

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN ASFALTO 60/70

MODIFICADO CON GCR Y NANOARCILLA



Por:

Emiro Andrés Lozano Pérez

Oscar Yosid Farid Laguado Jauregui



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE POSTGRADOS

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL

BOGOTÁ, 2021

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN ASFALTO 60/70

MODIFICADO CON GCR Y NANOARCILLA



Por:

Emiro Andrés Lozano Pérez

Oscar Yosid Farid Laguado Jauregui

Documento final presentado como opción de grado para optar al título de Magister en

Infraestructura Vial

Aprobado por:

I.C. Jessica María Ramírez Cuello, MSc.

Directora

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE POSTGRADOS

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL

BOGOTÁ, 2021

Nota de aceptación

Director Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Bogotá, 26 de febrero de 2021

DEDICATORIA

La presente investigación va dedicada primordialmente a Dios por toda la sabiduría y bendiciones que me ha dado a lo largo de mi desarrollo como ingeniero civil, por siempre fortalecerme ante cualquier adversidad y estar conmigo.

Todo este esfuerzo se lo quiero dedicar a mi hija Valentina, quiero ser su modelo a seguir y siempre estar para ella en todo momento ya que es la sonrisa que iluminara todos mis días.

También quiero dedicárselo a mi madre Patricia Pérez y mi esposa Paola Gómez, ya que ellas han sido mis motores y siempre me han estado apoyando para salir adelante, las amo con todo el corazón. Gracias al esfuerzo de ellas he podido culminar esta meta, que no solo es mía sino nuestras.

Emiro Andrés Lozano Pérez

Dedicada a mi Hija Sara Victoria, con su dulzura y amor, me ha dado las fuerzas para afrontar esta etapa de mi vida profesional, iluminando mis pasos día tras días.

Dedicada a mí familia, que han sido mi apoyo en todo momento motivándome cada día a ser mejor hijo, hermano, ser humano y profesional.

Oscar Yosid Farid Laguado Jauregui

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios y a mi familia por motivarme a nunca rendirme y realizar estos estudios de maestría.

Le doy gracias a la Universidad Santo Tomás por apoyarme en este trayecto, y en especial a la Ing. Jessica María Ramírez Cuello por ser mi guía e instructora en esta investigación, más que mi directora una compañera y amiga de hace años que siempre estuvo con su paciencia dándome todo el apoyo para poder sacar cada uno de estos retos planteados en la investigación.

Emiro Andrés Lozano Pérez

Agradezco primeramente a Dios, que ha sido mi apoyo y mi alimento espiritual, siendo parte de todos los planes y proyectos de mi vida.

Agradezco a mi familia, sin ellos no estaría en el lugar que estoy y no sería quien soy ahora.

De igual forma agradezco a la Ing. Jessica María Ramírez Cuello, la cual estuvo guiando esta investigación como directora, compartiendo sus conocimientos y experiencias para culminar satisfactoriamente este paso por la Universidad Santo Tomás.

Y por último quiero agradecer a mis amigos de Maestría que siempre han estado ahí cuando nos hemos necesitado.

Oscar Yosid Farid Laguado Jauregui

RESUMEN

Este trabajo de investigación evalúa las propiedades físicas de un asfalto 60/70 modificado con grano de caucho reciclado (GCR) y nanoarcilla (NA), comparándolas con un asfalto convencional de penetración 60/70 y un asfalto modificado con 10% GCR, a través de los ensayos de penetración, gravedad específica, punto de inflamación y combustión, punto de ablandamiento y viscosidad rotacional.

Los porcentajes definidos de los materiales modificantes, fueron escogidos a partir de la revisión del estado del arte, así; asfalto 60/70 modificado con 10% de grano caucho reciclado (GCR) variando el porcentaje de arcilla en 1%, 2% y 3%.

Con los resultados se pudo encontrar que a medida que se aumentaban los porcentajes de nanoarcilla en el asfalto 60/70 con 10% grano caucho reciclado (GCR) se mejoran satisfactoriamente cada una de las propiedades físicas estudiadas en comparación al convencional y el modificado con 10% GCR y que cada una de las pruebas de laboratorio cumplen con los requisitos mínimos de calidad que debe cumplir el asfalto en Colombia, con el fin de ser utilizados en mezclas asfálticas especificados en la norma INVIAS, 2013.

Cabe resaltar que se debe hacer un estudio de las características mecánicas del asfalto modificado con 10% GCR y 3% nanoarcilla para determinar qué tan efectiva es su funcionalidad.

Palabras Clave: *asfalto, asfalto modificado, estructura de pavimento, grano de caucho reciclado, nanoarcilla, rigidez, temperatura.*

ABSTRACT

This work of investigation evaluates the physical properties of an asphalt 60/70 modified with grain of rubber recycling (GCR) and nanoclay (NA), them comparing with a conventional asphalt of penetration 60/70 and an asphalt modified with 10 % GCR, across the essays of penetration, specific gravity, flash point and combustion, point of softening and stickiness rotacional.

The definite percentages of the materials modifying, they were chosen from the review of the state of the art, this way; asphalt 60/70 modified with 10 % of grain recycled rubber (GCR) changing the percentage of clay in 1 %, 2 % and 3 %.

With the results it was possible to think that as the percentages of nanoclay were increasing in the asphalt 60/70 with 10 % grain recycled rubber (GCR) there were improved satisfactorily each of the physical properties studied in comparison to the conventional one and the modified one with 10 % GCR and that each of the laboratory tests expire with the minimal requisites of quality that must fulfill the asphalt in Colombia, in order to be used in asphalt miscellanies specified in the norm INVIAS, 2013.

It is necessary to highlight that it is necessary to do a study of the mechanical characteristics of the asphalt modified with 10 % GCR and 3 % nanoclay to determine what so effective is his functionality.

Keywords: asphalt, modified asphalt, structure of paving, grain of recycled rubber, nanoclay, rigidity, temperature.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	15
2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
3	JUSTIFICACIÓN	19
4	OBJETIVOS	20
5	ALCANCE	21
6	MARCO DE REFERENCIA.....	22
6.1.1	Modificación de asfalto	24
6.1.2	Ensayo de penetración de los materiales asfálticos	26
6.1.3	Ensayo de densidad y densidad relativa (gravedad específica)	27
6.1.4	Ensayo de punto de inflamación y combustión	28
6.1.5	Ensayo de punto de ablandamiento	30
6.1.6	Ensayo de Viscosidad	30
6.2.1	Llanta o caucho	32
6.2.2	Ligante asfáltico.....	32
6.2.3	Grano de caucho reciclado (GCR).....	34
6.2.4	Nanoarcilla.....	34
6.2.5	Asfalto modificado	36
7	METODOLOGÍA.....	41
7.1.1	Recopilación de información	41
7.1.2	Obtención de Materiales	42
7.1.3	Determinación de los porcentajes de los materiales y modificación	47
7.1.4	Aplicación de ensayos	51

