jcu.edu.au/39533/6/39533\\_Yin%20et%20al\\_2015\\_accepted.pdf](https://researchonline.jcu.edu.au/39533/6/39533_Yin%20et%20al_2015_accepted.pdf)
- Zhang , H. (11 de December de 2019). *Introductory Chapter: Asphalt and Asphalt Mixture, Asphalt and Asphalt Mixtures*. IntechOpen: <https://www.intechopen.com/chapters/68824>