

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE UN LIGANTE ASFÁLTICO 60/70
MODIFICADO CON GCR Y NANOARCILLA**



Por:
Luisa Alejandra Arévalo Prieto



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE UN LIGANTE ASFÁLTICO 60/70
MODIFICADO CON GCR Y NANOARCILLA**



Por:
Luisa Alejandra Arévalo Prieto

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional
de ingeniero civil

Aprobado por:
Ing. Emiro Andrés Lozano Pérez, Esp.
Director

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020**

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Fray José Gabriel Mesa Ángulo, O.P.
Rector General

Fray Eduardo González Gil, O.P.
Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.
Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O.P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón
Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. Manuel Eduardo Herrera Pabón
Decano Facultad de Ingeniería Civil

Nota de aceptación

ING. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN
Decano Facultad Ingeniería Civil

ING. EMIRO ANDRÉS LOZANO PÉREZ
Director Trabajo de Grado

Villavicencio, 25 de noviembre de 2020

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mis padres, por haberme brindado su apoyo incondicional en cada etapa y logro de mi vida, y a los docentes que acompañaron mi formación profesional y el desarrollo de mi investigación, pues ellos me han guiado y acompañado en el correcto desarrollo de este trabajo investigativo.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradezco a Dios por bendecir mi vida y darme la oportunidad de aprender y disfrutar cada etapa de ella, a mi familia por haberme forjado como persona, por brindarme su confianza, compañía y su apoyo.

Agradezco a mi director, el ingeniero Emiro Andrés Lozano Pérez y a la ingeniera Jessica María Ramírez Cuello, por ser mi guía en este proceso, porque día a día me brindaron su paciencia, acompañamiento, apoyo y dedicación.

También agradezco a las empresas que con su apoyo y amabilidad me brindaron los materiales con los cuales logré el correcto desarrollo de este proyecto y de igual manera, le doy las gracias a la Universidad Santo Tomas por proporcionarme sus instalaciones permitiéndome desarrollar esta investigación.

RESUMEN

Por medio de este trabajo investigativo se establece la respectiva caracterización física de un ligante asfáltico de penetración 60/70 modificado con grano de caucho reciclado (GCR) y nanoarcilla, materiales obtenidos por medio de diferentes empresas relacionadas con este contexto y que permitieron desarrollar las diferentes muestras, analizadas en el laboratorio por medio de diferentes ensayos como los son el ensayo de penetración de materiales bituminosos, densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (Método del picnómetro), puntos de inflamación y combustión mediante copa abierta Cleveland y el ensayo de punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola), mediante los cuales es posible determinar el desempeño, el comportamiento del asfalto y por ende su viabilidad estructural durante su etapa de servicio.

La distribución de los materiales al momento de componer cada muestra fue determinada según las propiedades de los mismos, por lo que teniendo en cuenta la nanoarcilla, en una de ellas se empleó 2% mientras que en la otra se evaluó un 3% del mismo material, definiendo para ambos casos una base conformada por el ligante asfáltico 60/70 y un 10% de GCR.

Con el desarrollo del estudio de investigación se pudo determinar que la incorporación de la nanoarcilla en un 3% a un ligante asfáltico 60/70 modificado con 10% GCR presenta características físicas óptimas, indicando que este material aporta un componente de viscosidad, rigidez y resistencia a altas temperaturas, en comparación con el ligante asfáltico convencional, generando mejores respuestas a posibles aplicaciones para prevenir futuros defectos presentados en las estructuras de pavimento, sin embargo, es importante resaltar que se debe hacer un estudio de las características mecánicas con el fin de determinar qué tan efectivo y funcional pueda ser la aplicación de estos modificadores a futuras mezclas asfálticas.

Por otra parte, cabe resaltar que los resultados producidos por los ensayos de laboratorio cumplen con los requisitos presentados en las especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras del INVIAS.

Palabras Clave: *Asfalto modificado, ligante asfáltico, nanoarcilla, caucho, pavimento.*

ABSTRACT

Through this research work, the respective physical characterization of a 60/70 penetration asphalt binder modified with recycled rubber grain (GCR) and nanoclay is established, materials obtained through different companies related to this context and that allowed the development of the different samples, analyzed in the laboratory by means of different tests such as the penetration test of bituminous materials, density of solid and semi-solid bituminous materials (pycnometer method), flash points and combustion by means of a Cleveland open cup and the test of point of softening of bituminous materials (ring and ball apparatus), by means of which it is possible to determine the performance, behavior of asphalt and therefore its structural viability during its service stage.

The distribution of the materials at the time of composing each sample was determined according to their properties, so taking into account the nanoclay, in one of them 2% was used while in the other 3% of the same material was evaluated, defining for both cases a base made up of 60/70 asphalt binder and 10% GCR.

With the development of the research study it was possible to determine that the incorporation of the nanoclay in 3% to a 60/70 asphalt binder modified with 10% GCR presents optimal physical characteristics, indicating that this material provides a component of viscosity, rigidity and resistance at high temperatures, in comparison with the conventional asphalt binder, generating better responses to possible applications to prevent future defects to send in the pavement structures, however, it is important to highlight that a study of the mechanical characteristics must be made in order to determine how effective and functional the application of these modifiers can be to future asphalt mixes.

On the other hand, it should be noted that the results produced by the laboratory tests comply with the requirements established in the general specifications for road construction and test standards for road materials of INVIAS.

Key Word: *Modified asphalt, asphalt binder, nanoclay, rubber, pavement.*

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	13
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
3.	JUSTIFICACIÓN	15
4.	OBJETIVOS	16
4.1.	OBJETIVO GENERAL.....	16
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5.	ALCANCE	17
6.	MARCO DE REFERENCIA	18
6.1.	MARCO TEÓRICO	18
6.2.	MARCO CONCEPTUAL	19
6.2.1	Llanta o caucho.....	19
6.2.2	Nanoarcilla	19
6.2.3	Ligante asfáltico	20
6.2.4	Emulsiones asfálticas.....	20
6.2.5	Asfaltos Modificados con Polímeros.....	20
6.3.	ESTADO DEL ARTE	20
6.4.	MARCO NORMATIVO.....	23
7.	METODOLOGÍA.....	24
7.1.	DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS	25
7.1.1	Reconocimiento de la investigación	25
7.1.2	Recopilación de información	25
7.1.3	Determinación de materiales.....	25
7.1.4	Aplicación de ensayos	25
7.1.5	Análisis de resultados	26
7.1.6	Conclusiones e informe final	26
8.	DETERMINACIÓN DE MATERIALES Y APLICACIÓN DE ENSAYOS.....	27
8.1.	DETERMINACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	27
8.1.1	Grano de Caucho Reciclado (GCR)	27
8.1.2	Nanoarcilla	27

8.1.3	Ligante asfáltico 60/70	27
8.2.	APLICACIÓN DE ENSAYOS.....	28
8.2.1	Equipos de laboratorio	28
8.2.2	Ensayos de laboratorio	30
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	35
9.1.	ENSAYO DE PENETRACIÓN	35
9.2.	ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	36
9.3.	ENSAYO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN	37
9.4.	ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO	38
10.	RESULTADOS E IMPACTOS	39
10.1.	RESULTADOS	39
10.2.	IMPACTOS.....	39
11.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	40
11.1.	CONCLUSIONES	40
11.2.	TRABAJOS FUTUROS	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1 Marco Normativo	23
Tabla 7.1 Materiales.....	25
Tabla 7.2 Modificaciones de ligante asfáltico	25
Tabla 8.1 Características del ligante asfáltico 60/70	28
Tabla 8.2 Detalles de las modificaciones asfálticas realizadas.....	31
Tabla 8.3 Caracterización física de las modificaciones asfálticas.....	31
Tabla 9.1 Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado	35
Tabla 9.2 Resultado ensayo de penetración para modificación LA + 10% GCR + 2% NA.....	35
Tabla 9.3 Resultado ensayo de penetración para modificación LA + 10% GCR + 3% NA.....	35
Tabla 9.4 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación LA + 10% GCR + 2% NA.....	37
Tabla 9.5 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación LA + 10% GCR + 3% NA.....	37
Tabla 9.6 Resultado ensayo punto de inflamación	37
Tabla 9.7 Resultado ensayo punto de combustión	37
Tabla 9.8 Resultado ensayo punto de ablandamiento.....	38
Tabla 10.1 Resultados esperados	39
Tabla 10.2 Impactos.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1 Esfuerzos presentados en pavimentos flexibles	18
Figura 7.1 Metodología	24
Figura 8.1 Grano de Caucho Recilado (GCR)	27
Figura 8.2 Nanoarcilla	27
Figura 8.3 Planta de materiales asfálticos Pasolin S.A.S.	28
Figura 8.4 Penetrómetro	29
Figura 8.5 Picnómetro	29
Figura 8.6 Aparato de copa abierta Cleveland	30
Figura 8.7 Aparato digital automático de anillo y bola	30
Figura 8.8 Proceso de modificación del asfalto	31
Figura 8.9 Ensayo de penetración.....	32
Figura 8.10 Ensayo de gravedad específica	33
Figura 8.11 Ensayo de punto de inflamación y combustión.....	34
Figura 8.12 Ensayo de punto de ablandamiento	34
Figura 9.1 Resultados promedio ensayo penetración	36