8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
9	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	80
	BIBLIOGRAFÍA	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1. Ensayo de penetración de los materiales asfálticos	26
Tabla 7.1 Caracterización grano caucho reciclado (GCR)	43
Tabla 7.2 Propiedades de la nanoarcilla	44
Tabla 7.3 Características asfalto 60/70.....	46
Tabla 7.4 Modificaciones de ligante asfáltico	48
Tabla 7.5 Detalles de las modificaciones asfálticas realizadas	49
Tabla 7.6 Caracterización física de las modificaciones asfálticas.....	51
Tabla 7.7 Resultado ensayo de penetración para modificación Asfalto 60/70 + 10% GCR + 1% NA	53
Tabla 7.8 Resultado ensayo de penetración para modificación Asfalto 60/70 + 10% GCR + 2% NA	53
Tabla 7.9 Resultado ensayo de penetración para modificación Asfalto 60/70 + 10% GCR + 3% NA	53
Tabla 7.10 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación Asfalto 60/70 + 10% GCR + 1% NA.....	56
Tabla 7.11 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación Asfalto 60/70 + 10% GCR + 2% NA.....	56
Tabla 7.12 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación Asfalto 60/70 + 10% GCR + 3% NA.....	56
Tabla 7.13 Resultado ensayo punto de inflamación	58
Tabla 7.14 Resultado ensayo punto de combustión	59
Tabla 7.15 Resultado ensayo punto de ablandamiento	61

Tabla 7.16 Viscosidad A 60/70 + 10% GRC + 1% NA	63
Tabla 7.17 Viscosidad A 60/70 + 10% GRC + 2% NA	64
Tabla 7.18 Viscosidad A 60/70 + 10% GRC + 3% NA	64
Tabla 8.1 Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado.....	65
Tabla 8.2 Resultado ensayo de penetración.....	66
Tabla 8.3 Resultado ensayo de gravedad específica.....	69
Tabla 8.4 Resultado ensayo punto de inflamación	71
Tabla 8.5 Resultado ensayo punto de combustión	71
Tabla 8.6 Resultado ensayo punto de ablandamiento.....	74
Tabla 8.7 Resultado ensayo de viscosidad	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1 Perfil típico de una estructura de pavimento flexible.....	22
Figura 6.2 Proceso de fabricación del asfalto-caucho (vía húmeda).....	24
Figura 6.3 Penetrómetro	26
Figura 6.4 Picnómetro	27
Figura 6.5 Aparato de copa abierta Cleveland	29
Figura 6.6 Aparato digital automático de anillo y bola	30
Figura 6.7 Evolución de la viscosidad con la temperatura.	31
Figura 6.8 Viscosímetro rotacional	32
Figura 6.9 Composición química del asfalto	33
Figura 6.10 Estructura de la montmorillonita.....	35
Figura 7.1 Metodología	41
Figura 7.2 Dispersor de Asfalto.....	42
Figura 7.3 Grano de Caucho Reciclado (GCR).....	44
Figura 7.4 Nanoarcilla (NA).....	46
Figura 7.5 Planta de materiales asfálticos Pasolin S.A.S.	47
Figura 7.6 Porcentajes de adición para asfalto	48
Figura 7.7 Proceso de modificación del asfalto.....	50
Figura 7.8 Muestras modificadas	50
Figura 7.9 Muestra para ensayo de penetración	52
Figura 7.10 Ensayo de penetración.....	54
Figura 7.11 Llenado de picnómetros	55
Figura 7.12 Ensayo de gravedad específica.....	55

Figura 7.13 Ensayo de punto de inflamación y combustión.....	58
Figura 7.14 Anillos metálicos con muestra de asfalto modificado.....	60
Figura 7.15 Montaje del ensayo de punto de ablandamiento	60
Figura 7.16 Ensayo de punto de ablandamiento.....	61
Figura 7.17 Vástagos cilíndricos con muestra de asfalto modificado	62
Figura 7.18 Ensayo de Viscosidad	63
Figura 8.1 Resultados promedio ensayo penetración	67
Figura 8.2 Resultados ensayo penetración	68
Figura 8.3 Ensayo de gravedad específica	69
Figura 8.4 Gravedad específica promedio.....	70
Figura 8.5 Comparación del punto de inflamación y punto de combustión.....	73
Figura 8.6 Punto de ablandamiento	75
Figura 8.7 Análisis del punto de ablandamiento	76
Figura 8.8 Temperatura ensayo de viscosidad.....	78

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 6.1. Cálculo de gravedad específica máxima de la mezcla.....	28
Ecuación 6.2. Corrección punto de inflamación y combustión.....	29

1 INTRODUCCIÓN

Las estructuras de pavimentos se encuentran construidas por diferentes capas de materiales, las cuales son capaces de resistir los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares que se reciben directamente en la capa de rodadura trasladadas a los estratos inferiores, proporcionando así una superficie rodante plenamente funcional (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Uno de los tipos de pavimento más utilizado para la construcción de carreteras es el flexible, el cual está conformado por una capa de rodadura en mezcla asfáltica, susceptible a daños por fatiga y deformación permanente, debido al paso repetitivo de cargas o aumento del tráfico (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Estos son daños que ocurren con frecuencia y que pueden predecirse o evitarse mediante estudios y pruebas a los diferentes materiales que constituyen la estructura del pavimento (Catriel, 2008), dan cabida a la necesidad de mejorar los componentes de los asfaltos convencionales y así obtener mezclas asfálticas que proporcionen mayor periodo de servicio.

El uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros ha sido estudiado a través del tiempo con el fin de mejorar las características mecánicas, químicas y físicas, de tal manera que se incremente la rigidez de estas mezclas y con ello se minimicen los fenómenos relacionados con la fatiga y ahuellamiento. Actualmente en Colombia este tipo de asfaltos modificados con GCR se emplean en mezclas asfálticas en caliente, considerando como las principales ventajas para este tipo de mezclas el aumento de la resistencia a los fenómenos de fatiga y de ahuellamiento, aumento de la resistencia al envejecimiento y agrietamiento por bajas temperaturas. Dentro sus desventajas se pueden encontrar el alto nivel de energía empleado para la elaboración de estas mezclas, debido a que se requieren más procesos para la fabricación afectando de esta manera al medio ambiente.

En cuanto al uso de nanoarcillas en mezclas asfálticas, se han realizado diferentes investigaciones en las cuales se ha evidenciado que este material refleja mejoras en las mezclas asfálticas, dentro de los cuales se puede mencionar el aumento de la estabilidad, módulo resiliente y resistencia a la tracción indirecta, sin embargo, no parecen tener un mejoramiento en el comportamiento a la fatiga de las mezclas a bajas temperaturas (Jahromi & Rajaei, 2013).

Por otro lado, priorizar el uso de materiales reciclados, que además de mejorar las propiedades en las mezclas, brindan construcciones amigables con el ambiente y garantizan una mejor calidad y longevidad.