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos son estructuras constituidas de capas por materiales seleccionados en las que se reciben directamente las cargas que son provocadas por el tránsito y se transmiten a los estratos inferiores proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar adecuadamente para la comodidad de los usuarios (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Entre los tipos de pavimento se encuentran los flexibles, los cuales están expuesto a diferentes daños como el ahuellamiento, formación de baches y aparición de fisuras por fatiga, entre otros, producidos por las cargas cíclicas o el incremento del tráfico rodado de vehículos y de las cargas por eje (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

La susceptibilidad a la fatiga y deformación permanente presentada en las estructuras de pavimento, son problemas recurrentes que pueden ser predichos o evitados a través de diferentes estudios y ensayos como los de caracterización física los cuales evalúan el comportamiento de los diferentes materiales que componen estas estructuras (Catriel, 2008).

En este contexto, es evidente la necesidad de mejorar los ligantes asfálticos convencionales para obtener mejores comportamientos mecánicos de las mezclas asfálticas y propiciar mayores periodos de servicio. Es por esto que se debe contemplar el uso de materiales reciclados que pueden contribuir a realizar obras amigables con el medio ambiente y de la misma forma garanticen un aporte en mejora de calidad y duración.

Esta investigación propone analizar la caracterización física de los materiales utilizados en los pavimentos flexibles, en particular los ligantes asfálticos modificados con GCR (grano de caucho reciclado) y nanoarcilla, para así evaluar la viabilidad de este tipo de transformaciones del asfalto a una normatividad colombiana bien estipulada.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, existe la necesidad de diseñar modificaciones de ligantes asfálticos aplicando nuevos materiales para desarrollar pavimentos con mayor resistencia en proyectos de construcción, minimizando las fallas prematuras de la capa de rodadura. Esa necesidad está cada vez más latente, ya que en ocasiones la inadecuada selección de materiales puede generar diseños de estructuras de revestimiento asfálticos expuestos a sobre costos en presupuestos.

Ante esto la modificación del asfalto con caucho y nanoarcilla surge como una alternativa que puede disminuir la cantidad de ligante asfáltico de base al tiempo que se mejoran las propiedades mecánicas del material.

Uno de los defectos más recurrentes en los pavimentos flexibles es el de deformación permanente. Este puede ser causado por diversos factores, entre otros están, la falta de rigidez, las características de los agregados y la inadecuada compactación de las capas. Esta deformación es el resultado de productos asfálticos sin la suficiente capacidad para resistir la aplicación de cargas suministradas por el tránsito de vehículos y más aún si se presentan cargas que no fueron estimadas en el diseño. Una mezcla débil va acumulando permanentes deformaciones con cada camión que pasa y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y a su vez un deslizamiento lateral de la mezcla.

Este proyecto pretende investigar como es el proceso de la adición de GCR (grano de caucho reciclado) y nanoarcilla a unos ligantes asfálticos de origen local, en el uso de pavimentos flexibles y de igual forma la incidencia favorable o desfavorable en las características y propiedades mecánicas del mismo. A partir de lo anterior, se pretende investigar que propiedades físicas mejora la adición de GCR y nanoarcilla, dando respuesta a los siguientes interrogantes:

¿Qué cambios presenta el ligante asfáltico 60/70 al ser modificado con GCR y nanoarcilla, y que contribuciones y beneficios traería al ser aplicado en las estructuras de pavimento?

3. JUSTIFICACIÓN

En Colombia y a través del mundo existe un problema ambiental latente y es la aparición de neumáticos desechados en vías, andenes o en zonas verdes, después de su uso. En consecuencia, las llantas se convierten en un tumulto de basura masiva que, gracias a la acumulación de agua en su interior, favorece a la proliferación de mosquitos y zancudos, los cuales son transmisores de diferentes enfermedades tales como el Dengue, Chikunguña y Fiebre Amarilla (Ramirez Villamizar, Ladino Rubio, & Rosas Ramirez, 2014).

Los problemas ambientales que genera el uso de este material han sido enormes, como por ejemplo la generación de sustancias toxicas que llegan a la atmosfera producto de la quema de estos materiales (Arribas, dic, 2015). Aunque a través del tiempo se ha intentado dar un uso en la ingeniería a los neumáticos que culminan su vida útil, este propósito no ha sido muy exitoso ya que este producto viene de procesos de muy alta tecnología y está diseñado para ser “indestructible” (Arribas, dic, 2015).

En la actualidad existen diferentes estudios investigativos que han buscado la implementación de ligantes asfaltos con GCR en las vías, puesto que además de mitigar los problemas ambientales a través de la reutilización, este material adiciona componentes que mejoran las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas solucionando así fenómenos presentados en los pavimentos que acortan su vida útil (Diaz Claros & Castro Celis, 2017).

La incorporación del grano de caucho reciclado al asfalto ha tenido un gran auge en diferentes países, gracias a que sus propiedades proporcionan mayor flexibilidad, ya que este material cuenta con estructuras complejas y estables. De esta manera la adición de este material ocasiona que estas estructuras de pavimento presenten una mayor eficiencia, puedan reducir los diferentes fenómenos que se presentan en los pavimentos y generarían una mayor durabilidad lo cual permite reducir costos gracias a que habría una disminución en el mantenimiento.

Los nanocompuestos han demostrado comportamientos favorables en sus diferentes implementaciones, esto se debe a que sus dimensiones nanométricas permiten un incremento en su relación área/masa, y una adaptación estable a la hora de combinarse con otro material (Zapién Castillo, 2015). En diferentes investigaciones se ha comprobado que la incorporación de nanoarcilla al asfalto refleja buen comportamiento, ya que son muy resistentes a altas temperaturas (Vargas, 2011).

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar a través de una caracterización física el comportamiento de un ligante asfáltico 60/70 al ser modificado con GCR y nanoarcilla.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características físico mecánicas de la nanoarcilla.
- Definir el porcentaje óptimo de nanoarcilla para un diseño de mezcla asfáltica 60/70 modificada con GCR.
- Comparar el comportamiento del asfalto de base (virgen) y el asfalto modificado con GCR y nanoarcilla.

5. ALCANCE

Con el desarrollo del proyecto se pretende investigar y establecer el comportamiento del GCR (grano de caucho reciclado) y la nanoarcilla al momento de ser adicionados a un ligante asfáltico, por lo que es necesario realizar diferentes pruebas de laboratorio regidas según la normativa del INVIAS, mediante la cual se evaluará la caracterización física que adquiere este material cuando se somete a una modificación de este tipo con respecto a su funcionamiento normal.

Entre los ensayos de laboratorio requeridos se encuentran aquellos relacionados al estudio de la caracterización física del asfalto modificado con respecto al asfalto convencional, determinando su ductilidad, punto de ablandamiento y consistencia. Estos estudios son base para establecer el proceso de desarrollo de la investigación en asfaltos modificados, cuyo propósito está dirigido a todos aquellos procesos de mejoras de los materiales usados en vías. Esta investigación contribuye a posteriores proyectos investigativos relacionados a la temática estudiada, planteado una alternativa al empleo de asfalto convencional.

Finalmente, se constata la realización de cada fase investigativa por medio del diseño y entrega de un informe final, el cual representará cada uno de los resultados obtenidos y a su vez definirá el análisis de los mismos, así como la relación costo-beneficio que presenta su empleo en casos reales.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

Como base teórica del proyecto se tiene como principal objetivo generar una modificación del asfalto a través de la adición de polímeros como el caucho y nanopartículas de silicato de minerales como la nanoarcilla, para lograr unas características físicas fuera de las convencionales, generando una mejor rentabilidad y calidad de la infraestructura vial en Colombia.

Los pavimentos flexibles son estructuras compuestas por una serie de capas asfálticas y granulares que se disponen superpuestas, con el fin de capturar todas las cargas o esfuerzos provenientes del tránsito de vehículos, y llevarlos de una manera más disipada hacia las capas inferiores, es decir la subrasante (Navarro Dupré, 2013).

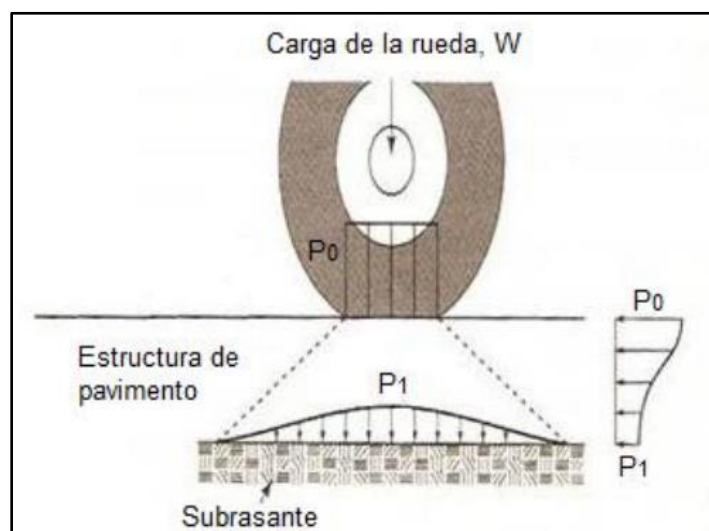


Figura 6.1 Esfuerzos presentados en pavimentos flexibles
Fuente: (Navarro Dupré, 2013).

Para construir este tipo de estructuras es necesario obtener un diseño adecuado con elementos que sean capaces de soportar las diferentes fuerzas, cargas o acciones a las que se encuentra sometidas, de igual forma responder de la manera más recuperable a los esfuerzos producidos a compresión, tracción y/o por temperatura a los que está expuesto.

Encontrar una alternativa de solución a los diferentes deterioros que presentan estas estructuras se puede realizar a través de diferentes ensayos metodológicos con los cuales por medio de la modificación de componentes de los pavimentos como lo son el asfalto, se pueden determinar el nivel de beneficio que genera y con esto ser utilizados como posible alternativa para mejorar la vida útil de estas estructuras viales.

En la actualidad el grano de caucho se ha incorporado de manera muy favorable en las estructuras asfálticas gracias a que este elemento ha tenido un excelente desempeño en la relación a la durabilidad de los pavimentos (Universidad de los Andes, 2002). La aplicación de este modificador de asfalto ha causado un gran auge a nivel mundial, países como Brasil, Portugal, Alemania y Estados Unidos, aplican esta “nueva” tecnología en sus vías.

Por otra parte, además de favorecer estas estructuras viales, mitigar un problema medio ambiental como la expansión de llantas y la proliferación de enfermedades debido a su acumulación se ha convertido en algo importante, es por esto que se buscan diferentes estrategias o metodologías para poder recuperar este material y así ser reutilizado de manera benéfica en diferentes aspectos. Entre los métodos o procesos de recuperación del caucho se encuentran:

La termólisis la cual consiste en someter el material a altas temperaturas en un medio donde no exista el oxígeno, causando una extinción de los enlaces químicos que lo conforman.

La trituración criogénica consiste en la disminución de la temperatura del caucho con ayuda de nitrógeno u otros materiales llevándolo a reducirlo a partículas de $\frac{1}{4}$ ", para luego pasar por un proceso de molienda (Díaz Claros & Castro Celis, 2017); este es un método poco rentable, debido a que sus instalaciones son muy complejas y la composición de los materiales que se obtienen como resultado son de muy baja calidad, además de la dificultad presentada para realizar su proceso de recuperación.

Por último, uno de los métodos más rentables es la trituración mecánica la cual consiste en moler el material hasta dejarlo con la menor cantidad de impurezas para poder realizar una mayor reutilización (Universidad de los Andes, 2002).

6.2. MARCO CONCEPTUAL

6.2.1 Llanta o caucho

El caucho en las llantas es un elastómero derivado del petróleo y tiene como principal función proporcional a los vehículos mayor adherencia a los pavimentos. Cuando culmina su vida útil este sigue conservando muchas propiedades que pueden ser muy benéficas cuando son reutilizadas en diferentes aspectos y materiales, como la elasticidad, durabilidad, la fácil adherencia a la hora de realizar combinaciones de materiales, entre otras (Universidad de los Andes, 2002).

6.2.2 Nanoarcilla

La nanoarcilla es un material cohesivo que presenta medidas nanométricas equivale a la distancia ocupada por 10 átomos de hidrógeno. Estas son producto de transformaciones metamórficas de las rocas, es por esto que estos materiales son

evaluados positivamente gracias a que presentan características físicas que son beneficiosas a la hora de interactuar con otros materiales (Vargas, 2011).

6.2.3 Ligante asfáltico

Se le llama ligante a los materiales que tienen como función unir a través de la transformación morfológica física o química dos o más elementos. Los materiales asfálticos o bituminosos son derivados del petróleo y suelen ser más utilizados como estabilizadores, sellos, riegos de impregnación y ligante entre agregados pétreos. Esta mezcla proporciona a la capa asfáltica una mayor resistencia, durabilidad y estabilidad (Perales Caldas, 2017).

6.2.4 Emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas son las suspensiones de pequeños glóbulos de asfalto en agua, y adicional contiene un agente emulsificante encargado de adicionar una carga eléctrica para evitar la aglomeración de los glóbulos. Este líquido en su aplicación suele ser de color marrón y cuando se adhiere el asfalto con los materiales circulantes cambia su color a negro (Universidad de Costa Rica, 2019).

6.2.5 Asfaltos Modificados con Polímeros

Los polímeros tienen la capacidad producir una modificación física y reológica a los asfaltos, debido a que estos están formados por cadenas de miles de moléculas llamadas monómeros los cuales determinan sus propiedades físicas. Estas pueden ser de dos tipos elastómeros o cauchos y plastómeros o plásticos (Universidad de Costa Rica, 2019).

Los elastómeros tienen la capacidad de resistir a las deformaciones presentadas por el estiramiento y una rápida recuperación, estos suelen aumentar su resistencia cuando ocurre un alargamiento; por otro lado, los plastómeros presentan una red sólida y rígida que permite una rápida resistencia a las expuestas y sus deformaciones, sin embargo, esta puede fracturarse al ser sometida a presión (Universidad de Costa Rica, 2019).

6.3. ESTADO DEL ARTE

Se identificaron diferentes investigaciones relacionadas, como lo son:

- *Armando Ramírez V, Ingryd L. Ladino Rubio y Juan P. Rosas Ramírez en su investigación “Diseño de mezclas asfálticas con asfalto caucho tecnología GAP GRADED para la ciudad de Bogotá” (2014), plantea el objetivo principal del estudio, es cual es lograr la modificación optima de los asfaltos para mejorar sus propiedades geológicas, mediante la adición de caucho en las mezclas en dos procesos diferentes: húmedo y seco.*

Se proponen dos estructuras de pavimento una convencional donde los módulos resilientes se encuentran en un rango pertinente, y otra con asfalto caucho la cual permite una mayor gradualidad de los módulos resilientes en las capas asfálticas; durante el desarrollo del proyecto se evidencio que la ASSTHO-93 se incorpora como mejor alternativa para el diseño de pavimentos asfálticos con la implementación de esta nueva tecnología. (Ramírez Villamizar, Ladino Rubio, & Rosas Ramirez, 2014)

- Según César M. Díaz Claros y Liliana C. Castro Celis en su investigación *“Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá”* (2017), las llantas a través del mundo se han convertido en un problema que ha afectado la estabilidad ambiental de manera considerable, es ahí donde se ve la necesidad de hacer una recopilación de todos los posibles usos que se le dan a esta pieza en los diferentes países.

En la actualidad se ha estudiado como principal medida de mitigación la implementación del GCR (grano de caucho reciclado) en las mezclas asfálticas, debido a que mejora los comportamientos mecánicos de los pavimentos de una manera muy significativa, es decir, sus beneficios no solo son físicos refiriéndose a mejorar la vida útil de las estructuras viales, también generarían un beneficio económico y ambiental a largo plazo (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

- Nicole M. Navarro Dupré expone en su estudio *“Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca”* (2013), la adición del polvo de neumático a las mezclas asfálticas muestra un comportamiento muy aceptable, gracias a que esta combinación genera una mayor resistencia a la hora de ser expuesta a cambios térmicos, proporciona una mayor adherencia en relación vehículo-pavimento y mayor resistencia a las deformaciones debidas al tráfico, de igual manera esta combinación los diferentes defectos que se presentan en las estructuras de pavimento como la fatiga, el ahuellamiento, el envejecimiento y la susceptibilidad a la humedad (Navarro Dupré, 2013).