Por consiguiente, en este proyecto se busca realizar una evaluación del asfalto 60/70 modificado con materiales no biodegradables y que mejoren sus propiedades físicas, como es el caso del grano de caucho reciclado (GCR) y nanoarcilla (NA), y así estudiar la factibilidad de estos, teniendo en cuenta la normativa colombiana.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia, según el INVIAS se ha presentado un incremento en el deterioro de los pavimentos, en el 2020 se reportó que del 80,36% de carreteras pavimentadas, el 47,94% están en mal estado. Diferentes estudios afirman que incorporar nuevos materiales a las mezclas asfálticas convencionales modifican las propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas garantizando mayor resistencia en las capas de rodadura y minimizando daños como fatiga y ahuellamiento, uno de los daños más frecuentes del pavimento flexible, ocasionado en su mayoría por la falta de rigidez, las inadecuadas características del agregado y la compactación insuficiente de la capa. Estas mezclas acumulan deformaciones con cada camión que pasa y eventualmente se formará un camino caracterizado por una inclinación y el deslizamiento lateral correspondiente de la mezcla.

Por esto, como alternativa ha existido un método de modificación del asfalto con caucho, que puede reducir la cantidad de aglutinante asfáltico base y mejorar las propiedades mecánicas del material. Y a la vez tratar uno de los mayores problemas de contaminación ambiental, ya que se disminuye los desechos de llantas presentes dándole una reutilización en la modificación de asfalto y mejorando de manera favorable sus propiedades físicas, sin embargo, la cantidad de estos desechos sin reutilizar sigue siendo considerable, puesto que habitualmente no poseen una buena disposición siendo arrojadas en el espacio público atentando contra la salud pública y generando peligro en diversos factores.

Por lo anterior, el presente proyecto de investigación busca modificar el asfalto con grano de caucho reciclado (elastómeros de alta reticulación) y nanoarcilla, realizando diferentes pruebas de laboratorio con diferentes dosificaciones que nos permitan evaluar las propiedades físicas del asfalto.

Partiendo de la idea plasmada, se busca dar respuesta a los siguientes interrogantes:

¿El asfalto modificado con GCR y nanoarcilla en diferentes porcentajes cumple los requisitos mínimos de calidad especificados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y además mejora sus propiedades?

3 JUSTIFICACIÓN

La aparición de neumáticos y llantas en botaderos, plataformas o áreas verdes es un problema que ha persistido a lo largo de los años, en algunas ocasiones teniendo acumulaciones de agua generando enfermedades como el dengue, Chikunguña y la fiebre amarilla. (Ramírez Villamizar, Ladino Rubio, & Rosas Ramírez, 2014), adicionalmente, las llantas que no son debidamente recicladas o se les da un inadecuado manejo, terminan siendo quemadas produciendo sustancias tóxicas que afectan la atmósfera (Arribas, 2015). Cabe resaltar que actualmente se han venido reutilizando en diferentes proyectos de ingeniería civil, existen estudios que buscan utilizar aglutinante asfáltico modificado con GCR para el proceso constructivo de obras viales, generando mitigaciones en los problemas ambientales y mejorando las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica y la vida útil de los pavimentos (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

Por otro lado, la incorporación de nanomateriales ha demostrado un mejoramiento favorable al ser combinado con diferentes materiales, demostrando que al tener dimensiones nanométricas permiten el incremento en la relación área/masa, dando una mejor adaptación (Zapién Castillo, 2015). Diferentes investigaciones han implementado el uso de nanoarcilla en asfaltos donde se evidencia aumento en su resistencia a altas temperaturas (Vargas, 2011).

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades físicas del asfalto 60/70 modificado con GCR y nanoarcilla

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los porcentajes iniciales de nanoarcilla para adicionar en un asfalto 60/70 modificado con 10% GCR.
- Comparar las propiedades físicas del asfalto 60/70 convencional con los modificados con 10% GCR y nanoarcilla.
- Evaluar el contenido óptimo que genere un desempeño favorable del asfalto modificado con diferentes porcentajes de nanoarcilla y 10% de GCR, con respecto al asfalto convencional mediante la caracterización física.

5 ALCANCE

La presente investigación pretende evaluar el comportamiento del GCR (grano de caucho reciclado) y la nanoarcilla (NA) adicionados a un asfalto 60/70, a través de los diferentes ensayos establecidos por la norma INVIAS.

Las pruebas de laboratorio requeridas están relacionadas con el estudio de las propiedades físicas del asfalto modificado en relación con el convencional, determinando su penetración, punto de inflamación y combustión, punto de ablandamiento, viscosidad y consistencia. Estos como base para establecer el proceso investigativo y el desarrollo del asfalto modificado, con la finalidad de incluir la adición de nuevos materiales en proyecto viales. Este proyecto contribuye a nuevas investigaciones relacionadas con este tema y así proponer una alternativa al uso de asfalto convencional.

Finalmente, se verificará la culminación de cada etapa de la investigación mediante el diseño y entrega de un informe final, donde se presentan los resultados obtenidos y sus análisis, siendo un aporte a la inclusión de nanomateriales en el diseño de mezclas asfálticas.

6 MARCO DE REFERENCIA

6.1 MARCO TEÓRICO

El objetivo principal del proyecto es evaluar las propiedades físicas de un asfalto 60/70 al ser modificado con polímeros (como el caucho) y nanopartículas (como la nanoarcilla) para lograr mejorar los materiales convencionales, dando una mayor rentabilidad y una mejor calidad de infraestructura vial.

Las estructuras de pavimento flexible están discretizadas por diferentes capas, las cuales son compuestas por una capa de asfalto soportada sobre una capa menos rígida, hecha de materiales granulares sin tratar o adheridos (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015), para distribuir todas las cargas o energía del tráfico de vehículos, y llevarlas al nivel inferior de manera más disipada (Navarro Dupré, 2013).

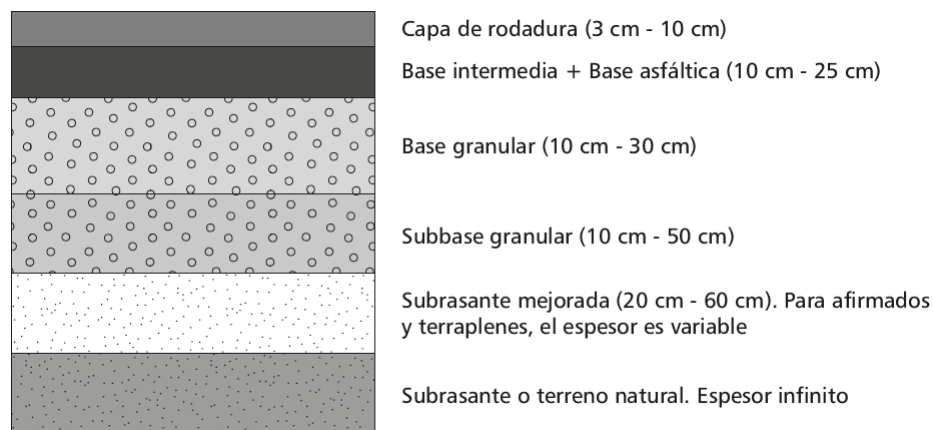


Figura 6.1 Perfil típico de una estructura de pavimento flexible

Fuente: (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

En la construcción de este tipo de estructura, es necesario diseñar de tal manera que se garantice la distribución de los esfuerzos producidos por las acciones de las diferentes cargas vehiculares sobre la que ella transitan, garantizando su funcionalidad y capacidad de impermeabilización.