Según Navarro esta combinación cuando es modificada por vía seca se diferencia de las mezclas convencionales debido a que no requieren ensayos que aseguren la infalibilidad de este proceso, gracias a que esta mezcla presenta una mejora en sus propiedades reológicas, y no requiere muchos procesos en planta. Adicional a los aportes físicos, esta mezcla permite mejorar de forma económica las estructuras de pavimento, gracias a que este material a diferencia de otros polímeros puede obtenerse de manera gratuita y además contribuye a una mejora a el medio ambiente (Navarro Dupré, 2013) .

- *Juan Pablo Vargas* en su proyecto de grado “*Posibilidades de modificación de Asfaltos con Nano Arcillas*” (2011), nos indica que en su investigación pudo identificar que los asfaltos que presentan mejores propiedades mecánicas son los clasificados como asfalto 60/70, esto gracias a que se observaron excelentes resultados según su índice de penetración. De igual forma en el desarrollo de sus ensayos identifico que la nanoarcilla no presenta alguna dificultad en la elaboración de modificaciones asfálticas, demostrando a través de análisis termo gravimétricos que su composición química es resistente a altas temperaturas lo cual contribuye a realizar un buen trabajo en el ligante (Vargas, 2011).

El desarrollo de este proyecto demuestra que la modificación de un ligante asfáltico con un material como la nanoarcilla trae importantes beneficios como los incrementos en la viscosidad del asfalto, aumento en valores de modulo complejo y disminución del ángulo de fase, indicando un buen comportamiento reológico, efectividad debido a la disminución en los valores de penetración y ductilidad, lo que afirma el buen comportamiento que puede presentar este tipo de asfalto para mejorar los diferentes daños presentados en las estructuras de pavimento (Vargas, 2011).

- *Samuel Zapién Catillo* en su estudio de posgrado e investigación “*Obtención de mezclas de asfalto modificado con sebs y nanoarcilla*” (2015), desarrollo tres modificaciones de 3%, 4% y 6% en base a su peso, implementando porcentajes de nanoarcilla 0.4% y 1.8%, donde se puede determinar que la incorporación de este material proporciona un intercambio catiónico el cual posibilita una mejor interacción con las propiedades de la mezcla del ligante (Zapién Castillo, 2015).

La aplicación de estos modificadores presentó diferentes beneficios a las propiedades asfálticas como el aumento de viscosidad, disminución de la penetración, reducción de la susceptibilidad térmica y de la separación de las fases, aumento del módulo complejo y disminución del ángulo de fase y permite un mejoramiento de la modificación de la dispersión e incorporación de los materiales ante este ligante (Zapién Castillo, 2015).

6.4. MARCO NORMATIVO

Tabla 6.1 Marco Normativo

Origen	Norma	Nombre
Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos Normativa Instituto nacional de vías INVIAS	I.N.V.E – 706 - 13	Penetración de los materiales bituminosos
	I.N.V.E – 707 - 13	Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos– Método del picnómetro
	I.N.V.E – 709 - 13	Puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland
	I.N.V.E – 712 - 13	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos - Aparato de anillo y bola
	I.N.V.E – 724 - 13	Índice de penetración de cementos asfálticos

Fuente: Autor

7. METODOLOGÍA

Para evaluar la implementación de nuevas tecnologías de materiales para carreteras como lo es en este caso el asfalto modificado con caucho, se deben realizar diferentes ensayos con el fin de evaluar y determinar su viabilidad, partiendo de todos los aspectos positivos y negativos presentes en esta nueva alternativa.

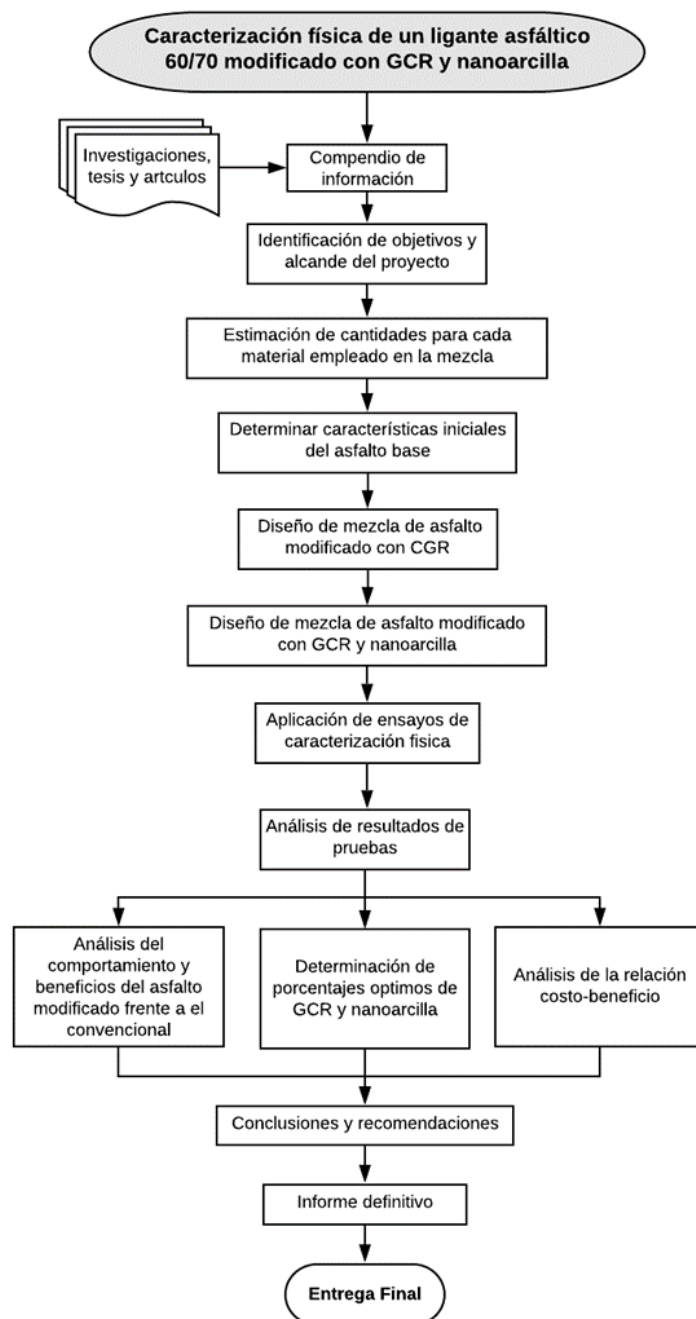


Figura 7.1 Metodología
Fuente: Autores

7.1. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS

7.1.1 Reconocimiento de la investigación

Se inicia a partir de una apropiación del tema, junto con una revisión de los objetivos planteados partiendo de la identificación del problema que presenta la investigación. Seguidamente se realiza un reconocimiento de la pertinencia del proyecto, justificando el por qué este puede contribuir a la sociedad y como la implementación de esta “nueva tecnología” puede convertirse en una solución a corto, mediano y largo plazo.

7.1.2 Recopilación de información

Se realiza un compendio de información donde se estudien por medio de diferentes metodologías o pruebas de laboratorio la aplicación del grano de caucho junto con la nanoarcilla como principales modificadores del asfalto y su viabilidad como primordiales contribuyentes a la mejora de las características entorno a la resistencia de las estructuras de pavimento.

7.1.3 Determinación de materiales

Se establecerá todos los materiales y sus cantidades necesarios para el desarrollo de la investigación, adicional se determinará cuáles serán los procesos por los que el material tendrá que ser expuesto para realizar las pruebas con los menores errores posibles.

Tabla 7.1 Materiales

No.	Material
1	Ligante asfáltico con penetración 60/70
2	Nanoarcilla
3	Grano de Caucho Reciclado (GCR)

Fuente: Autor

7.1.4 Aplicación de ensayos

En esta etapa se realizan los ensayos pertinentes para la determinación de las características que presenta el ligante asfáltico frente a su modificación con dos componentes adicionales en este caso grano de caucho reciclado (GCR) y nanoarcilla. Para esto se consideran dos tipos de modificaciones manejando porcentajes de 12% y 13% con respecto al asfalto base, donde se tiene un 10% en CGR para ambas modificaciones con un 2% y 3% en nanoarcilla.

Tabla 7.2 Modificaciones de ligante asfáltico

No.	Especificación
1	LA + 10% GCR + 2% NA
2	LA + 10% GCR + 3% NA

Fuente: Autor

7.1.5 Análisis de resultados

En este componente se evalúan todos los resultados obtenidos en los diferentes ensayos aplicados, analizando el comportamiento y caracterización física del asfalto modificado frente al convencional, los beneficios que presenta su aplicación y su relación costo/beneficio, para así determinar la viabilidad la investigación.

7.1.6 Conclusiones e informe final

Por último, se concluye todos los aspectos más importantes junto con las ventajas y desventajas que se presentan en el desarrollo del proyecto; posteriormente se realizan recomendaciones pertinentes, las cuales pueden ser utilizadas para futuras investigaciones.

8. DETERMINACIÓN DE MATERIALES Y APLICACIÓN DE ENSAYOS

8.1. DETERMINACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

8.1.1 Grano de Caucho Reciclado (GCR)

Inicialmente se identificaron las empresas mediante las cuales es posible adquirir el caucho necesario para el correcto desarrollo de la investigación, teniendo en cuenta factores económicos y la garantía de una buena condición del material, escogiendo según ello la empresa Satélite S.A.S, localizada en la ciudad de Valledupar, dedicada principalmente al triturado de llantas recicladas y manejo de este material.



Figura 8.1 Grano de Caucho Recilado (GCR)
Fuente: Autor

8.1.2 Nanoarcilla

Este material fue adquirido de la empresa Bentonitas Colombianas S.A.S., localizada en el municipio de Bugalagrande, Valle del cauca, la cual se encuentra debidamente certificada, garantizando con ello la buena calidad del material según lo requerido para el correcto desarrollo de la investigación.



Figura 8.2 Nanoarcilla
Fuente: Autor

8.1.3 Ligante asfáltico 60/70

Fue necesaria la implementación de un ligante asfáltico con penetración 60/70 teniendo en cuenta las propiedades que el mismo presenta, razón por la cual este se obtuvo de la planta Pasolin S.A.S., localizada en la ciudad de Villavicencio, Meta,

y cuyo tratamiento del material es el adecuado de acuerdo a las características especificadas en la ficha técnica del mismo, proporcionada por la empresa.



Figura 8.3 Planta de materiales asfálticos Pasolin S.A.S.

Fuente: Autor

El material adquirido presentaba las siguientes características:

Tabla 8.1 Características del ligante asfáltico 60/70

Ensayo	Norma	Valor Reportado		Referencia	
		°F	°C	°F	°C
Punto de ablandamiento	ASTM D 36	118	48,0	107-131	53-55
Punto de inflamación	ASTM D 92	516	269	Min 450	Min 232
Penetración a 25°C, 100g y 5s (0,1 mm) al asfalto original	ASTM D 92	67,0		60 70 mm/10	
Viscosidad Dinámica @ 60°C (P)	ASTM D 4402	131,5 – 135,1		Reportar	
Índice de penetración	I.N.V. E-724	-1,0		-1 hasta +1	

Fuente: Autor

8.2. APLICACIÓN DE ENSAYOS

8.2.1 Equipos de laboratorio

Los equipos descritos a continuación son propiedad de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, la cual permitió su empleo para el correcto desarrollo de la presente investigación.

- **Penetrómetro**

Este instrumento permite determinar la consistencia de materiales asfálticos sólidos o semisólidos, los cuales presentan características bituminosas, teniendo en cuenta

que está compuesto por un soporte móvil y una aguja de penetración, estableciendo con su empleo la profundidad de penetración de la aguja en dicho material y posteriormente, su consistencia (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).



Figura 8.4 Penetrómetro
Fuente: Autor

- **Picnómetro**

Es un recipiente de vidrio conformado por un matraz, cuya forma se asemeja a una pera, y un tapón autoenrasante, el cual no permite que existan fugas. Este permite determinar la densidad de un líquido determinado empleando para ello las mediciones de volumen especificadas en el matraz y una balanza de precisión (QuercusLab, 2015).

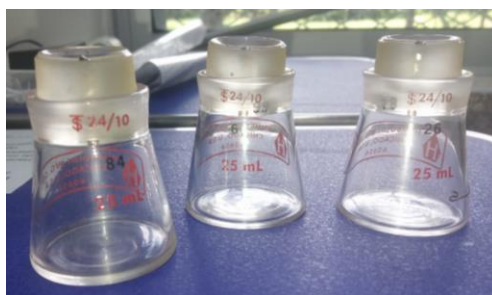


Figura 8.5 Picnómetro
Fuente: Autor

- **Aparato de copa abierta de Cleveland (de operación manual)**

Se emplea con el propósito de determinar los puntos de inflamación y combustión de los materiales asfálticos, los cuales pueden oscilar entre -18°C y 165°C dependiendo de las propiedades del material estudiado. Está compuesto por un horno eléctrico, un dispositivo de ignición de llama, un plato aislante, un manómetro y un soporte para termómetro, principalmente (UTEST, s.f.).

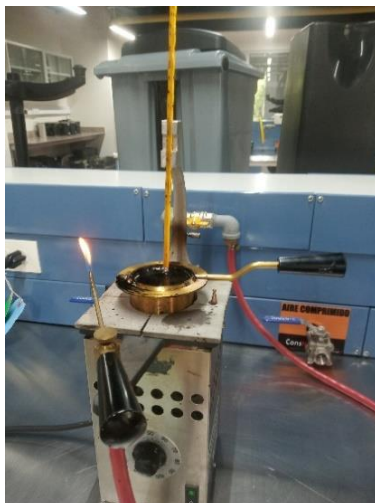


Figura 8.6 Aparato de copa abierta Cleveland
Fuente: Autor

- **Aparato digital automático de anillo y bola**

Permite determinar el punto de ablandamiento de materiales bituminosos como lo es el asfalto. Está compuesto por dos sensores que permiten determinar el punto de ablandamiento del material dependiendo de la caída de las bolas que también conforman el aparato, así como por un agitador magnético y un sistema electrónico de enfriamiento (MATEST, 2017).



Figura 8.7 Aparato digital automático de anillo y bola
Fuente: Autor

8.2.2 Ensayos de laboratorio

- **Modificación de asfalto**

Para la realización de este procedimiento, el material debió ser trasladado a la Pontificia Universidad Javeriana en la ciudad de Bogotá, donde se procedió con la mezcla de los materiales por medio de la técnica denominada “vía húmeda”,

adicionando así los modificadores (GCR y Nanoarcilla) al asfalto a alta temperatura, realizando así las respectivas modificaciones de acuerdo a los materiales estudiados y a los porcentajes inicialmente establecidos para cada uno de ellos, como se demuestra a continuación:

Tabla 8.2 Detalles de las modificaciones asfálticas realizadas

Ligante asfáltico	Asfalto 60/70 (kg)	GCR (%)	Nanoarcilla (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	rpm
LA+ GCR + NA	1.2	10	2	180	30	3600
LA+ GCR + NA	1.2	10	3	180	30	3600

Fuente: Autor

El asfalto debe precalentarse durante aproximadamente una hora, garantizando una mejor transferencia de calor, agregando así los modificadores y mezclando el material por medio de agitadores a una temperatura de 180°C y una velocidad de 3600 rpm en un periodo de 30 minutos, homogeneizando de esta forma el material.



Figura 8.8 Proceso de modificación del asfalto

Fuente: Autor

Al finalizar este procedimiento, se continúa caracterizando físicamente cada modificación empleada mediante la realización de diferentes ensayos de laboratorio, teniendo en cuenta la distribución de muestras de acuerdo a cada tipo de ensayo propuesto y la preparación de las mismas.