Para la evaluación y adecuado comportamiento de esta estructura se hace una serie de laboratorios establecidos por las normas INVIAS, los cuales, analizan el asfalto utilizado para la mezcla, como los agregados pétreos seleccionados. Donde se verifica su debido cumplimiento variando las proporciones de elaboración.

Actualmente, se están estudiando diferentes alternativas para solucionar el deterioro de estas estructuras, en las cuales se realizan ensayos de modificación de los componentes del asfalto, por ejemplo, la incorporación de partículas de caucho (GCR) en la estructura del ligante, dando una evaluación de desempeño más favorable en durabilidad de los pavimentos (Universidad de los Andes, 2002). El uso de GCR ha producido una tendencia para la modificación del asfalto. Esto ha conllevado a que se adelante investigaciones de nuevas tecnologías de modificación a los asfaltos en diferentes países, por ejemplo, Brasil, Portugal, Alemania y Estados Unidos, ya están aplicando en sus normativas estas nuevas tendencias.

Por otra parte, la arcilla siendo un material cohesivo que presenta diferentes cambios físicos al estar en contacto con el agua, esto se genera gracias a que está compuesta por láminas de silicatos y aluminios unidas débilmente por una fuerza intermolecular que tiene espesores alrededor de 1 nanómetro (Guile, 2006).

Para entender un poco más la adición de estas partículas en el ligante, es importante aclarar el concepto de la nanotecnología que ha tenido un auge desde hace poco tiempo brindando beneficios satisfactorios en sus aplicaciones, “nano” que asocia a todos los materiales que poseen

dimensiones nanométricas. Siendo esta una de las razones básicas para la utilización de nanoarcilla en la modificación de asfalto ofreciendo grandes áreas superficiales, ya que al entrar en contacto con el ligante, mejora y garantiza las propiedades de este, presentándose una gran adherencia entre ellos (Yu, Xua, Wu, & Liu, 2007).

6.1.1 Modificación de asfalto

La realización de estas técnicas en la cual se utilizan polímeros o aditivos para modificar sus propiedades se puede llevar a cabo en dos vías; como la húmeda y la seca. En la vía húmeda los polímero o aditivos son agregados al asfalto a través de altas temperaturas y finalmente se obtiene un asfalto modificado el cual combina con los agregados, y por vía seca el aditivo o polímero reemplaza parte del agregado y es colocado a altas temperaturas para ser mezclado con el asfalto.



Figura 6.2 Proceso de fabricación del asfalto-caucho (vía húmeda).

Fuente: (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

- **Efectos de mezclas asfálticas modificadas con GCR**

Según investigaciones realizadas por la Universidad de los Andes, en relación a las mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con GCR, estas han presentado disminución en los módulos de las mezclas asfálticas en comparación con las mezclas convencionales y de la misma manera se ha visto que disminuye la deformación plástica al inducir el GCR dentro de la mezcla asfáltica, sin embargo, estos valores se conservaron dentro de los límites aceptables. (Universidad de los Andes, 2002)

- **Efectos de mezclas asfálticas modificadas con Nanoarcilla**

La modificación de mezclas asfálticas con nanoarcillas ha demostrado mejoras en sus propiedades, comportamiento reológico y deformación permanente, así como en la resistencia por fatiga y mayor resistencia a la acción deletérea del agua, esto asociado a la mejora de la interfaz química entre el asfalto con el agregado, optimizando la adherencia entre estos materiales. Por otra parte, las mezclas modificadas con nanoarcilla aumentan la vida útil de las mezclas asfálticas aproximadamente 4 veces más que las mezclas convencionales. (de Melo & Trichês, 2017). No obstante, al aumentar el porcentaje de nanoarcilla en las mezclas asfálticas, ocasiona la disminución de la resistencia a la fatiga de las mezclas, principalmente a temperaturas bajas (Guile, 2006).

En ese sentido para los estudios y análisis de mezclas modificadas con nanoarcillas, es recomendable usar porcentajes de nanoarcillas no mayores al 3%, dado que con este porcentaje se han evidenciado mejoras completas en las mezclas asfálticas.

6.1.2 Ensayo de penetración de los materiales asfálticos

La realización de este ensayo determina la resistencia que puede tener un asfalto al dejarse caer una aguja de 100g como se observa en la Figura 6.3, Por cinco segundos a una temperatura estándar (25°C), de manera que sea posible evaluar tanto su consistencia como su rigidez relativa (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).



Figura 6.3 Penetrómetro

Fuente: Autor

El cálculo de la prueba será la media de los tres valores de penetración, que no deben superar la media de los siguientes números (Tabla 6.1.):

Tabla 6.1. Ensayo de penetración de los materiales asfálticos

Penetración (0.1mm)	0 a 49	50 a 149	50 a 149	Entre 250 y 500
------------------------	--------	----------	----------	--------------------

Diferencia máxima				
entre valores	2	4	12	20
extremos				

Fuente: (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013)

Dado el caso que se superen los límites establecidos en la Tabla 6.1 se debe repetir el ensayo utilizando un segundo molde donde prepare la muestra como lo indica la norma INVIAS-706-13 (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

6.1.3 Ensayo de densidad y densidad relativa (gravedad específica)

Esta prueba se realiza mediante un picnómetro Figura 6.4, el cual es llenado con la muestra y es colocado en agua destilada. Luego es llenado con el material bituminoso se pesa nuevamente y por último se llena de agua percatando que no quede ninguna burbuja de aire (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

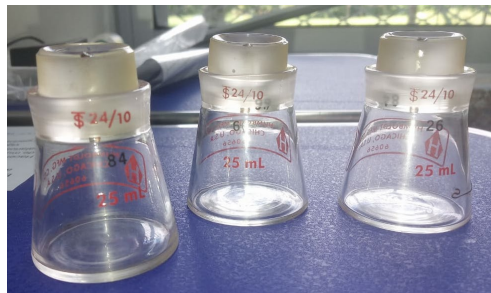


Figura 6.4 Picnómetro

Fuente: Autor

Se obtienen cada uno de los pesos para ser calculada la densidad con una aproximación a 0.001 de la siguiente manera (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013):

$$Densidad\ relativa = \frac{C - A}{[(B - A) - (D - C)]}$$

Ecuación 6.1. Cálculo de gravedad específica máxima de la mezcla.