Tabla 8.3 Caracterización física de las modificaciones asfálticas

Ensayo	Norma	Cantidad de muestras	
		LA + 10% GCR + 2% NA	LA + 10% GCR + 3% NA
Penetración	INV.E-706	3	3
Gravedad Especifica	INV.E-707	3	3
Punto de inflamación y de combustión	INV.E-709	1	1
Punto de Ablandamiento	INV.E-712	2	2

Fuente: Autor

- **Ensayo de penetración de los materiales asfálticos**

Para el ensayo de penetración inicialmente se lleva a cabo la preparación de la muestra, en donde se realiza el precalentamiento del material en el horno a una temperatura de 130 °C durante dos horas, cuando la muestra se encuentre totalmente fluida se procede a vaciar dentro de tres recipientes y posteriormente se dejan al aire libre (entre temperaturas de 15 °C a 30 °C) durante un periodo de una a dos horas como se estipula en la norma INV E-706-13 (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

Este ensayo se usa para medir la consistencia de los materiales bituminosos a una temperatura establecida de ensayo, la penetración se describe como una distancia milimétrica hasta la cual se introduce verticalmente una aguja en condiciones de carga, tiempo y temperatura definidas (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

Luego del tiempo de reposo de las muestras se proceden a llevar a un recipiente para su inmersión en un baño de agua destilada a una temperatura de 25 °C por un periodo de hora y media a dos horas como se indica en la norma INV E-706-13; transcurrido ese tiempo se realiza la prueba durante 5 segundos por muestra con una carga móvil junto con la aguja de 100g. El ensayo permite determinar la consistencia de los materiales bituminosos y directamente evalúa su rigidez, partiendo de la noción que entre más rígido sea el material la penetración de la aguja será menor (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

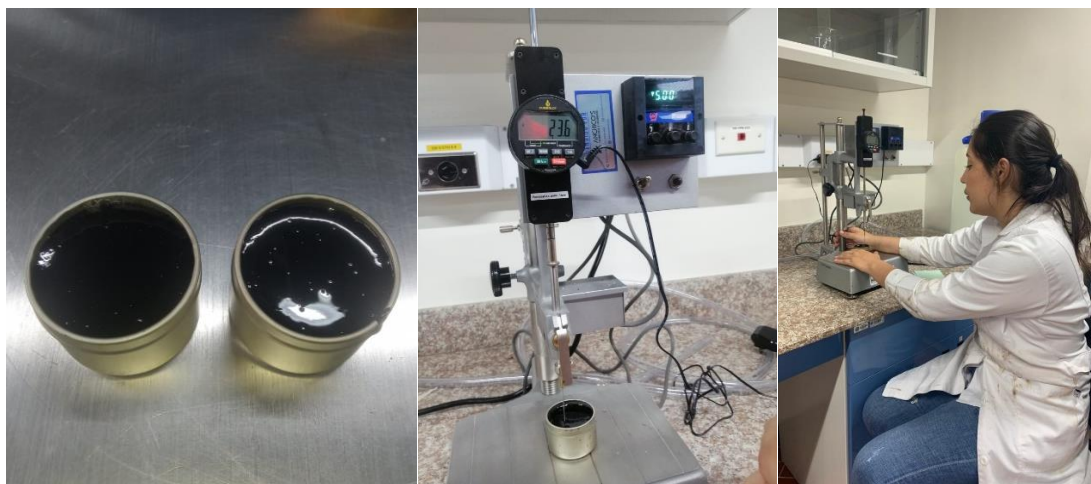


Figura 8.9 Ensayo de penetración
Fuente: Autor

- **Ensayo de gravedad específica**

El ensayo permite determinar la gravedad específica (densidad relativa) y la densidad de los materiales asfálticos junto con su composición volumétrica a través de la implementación de un picnómetro debidamente calibrado (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

El método consiste en registrar inicialmente el peso del picnómetro totalmente seco y limpio con su respectiva tapa, luego se sumerge en un baño de agua destilada se tapa y se procesa a pesar, posteriormente se agrega el material asfáltico el cual debe estar precalentado en un horno a 130 °C durante dos horas, y se deja enfriar el picnómetro a una temperatura ambiente para luego registrar su peso, por último, se sumerge nuevamente el picnómetro que contiene asfalto modificado al baño de agua destilada permitiendo que ingrese el agua de manera que cuando se tape no preserve burbujas y se procede a pesar para registrar su masa como lo indica la norma INV E-706-13 (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).



Figura 8.10 Ensayo de gravedad específica
Fuente: Autor

- **Ensayo de punto de inflamación y combustión**

El método mide la temperatura que registra el ligante asfáltico cuando este experimente una llama intermitente y una constante. Esto se desarrolla con el fin de evitar que en procesos de almacenamiento y fabricación de mezclas asfálticas futuras se presenten problemas de combustión e inflamación (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

Este ensayo consiste en agregar el material asfáltico debidamente precalentado (en un horno a 130 °C durante dos horas) a una copa de ensayo conocida como copa abierta de Cleveland hasta el nivel que se indica en la copa según la norma INV E-709-13, seguidamente se calienta la copa a una temperatura entre 10 a 15 °C y se aumenta la temperatura por minuto hasta alcanzar los 28 °C, cuando el material a superado los 56°C se realiza el barrido con la llama de ensayo como se indica en la norma INV E-709-13 (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

Para identificar el punto de inflamación, el material contenido en la copa debe emitir la primera llama o chispa en la menor temperatura aplicada como se evidencia en la figura 8.11. Por otro lado, el punto de combustión se presenta cuando el material se encuentra en su temperatura máxima de ignición presentando una llama que cubre gran parte del material manteniéndose durante 5 minutos (Bastidas Martinez & Rondón Quintana, 2020).



Figura 8.11 Ensayo de punto de inflamación y combustión
Fuente: Autor

- **Ensayo de punto de ablandamiento**

Este parámetro mide la temperatura en que fluye un material asfáltico en el momento en que pasa de un estado sólido a líquido y se calcula con el resultado del promedio de las dos temperaturas indicadas en las muestras. El ensayo permite determinar el estado de operación del ligante asfáltico para el desarrollo y aplicación de futuras mezclas en servicio, y se recomienda que dicha temperatura no sea alcanzada ya que generaría pérdida de rigidez y esto afectaría su estructura (Bastidas Martinez & Rondón Quintana, 2020).

Para el desarrollo del ensayo inicialmente se agrega el material asfáltico modificado y debidamente precalentado en dos anillos de latón, se colocan una esfera de acero sobre cada anillo que contiene la muestra, se acomodan los anillos sobre una plataforma metálica, y luego se ubica el montaje dentro de un beaker en un baño de agua destilada a una temperatura de 1 a 5 °C como lo indica la norma INV E-712-13, posteriormente, se instala el beaker y la plataforma metálica en el equipo automático para determinar el punto de ablandamiento como se evidencia en la figura 8.12 y se registran los respectivos datos (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

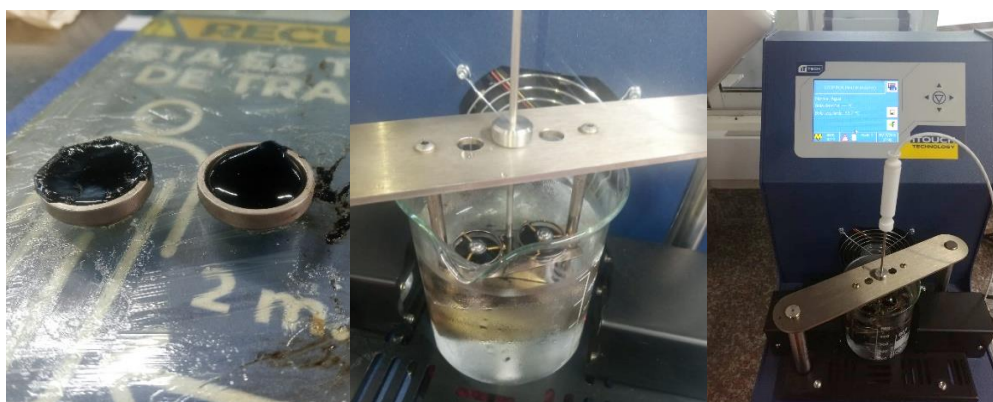


Figura 8.12 Ensayo de punto de ablandamiento
Fuente: Autor

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como apoyo a la investigación se emplea como guía los requisitos presentados en el artículo 413 de las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras del INVIAS donde se presentan las especificaciones que se requieren para el suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado indicadas en la tabla 9.1, para realizar algunas comparaciones con resultados presentados en las pruebas de laboratorio junto con el ligante asfáltico 60/70 base.

Tabla 9.1 Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado

Propiedades	Norma	Valor de referencia	
		Min	Max
Penetración a 25° C, 100g, 5s (1/10 mm)	INV E-706	25	75
Punto de ablandamiento (°C)	INV E-712	54	-
Punto ignición mediante copa abierta de Cleveland (°C)	INV E-709	230	-

Fuente: (INVIAS, 2013)

9.1. ENSAYO DE PENETRACIÓN

A partir de la norma INV E-706-13 se realizó la aplicación del ensayo en las respectivas muestras arrojando los resultados presentados en las tablas 9.2 y 9.3 donde se pudo identificar las consistencias de estas modificaciones posterior a la inserción de la aguja.