Dónde: A: Masa del picnómetro (incluido el tapón);

B: Masa del picnómetro lleno de agua;

C: Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto;

D: Masa del picnómetro con asfalto y con agua.

6.1.4 Ensayo de punto de inflamación y combustión

Este método mide la temperatura registrada cuando el asfalto se somete a una llama intermitente y constante. Esto con el fin de evitar problemas de quemaduras e inflamación durante la producción y almacenamiento de mezclas asfálticas en el futuro (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

Se toma una muestra precalentada, la cual es lleva a una copa abierta de Cleveland Figura 6.5, Luego se calienta entre una temperatura de 10° y 15° aumentado la temperatura cada minuto haciendo un barrido con la llama de ensayo hasta que se produzca un destello (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013)



Figura 6.5 Aparato de copa abierta Cleveland

Fuente: Autor

Una vez realizado la prueba, se debe verificar que la presión barométrica real del ambiente no difiera de 101.3 kPa (760 mm Hg), dado el caso se deben realizar las correcciones de los resultados obtenidos, con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Punto de inflamación corregido} = C + 0.25 (101.3 - K)$$

Ecuación 6.2. Corrección punto de inflamación y combustión.

$$\text{Punto de inflamación corregido} = F + 0.06 (760 - P)$$

$$\text{Punto de inflamación corregido} = C + 0.33 (760 - P)$$

Donde: C: Punto de inflamación observado, °C;

F: Punto de inflamación observado, °F;

P: Presión barométrica del ambiente, mm Hg;

K: Presión barométrica del ambiente, kPa.

6.1.5 Ensayo de punto de ablandamiento

Se agrega material asfáltico calentado en dos anillos de latón, colocando dos esferas de acero en cada anillo que contiene la muestra (ver Figura 6.6); como se observa, los anillos son colocados dentro de un beaker que contienen agua destilada con una temperatura de 1 a 5 ° C. Esto con la finalidad de determinar la temperatura en la que el material asfáltico pasa de un estado sólido a líquido, recomendando que dicha temperatura no sea alcanza en la vida útil del pavimento, ocasionando pérdida de rigidez y afectando la estructura (Bastidas Martinez & Rondón Quintana, 2020).

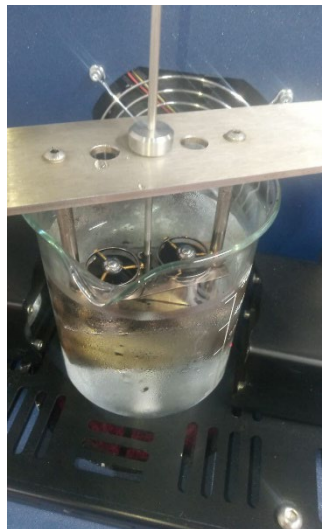


Figura 6.6 Aparato digital automático de anillo y bola

Fuente: Autor

6.1.6 Ensayo de Viscosidad

La viscosidad puede ser entendida como la resistencia que tiene un material a fluir sobre una superficie. Para el caso de los pavimentos, es un parámetro físico que se ha utilizado

principalmente para determinar de manera aproximada las temperaturas de fabricación de mezclas asfálticas y de extensión y compactación de dichas mezclas en el laboratorio. Adicionalmente, la viscosidad ofrece una medida indirecta de la consistencia y rigidez del cemento asfáltico (CA), siendo por lo general más rígido aquel CA que experimente mayor viscosidad. Teniendo en cuenta que la temperatura de compactación del material bituminoso no va ser la misma que se obtiene en laboratorio a la que se necesita en obra, ya que para eso es necesario tener tramos de prueba donde se realicen trabajos con el equipo de compactación y las condiciones de obra (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

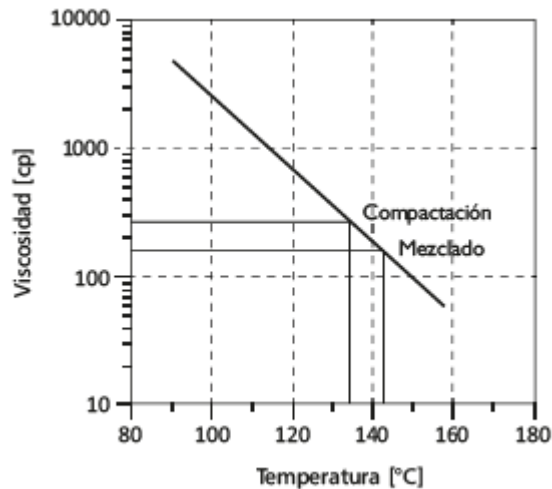


Figura 6.7 Evolución de la viscosidad con la temperatura.

Fuente: (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

El ensayo se realiza en un viscosímetro rotacional (ver Figura 6.8), en el cual se va determinar la viscosidad del asfalto como el promedio de las tres mediciones realizadas (INVIAS, 717 - Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional, 2013).



Figura 6.8 Viscosímetro rotacional

Fuente: Autor

6.2 MARCO CONCEPTUAL

6.2.1 Llanta o caucho

El caucho extraído del neumático es un elastómero derivado del petróleo, y su función principal es proporcionar al vehículo una mayor adherencia en la carretera. Al concluir su vida útil este mantiene propiedades que se pueden reutilizar ya que ofrecen muchos beneficios. (Universidad de los Andes, 2002).

6.2.2 Ligante asfáltico

Es un material que tiene la función de unir dos o más elementos entre sí mediante la transformación física o química denominada adhesivo. El ligante asfáltico ofrece las propiedades de ser estabilizador, sellador o ligante entre agregados. Ofreciendo una capa asfáltica con una gran resistencia y mayor durabilidad. (Perales Caldas , 2017).

Este ligante asfáltico es un material constituido principalmente de bitume y otros elementos químicos (oxígeno, nitrógeno y azufre) en proporciones mínimas. El bitume es una mezcla de hidrocarbonatos solubles en bisulfato de sodio y carbono, formados de moléculas químicas categorizados en cuatro grandes grupos: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos (SARA). Las propiedades físicas del asfalto dependen de los porcentajes e interacciones del grupo SARA, en este sentido, la consistencia o rigidez del asfalto obedece en mayor medida la cantidad de los asfaltenos, la trabajabilidad del material (determinado principalmente por la viscosidad) depende principalmente del porcentaje de resinas y aceites máltenos, y la adherencia resulta de las resinas. (Bastidas Martinez & Rondón Quintana, 2020)