Tabla 9.2 Resultado ensayo de penetración para modificación LA + 10% GCR + 2% NA

Muestra	Ensayos			Promedio
	1	2	3	
Molde 1	34,40	32,40	33,00	33,27
Molde 2	29,00	30,80	28,40	29,40
Molde 3	30,40	29,80	31,30	30,50

Fuente: Autor

Tabla 9.3 Resultado ensayo de penetración para modificación LA + 10% GCR + 3% NA

Muestra	Ensayos			Promedio
	1	2	3	
Molde 1	23,70	28,20	27,40	26,43
Molde 2	26,80	27,40	28,80	27,67
Molde 3	28,80	29,80	29,20	29,27

Fuente: Autor

Los resultados presentados en la prueba indican que los asfaltos modificados con GCR y Nanoarcilla presentan mayor rigidez en comparación al asfalto convencional 60/70, ya que sus valores de penetración promedio están entre 31,01 y 27,79 mm

a diferencia del asfalto convencional que está en 67,0 mm como se evidencia en la tabla 8.1.

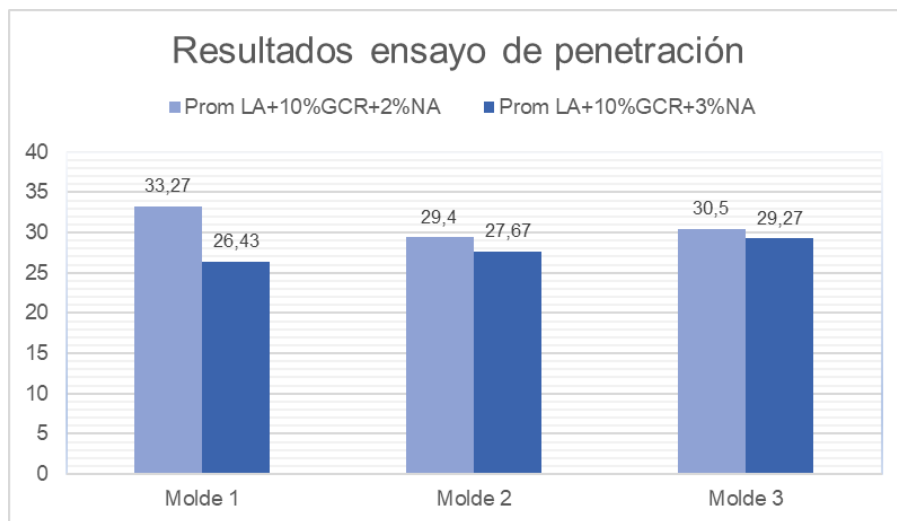


Figura 9.1 Resultados promedio ensayo penetración

Fuente: Autor

Según los resultados arrojados por el ensayo presentados en la figura 9.1, se puede identificar que las muestras que contenían el asfalto modificado con 10% GCR + 3% NA presentan una consistencia más rígida debido a sus valores de penetración bajos en comparación a las muestras de asfalto modificado con 10% GCR + 2% NA, sin embargo, cabe resaltar que las dos modificaciones arrojan valores de penetración muy cercanos, a excepción del molde 1 en donde presenta mayor rigidez la muestra modificada con 10% GCR + 3% NA, a diferencia de las demás muestras.

9.2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

El desarrollo del ensayo arrojó los resultados presentados en las tablas 9.4 y 9.5, donde se evidencia que el picnómetro numero 66 tanto para el asfalto modificado con 10% GCR + 2% NA como para el modificado con 10% GCR + 3% NA presentan un valor de gravedad especifica inferior a las demás muestras lo que determina que para este caso el material asfáltico presenta una composición volumétrica menor, sin embargo, cabe resaltar que para las demás muestras localizadas en los picnómetros 26 y 84 tienen una tendencia a presentar composiciones muy similares ya que su peso específico es muy semejante.

A = Peso del picnómetro (incluido el tapón)

B = Peso del picnómetro con agua

C = Peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto

D = Peso del picnómetro con asfalto y con agua

Tabla 9.4 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación LA + 10% GCR + 2% NA

Numero Picnómetro	Peso picnómetro (g)				Gravedad Específica
	A	B	C	D	
26	37,89	63,30	52,25	63,67	01,03
66	36,33	62,80	57,32	61,45	00,94
84	39,11	63,50	56,93	65,10	01,10

Fuente: Autor

Tabla 9.5 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación LA + 10% GCR + 3% NA

Numero Picnómetro	Peso picnómetro (g)				Gravedad Específica
	A	B	C	D	
26	37,89	63,30	57,58	63,50	01,01
66	36,33	62,80	58,59	61,60	00,95
84	39,11	63,50	57,83	64,70	01,07

Fuente: Autor

9.3. ENSAYO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN

A partir de la normal INV E-709-13 para la determinación de los puntos de inflamación y combustión se arrojaron los resultados de la tabla 9.6 donde se puede evidenciar que la muestra que llego primero a su punto de inflamación es la que se encuentra modificada con 10% GCR + 3 % NA con una temperatura de 241 °C, indicando que presenta una respuesta más rápida a la aplicación de calor a diferencia de la muestra modificada con 10% GCR + 2% NA la cual llego a 261 °C; de igual manera, en el caso del punto de combustión, la muestra con menor porcentaje de Nanoarcilla (LA + 10% GCR + 2% NA) presenta su estado de ignición a una menor temperatura como lo evidencia la tabla 9.7.

Tabla 9.6 Resultado ensayo punto de inflamación

Modificación	Valor observado		C1	C2	C3
	°C	°F	°C	°F	°C
LA+10%GCR+2%NA	260,00	500,00	261,36	502,46	261,35
LA+10%GCR+3%NA	240,00	464,00	241,36	466,46	241,35

Fuente: Autor

Tabla 9.7 Resultado ensayo punto de combustión

Modificación	Valor observado		C1	C2	C3
	°C	°F	°C	°F	°C
LA+10%GCR+2%NA	300,00	572,00	301,36	574,46	301,35
LA+10%GCR+3%NA	350,00	716,00	381,36	718,46	381,35

Fuente: Autor

Según los resultados arrojados por la prueba de laboratorio, el asfalto modificado con 10% GCR + 2% NA y 10% GCR + 3% NA tiene una menor resistencia a la inflamación ya que su temperatura esta en un rango de 261 °C – 241 °C a diferencia

del asfalto base 60/70 el cual llega a su punto de inflamación a 269 °C como se evidencia en la tabla 8.1.

9.4. ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Con base en la norma INV E-712-13 se realizó el ensayo para determinar el punto de ablandamiento arrojando los resultados presentados en la tabla 9.8 donde se puede identificar que el anillo que contenía la muestra modificada con ligante asfáltico + 10% GCR + 3% NA presenta una mayor resistencia a llegar al punto de fluidez con una temperatura de 59 °C en comparación con la muestra modificada con LA + 10 % GCR + 2% NA la cual llega a una temperatura de 55 °C aproximadamente, esto nos indica que la muestra con mayor porcentaje de nanoarcilla presenta una mayor rigidez lo que puede inferir en una mayor resistencia a las deformaciones del asfalto (Bastidas Martinez & Rondón Quintana, 2020).

Tabla 9.8 Resultado ensayo punto de ablandamiento

Modificación	Bola derecha °C	Bola izquierda °C	Promedio °C
LA+10%GCR+2%NA	55,70	54,00	54,85
LA+10%GCR+3%NA	57,50	61,20	59,35

Fuente: Autor

Por otra parte, en comparación al ligante asfáltico base 60/70 el cual presenta un punto de ablandamiento a una temperatura de 48 °C como se evidencia en la tabla 8.1, se puede determinar que adición de GCR y nanoarcilla le proporcionan al asfalto una mayor rigidez y viscosidad permitiéndole tolerar una mayor resistencia a las altas temperaturas.