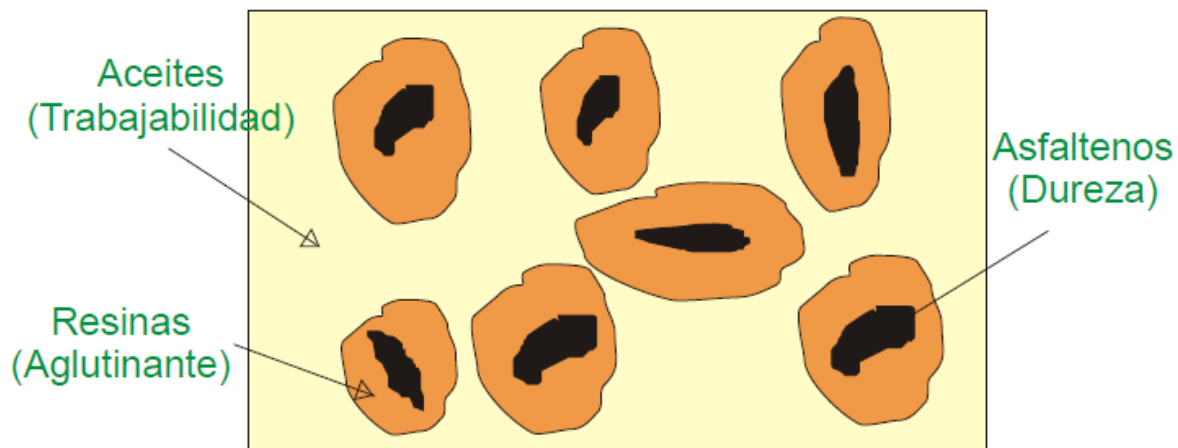


Figura 6.9 Composición química del asfalto

Fuente: (ASOPAC, 2004)

Por lo general el ligante asfáltico es empleado para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente. Siendo este tipo de material el más empleado en Colombia para la elaboración de estas mezclas, aplicadas en la construcción de pavimentos flexibles.

Actualmente, en Colombia los cementos asfálticos (CA) son clasificados principalmente por el grado de penetración (intervalo de penetración en décimos de milímetros 0.1 mm, INV. E-706), y se fabrican tres tipos: CA 40-50, CA 60-70 y CA 80-100. También pueden clasificarse por su grado de funcionamiento (Performance Grade – PG). Para el CA 80- 100 se especifica un PG 58-22 como mínimo, y para los CA 60-70 y CA 40-50, un PG 64-22 mínimo. (Bastidas Martinez & Rondón Quintana, 2020).

6.2.3 Grano de caucho reciclado (GCR)

Son polímeros lineales los cuales fueron sometidos a procesos de vulcanización, adquiriendo una estructura reticulada, la cual le otorga propiedades elásticas. (Reyes Lizcano, 2003)

A través de procesos de trituración y molienda de las llantas usadas, se obtiene el grano de caucho reciclado, siendo de esta manera que se emplea en obras de infraestructura vial tales como en las mezclas de concreto asfáltico modificadas, para aumentar sus características mecánicas y con ello reducir daños relacionados a las deformaciones.

6.2.4 Nanoarcilla

La arcilla es un mineral con propiedades cohesivas, ganando estas características de una fase meteorización de las rocas en extensos periodos de tiempo, lo cual hace que este material sea susceptible a cambios físicos en exposición de diferentes afectaciones naturales.

De ellas se pueden obtener las nanoarcillas, que son minerales silicatos estratificados, que se componen de varias clases según su química y morfología, como lo son la montmorillonita, bentonita, caolinita, etc. Una de las más utilizadas en la industria y la que se tomó como referente para la investigación es la montmorillonita. Al ser modificada presenta una alta resistencia al calor

y mejora sus propiedades mecánicas (Zhang, Junlong , Yiqian, Youpeng, & Yunpun, 2008). La montmorillonita posee una capa compuesta de tetraédricas de sílice (Si_2O)⁻² con una estructura laminar del tipo 2:1 con iones hidroxilo de una capa octaédrica Figura 6.10.

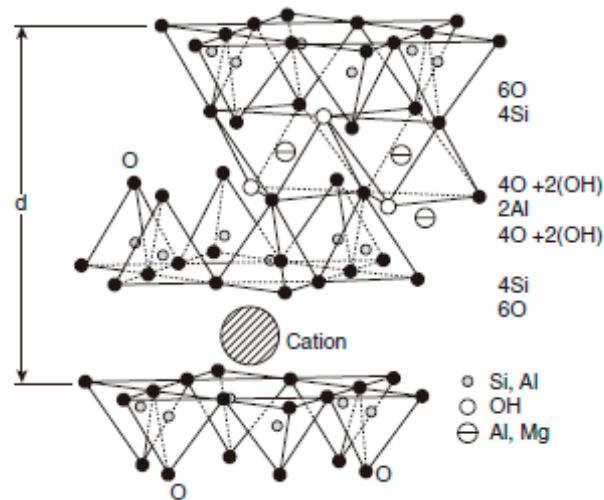


Figura 6.10 Estructura de la montmorillonita

Fuente: (Giannelis, Krishnamoorti, & Manias, 1999)

Para poder obtener la nanoarcilla, se procede a un mezclado con polímeros fundidos mediante extrusor y por el método de polimerización *in situ* transformando en nanopartículas de forma de placa con una relación de aspecto alta (nm X μm). Mediante la modificación de la superficie de las capas de arcilla, consiguiendo que se reduzca la permeabilidad y mejorando la resistencia a la compresión y el desgarre (Yao & You, 2016).

Las nanoarcillas pueden ser utilizadas eficazmente como modificador de asfalto; al emplear nanoarcillas para modificar el cemento asfáltico se incrementan sustancialmente sus propiedades mecánicas. (You, y otros, 2010)

6.2.5 Asfalto modificado

Los asfaltos modificados buscan aumentar la resistencia a la deformación soportando altas temperaturas de servicio, mejorando las propiedades físicas de este. Lo cual se logra aumentando la rigidez del asfalto (Reyes Lizcano, 2003).

Con la adición de nuevos materiales como polímeros, se busca mejorar cada una de las propiedades de los asfaltos. Pudiendo aportar mayor rigidez a la estructura para evitar daño por ahuellamiento, fatiga y envejecimiento, y así logra que se aumente la vida útil del pavimento (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

El uso de elastómeros tales como el grano de caucho, se ha empleado con éxito en la elaboración de mezclas asfálticas modificadas en Colombia.

6.3 ESTADO DEL ARTE

En la investigación de *Armando Ramírez V, Ingryd L. Ladino Rubio y Juan P. Rosas Ramírez “Diseño de mezclas asfálticas con asfalto caucho tecnología GAP GRADED para la ciudad de Bogotá” (2014)*, se encuentra que el objetivo principal, era determinar las propiedades las cantidades óptimas para la modificación de un asfalto con adición de grano caucho median las vías húmeda y seca, para esto se propuso dos estructuras de pavimento una con asfalto convencional y otra con el asfalto modificado, identificando que la AASTHO-93 como método diseño plantea mejor los parámetros para la implementación de esta nuevas tecnologías (Ramírez Villamizar, Ladino Rubio, & Rosas Ramírez, 2014).

Esto dando un avance, ya que los neumáticos alrededor del mundo son unos de los materiales que más demoran en descomponer y causan problemas ambientales como lo demuestra *César M. Diaz 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)*, estudiando como principal medida de mitigación de este material implementado lo GCR en las mezclas asfálticas, obteniendo una mejora en las propiedades mecánicas del asfalto y generando una mayor vida útil de la estructura de la carretera (Diaz Claros & Castro Celis, 2017).

Aportando a estas investigaciones, *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)*, debido a que esta combinación produce una mayor resistencia a cambios de alta temperatura, mostrando una mejora en el comportamiento, ya que se genera una adecuada adherencia neumático-pavimento y se aumenta la resistencia a las deformaciones debidas al tráfico (Navarro Dupré, 2013).

Según este estudio se pudo comprobar que la modificación a través de vía seca la mezcla presenta una mejora en sus propiedades reológicas, y no requiere muchos procesos en planta y siendo así más amigables con el medio ambiente (Navarro Dupré, 2013) .

El uso de nanoarcilla como modificador de las propiedades mecánicas de los aglutinantes asfálticos ha demostrado que mejora sus propiedades de manera eficaz como lo demuestran *Zhanping You a, Julian Mills-Beale, Justin M. Foley, Samit Roy, Gregory M. Odegard, Qingli Dai, Shu Wei Goh* “*Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization*” (2011) En la investigación se utilizaron dos materiales de nanoarcillas diferentes, en los que resaltaron que se debe hacerse un adecuado procedimiento para distribuir la nanoarcilla en la mezcla, garantizando una mejor adherencia entre los materiales. Además, encontraron que se redujo la carga de falla por deformación en comparación del ligante convencional, mientras que los módulos de secantes o tensión directa mostraron un crecimiento con la adición de nanoarcillas (You, y otros, 2010).

En el proyecto de investigación de *Juan Pablo Vargas* “*Posibilidades de modificación de Asfaltos con Nano Arcillas*” (2011), se concluyó que las propiedades mecánicas de los asfaltos modificados 60/70 tienen mejores resultados y que su elaboración no presenta ninguna dificultad, ya que el asfalto modificado muestra tener resistencia a altas temperaturas. En consecuencia, se demuestra que el asfalto modificado tiene unos beneficios muy importantes ya que incrementa la viscosidad del asfalto, el módulo complejo, disminuye el ángulo de fase, la penetración y su ductilidad, dando a entender que estos asfaltos tienen un buen comportamiento (Vargas, 2011).

En la investigación de *Helal Ezzat, Sherif El-Badawy, Alaa Gabr, El-Saaïd Ibrahim Zaki, Tamer Breakah* “*Evaluation of Asphalt Binders Modified with Nanoclay and Nanosilica*” (2016) donde evalúan el comportamiento de un aglutinante asfáltico al incluir diferentes porcentajes de

nanoarcilla desde el 2% hasta el 8%, dando a conocer que cuando se trabaja con rangos mayores al 3% tienen un efecto adverso en las propiedades del aglutinante y son más notorios con el 7% de nanoarcilla (Ezzat, El-Badawy, Gabr, Zaki, & Breakah, 2016).

Samuel Zapién Castillo, en su proyecto de posgrado e investigación “*Obtención de mezclas de asfalto modificado con SEBS y nanoarcilla*” (2015), modificó con tres porcentajes de 3%, 4% y 6% de SEBS e implementando los siguientes porcentajes de nanoarcilla 0.4% y 1.8%, comprobando varias mejoras de las propiedades mecánicas del asfalto, como aumento de la viscosidad, disminución de la penetración, reducción de la susceptibilidad térmica y de la separación de fases, aumento del módulo complejo y disminución del ángulo de fase (Zapién Castillo, 2015).

En el estudio de *João Victor Staub de Melo, Glicério Trichês Evaluation of properties and fatigue life estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay* (2017) Se analizó la influencia de la nanoarcilla organofílica en las propiedades de una mezcla asfáltica, evaluando sus propiedades mecánicas y reológicas, dando como resultado que las propiedades sean superiores en términos de daño producidos por humedad, deformación, resistencia a la fatiga y comportamiento reológico. Reduciendo así la tensión superficial del aglutinante y dando una mejor adhesión entre los agregados (de Melo & Trichês, 2017).

Finalmente, se puede observar que la nanoarcilla tiene impactos positivos en el asfalto, como lo demostraron *Mansour Fakhri, Amir Rahimzadeh Mottahed* en su investigación “*Improving moisture and fracture resistance of warm mix asphalt containing RAP and nanoclay additive*” (2021) en la cual se encontró que se mitigan los daños en el asfalto, como en la formación de

surcos y un aumento en la resistencia a la fractura dando esto a conocer que es un aditivo altamente ventajoso para las mezclas asfálticas (Fakhri & Rahimzadeh Mottahed, 2021).

7 METODOLOGÍA

Para poder evaluar las propiedades físicas del asfalto 60/70 modificado con GCR y nanoarcillas, se realizan diferentes pruebas o ensayos, esperando resultados positivos para así poder determinar nuevas alternativas en el avance de las modificaciones de asfaltos con diferentes materiales.



Figura 7.1 Metodología

Fuente: Autores

7.1 DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS

7.1.1 Recopilación de información

Se realizan las consultas pertinentes donde se identifican los objetivos planteados en la investigación para establecer los parámetros de estudios, como pruebas de laboratorio y metodologías en las modificaciones de asfalto, y realizar así, una caracterización adecuada de cada una de sus propiedades físico – mecánicas.

En este proyecto se busca reforzar la idea de que se puedan desarrollar diseños asfálticos que sean más amigables con el ambiente, utilizando el grano de caucho reciclado (GCR) y mejorando sus propiedades físicas con la adición de nanoarcillas.

Para la evaluación física de las propiedades del asfalto, se utilizaron los equipos disponibles en el laboratorio de la Universidad Santo Tomás – sede Villavicencio, en cuanto a la modificación del asfalto 60/70 con GCR y nanoarcilla, se realizó en los laboratorios de la Pontificia Universidad Javeriana con un dispersor de Asfalto (Ver Figura 7.2).