10.RESULTADOS E IMPACTOS

10.1. RESULTADOS

Tabla 10.1 Resultados esperados

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Se identificó las cantidades iniciales con las cuales se realizó la caracterización física del material.	Recopilación y análisis de investigaciones existentes.	Objetivo 1
Se determino cuál de los dos porcentajes de modificación presenta mayores ventajas para futuras aplicaciones en mezclas asfálticas.	Ensayos de laboratorio comparando la aplicación de los asfaltos base y modificado.	Objetivo 2
Se analizo el comportamiento del ligante asfáltico 60/70 base frente al modificado con GCR y nanoarcilla.	Análisis de ensayos de caracterización física.	Objetivo 3

Fuente: Autores

10.2. IMPACTOS

La implementación del grano de caucho reciclado y la nanoarcilla como modificadores del asfalto pueden generar impactos positivos muy importantes, los cuales a medida que pasa el tiempo pueden verse reflejados en factores como la mitigación de la contaminación ambiental, mayor durabilidad de las vías, entre otros aspectos; adicionalmente, la construcción de estructuras de pavimentos podrá ser mucho más rentable, gracias a la aplicación de estos materiales, ya que como materia prima se puede encontrar muy fácilmente.

Tabla 10.2 Impactos

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Ambiental	Reducción de contaminantes producidos por la acumulación de neumáticos.	Reutilización y aplicación de un material que presenta un gran aporte a la contaminación ambiental como lo es el caucho proveniente de las llantas.	Mediano
Económico	Disminución de costo de construcción, mantenimiento y reparación de vías.	La aplicación de esta nueva tecnología generara una disminución en costos de construcción, garantizando una mayor rentabilidad.	Corto
Académico	Contribución a futuras investigaciones	La implementación de estos modificadores de asfalto puede servir como un aporte importante para nuevas investigaciones relacionadas.	Corto

Fuente: Autores

11. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

11.1. CONCLUSIONES

En el proceso de incorporación de los modificadores al ligante asfáltico se observó que los materiales se integraron casi homogéneamente ya que el resultado de la modificación presentó pequeñas partículas de caucho que se resistieron a la exposición de la temperatura de mezcla.

La unión de la nanoarcilla como modificador de ligantes asfálticos no manifiesta una característica notable en su composición volumétrica, es decir, la relación masa volumen de las modificaciones con porcentajes de 10% GCR + 2% NA y 10% GCR + 3% NA presentan resultados semejantes con una diferencia de 0.01, concluyendo que este material se incorpora de tal manera que su composición no presenta variaciones significativas en comparación a las que puede presentar el GCR.

Analizando el ensayo de penetración se determinó que la incorporación de nanoarcilla a un ligante asfáltico convencional modificado con GCR proporciona propiedades de rigidez y viscosidad, permitiéndole al material mostrar una mayor consistencia y así mismo garantizar una mejor respuesta a las posibles deformaciones permanentes que se puedan ver representadas en su periodo de su servicio.

Con la exposiciones de calor a la que se sometieron las muestras, se demostró que uno de los principales beneficios que presenta la unión de estos dos modificadores es la resistencia a las altas temperaturas, evidenciando que la nanoarcilla y el GCR le otorgan al ligante asfáltico una característica de viscosidad y resistencia permitiéndole al material llegar a su punto de combustión a temperaturas entre 301 °C y 381 °C, con lo cual se puede intuir que existe menor probabilidad que presente su ignición durante los procesos de fabricación y diseño de mezclas asfálticas.

Por otra parte, el punto de fluidez del material esta dado gracias el aporte de rigidez y consistencia que otorgado la aplicación de los dos modificadores, los cuales contribuirían al aporte de mejores respuestas a posibles defectos presentados en las estructuras de pavimento y al mismo tiempo garantizar su durabilidad.

A partir de los estudios realizados se puede determinar que la modificación que presenta mayores ventajas tanto de resistencia como de incorporación a un ligante asfáltico 60/70 es la que contiene 10% de GCR + 3%, ya que esta presenta mejores respuestas la exposición de altas temperaturas, un componente visco-elástico producto de la incorporación de GCR y una mayor rigidez frente a la aplicación de cargas.

11.2. TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda que grano de caucho reciclado se encuentre totalmente alejado de la humedad y adicional cuente con las especificaciones mencionadas en el Artículo 413 del INVIAS ya que estas indican el tamaño adecuado que se debe emplear para el desarrollo de ensayos que contengan este tipo de modificador.
- Debido al aporte visco-elástico y de rigidez que proporciona la adición de los modificadores es recomendable que los porcentajes de modificación con respecto al asfalto base GCR sean inferiores a 15% y de nanoarcilla inferiores a 3%.
- Para futuras investigaciones se recomienda continuar con la investigación a través de la determinación de las características mecánicas de un ligante asfáltico 60/70 modificado con GCR y nanoarcilla

BIBLIOGRAFÍA

- Arribas, C. (dic, 2015). *Los neumáticos fuera de uso*. El Ecologista .
- Bastidas Martinez, J. G., & Rondón Quintana, H. A. (2020). *Caracterización de mezclas de concreto asfáltico*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
- Catriel, G. (2008). *Reología en ligantes asfálticos*. Universidad Tecnológica Nacional.
- Consejo de directores de carreteras de iberia e iberoamérica. (2002). *M5.2. Catálogo de deterioros de pavimentos rígidos* . Colección de documentos .
- Convenio interadministrativo 0587-03. (2006). *Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos* . Bogotá D.C: Universidad nacional de colombia .
- Delbono, H. L., & Rebollo, O. R. (2017). *Ahuellamiento en pavimentos asfálticos utilizando geosintéticos*. Medellín: XIXCILA Congreso ibero-Latinoamericano del Asfalto.
- Díaz Claros, C., & Castro Celis, L. (2017). *Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá*. Bogotá: Universidad Santo Tomás .
- Garnica Anguas, P., & Gómez López, J. A. (2001). *Deformaciones permanentes en materiales granulares para la sección estructural de carreteras*. Sanfadila: Instituto mexicano del transporte.
- Grupo Editorial Editec SPA. (2019). La importancia del análisis reológico. *Minería Chilena*.
- Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2013). 706 - Penetración de los materiales bituminosos. En *Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*.
- Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2013). 707 - Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (Método de Picnómetro). En *Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*.
- Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2013). 709 - Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta de Cleveland. En *Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos* .
- Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2013). 712 - Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola). En *Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*.
- INVIAS. (2008). *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tráfico*. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS.
- INVIAS, I. N. (2013). ART. 413 Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado. En *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras* (pág. Capítulo 4).
- Mahecha Nuñez, J. Y. (2013). *Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo*. São Carlos: Universidade de São Paulo.
- MATEST. (2017). MATEST. Obtenido de <https://www.matest.com/es/producto/b070n1-automatic-digital-ring-and-ball-apparatus>

- Navarro Dupré, N. M. (2013). *Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos de uso (NFU) mediante vía seca*. Santiago de Chile : Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas, departamento de Ingeniería civil .
- Negrete , J., Torres Villaseñor, G., & Martínez Flores, E. (2008). Caracterización de tres aleaciones superplásticas utilizando analisis mecánico dinámico (DMA). *Revista Matéria*, 13, 365-373.
- Padilla Rodríguez , A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante ensayo de pista*. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech.
- Perales Caldas , E. R. (2017). *Pavimentos* . Lima : Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- QuercusLab. (24 de Junio de 2015). *QuercusLab*. Obtenido de <https://quercuslab.es/blog/metodo-del-picnometro-para-determinar-densidades/>
- Ramirez Villamizar, A., Ladino Rubio, I. L., & Rosas Ramirez, J. P. (2014). *Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología GAP GRADED para la ciudad de Bogotá*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA , Bogotá D.C.
- Rondón Quintana , H., & Reyes Lizcano, F. (2015). *Pavimentos, materiales, construcción y diseño* (1a ed.). Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Universidad de Costa Rica. (2019). *Asfaltos Modificados con Polímeros. Pavimentos Verdes: La ruta al desarrollo sostenible, Ficha tecnica #4*.
- Universidad de Costa rica. (2019). *Emulsiones Asfálticas. Pavimentos Verdes: La ruta al desarrollo sostenible, Ficha tecnica #5*.
- Universidad de los Andes. (2002). *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas* . Bogotá: Alcaldía mayor de Bogotá D.C. Instituto de desarrollo urbano .
- UTEST. (s.f.). *UTEST*. Obtenido de <https://www.utest.com.tr/es/26079/Probador-de-Punto-de-Ignici-n-Cleveland-de-Copa-Abierta>
- Vargas, J. P. (2011). *Posibilidades de Modificación de Asfaltos con Nano Arcillas*. Bogotá, D.C : Universidad de los Andes.
- Zapién Castillo, S. (2015). *Obtención de mezclas de asfalto modificado con sebs y nanoarcilla*. Ciudad Madero, México: Tecnólogo Nacional de México.