Figura 7.2 Dispersor de Asfalto

Fuente: Autor

7.1.2 Obtención de Materiales

- **Grano de Caucho Reciclado (GCR)**

El grano de llanta reciclado, fue suministrado por la empresa INCOASFALTO (ver Figura 7.3), caracterizado de la siguiente forma:

Tabla 7.1 Caracterización grano caucho reciclado (GCR)

RESULTADOS CONSOLIDADOS DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO									
Ensayo	Unid	Normatividad	Admisibilidad		Valor de ensayo		Valor medio	Desvest	Cov
			Norma						
			Min	Max	Min	Max			
Humedad	%	ASTM-D1864	---	0.75	---	---	---	---	---
Gravedad específica	gr/m³	ASTM D 297	0.05	1.15	1.1	1	1.1	0.02	2%
Contenido de material ferroso	%	ASTM D 6114	---	0.01	0.002	0.002	0.002	0	0%
Contenido de material no ferroso	%	ASTM D 6114	No debe haber presencia visible		0.0	0.0	0.0	0.0	0%
Contenido de fibra en masa	%	ASTM D-6114	0.1	0.5	---	---	---	---	---
Contenido de polvo mineral	%	---	---	---	---	---	---	---	---
Contenido total de otros elementos: vidrio, arena, madera	%	---	---	0.25	---	---	---	---	---

Fuente: INCOASFALTO



Figura 7.3 Grano de Caucho Reciclado (GCR)

Fuente: Autor

- **Nanoarcilla**

La empresa Bentonitas Colombianas S.A.S. nos suministra la nanoarcilla (ver Figura 7.4), la cual se encuentra debidamente certificada, dando garantía para el adecuado desarrollo de la investigación y con las siguientes propiedades dadas por la empresa:

Tabla 7.2 Propiedades de la nanoarcilla

Propiedades	Nanoarcilla
Modificador Orgánico	Nanodispersos silicato estratificado, hidrocarburo de cadena larga
Base	Montmorillonita
Concentración de modificadores	75 meq/100 g de arcilla
Humedad	< 3%

Pérdida de peso por ignición	35%
Anión	Cloruro amónico
Tamaño de las partículas	
Menos que el 10%	5 μm
Menos que el 50%	15 μm
Menos que el 90%	25 μm
Color	Crema
A granel suelto, kg/m^3	190
A granel envasado, kg/m^3	480
Densidad, g/cm^3	1.88
Resultado de rayos X	$d = 28 \text{ \AA}$
Índice plástico	85%

Fuente: Bentonitas Colombiana (BENTOCOL S.A.S.)



Figura 7.4 Nanoarcilla (NA)

Fuente: Autor

- **Asfalto 60/70**

El asfalto 60/70 con penetración mínima/máxima (0.1 mm) a 25 °C, fue recolectado de la planta Pasolin S.A.S. (ver Figura 7.5) cuyas características proporcionadas por la empresa son las siguiente:

Tabla 7.3 Características asfalto 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	55.2	Reportar
Índice de penetración	I.N.V. E-724	-1.0		-1 hasta +1

Fuente: Pasolín



Figura 7.5 Planta de materiales asfálticos Pasolin S.A.S.

Fuente: Autor

7.1.3 Determinación de los porcentajes de los materiales y modificación

Con base en los antecedentes estudiados, se procedió a establecer las cantidades de cada una de las adiciones que se van a manejar para la modificación del asfalto convencional y con modificación de 10% GCR, pudiendo desarrollar cada uno de los parámetros establecidos en la investigación, adicionalmente se determinaron los procesos a los que deben ser sometidos cada uno de los materiales para así poder obtener los menores errores posibles.

Según lo anterior, como parámetros de estudio se escogieron los siguientes porcentajes de cada material:

Tabla 7.4 Modificaciones de ligante asfáltico

No.	Especificación
1	A 60/70 + 10% GCR + 1% NA
2	A 60/70 + 10% GCR + 2% NA
3	A 60/70 + 10% GCR + 3% NA

Fuente: Autor

De acuerdo con las investigaciones se decide tomar un 10% GCR, para poder plantear las siguientes muestras de control y comparación con las modificaciones establecidas como se observa en la Figura 7.6 .

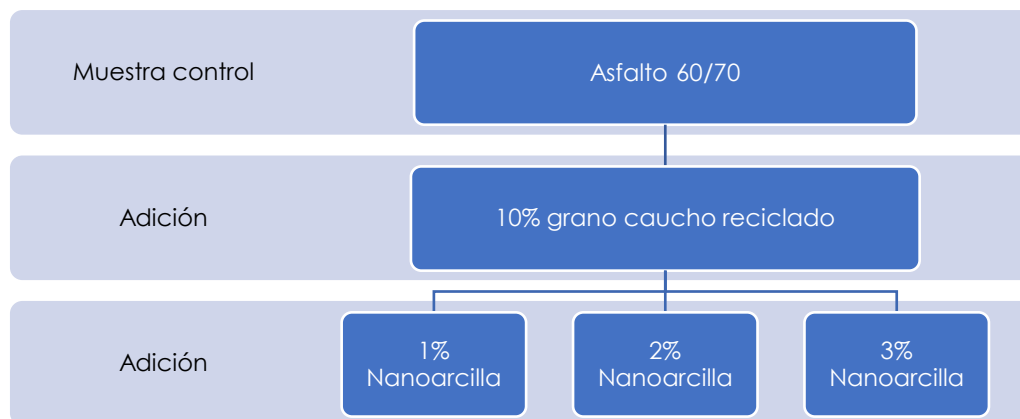


Figura 7.6 Porcentajes de adición para asfalto

Fuente: Autor

- **Modificación de asfalto**

La modificación de asfalto se hizo a través de la técnica denominada “vía húmeda”, adicionando así los modificadores de GCR y Nanoarcilla, teniendo como base de GCR 10% y variando los porcentajes de nanoarcilla (1%, 2% y 3%), a temperaturas de 180° respectivamente. Como se muestra en la Tabla 7.5:

Tabla 7.5 Detalles de las modificaciones asfálticas realizadas

Asfalto	Asfalto 60/70 (kg)	GCR (%)	Nanoarcilla (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	rpm
A 60/70+ GCR + NA	1.2	10	1	180	30	3600
A 60/70+ GCR + NA	1.2	10	2	180	30	3600
A 60/70 + GCR + NA	1.2	10	3	180	30	3600

Fuente: Autor

La modificación del asfalto (ver Figura 7.7) tarda un periodo de 30 minutos con una velocidad de revolución de 3600 rpm homogenizando de este formal material (ver Figura 7.8). Donde se utilizan 1000 gramos para elaborar cada una de las muestras, los cuales son introducidos en el dispersor de asfaltos calentándolo a una temperatura de 180° para poder adicionar la nanoarcilla y el GCR y conseguir una mezcla homogénea.



Figura 7.7 Proceso de modificación del asfalto

Fuente: Autor



Figura 7.8 Muestras modificadas

Fuente: Autor

A continuación, se prepara las siguientes muestras para realizar la evaluación física de cada una de las modificaciones de acuerdo a cada tipo de ensayo propuesto.

Tabla 7.6 Caracterización física de las modificaciones asfálticas

Ensayo	Norma	Cantidad de muestras		
		A 60/70 + 10% GCR + 1% NA	A 60/70 + 10% 10% GCR + 2% NA	A 60/70 + 10% GCR + 3% NA
Penetración	INV.E-706	3	3	3
Gravedad Específica	INV.E-707	3	3	3
Punto de inflamación y de combustión	INV.E-709	1	1	1
Punto de Ablandamiento	INV.E-712	2	2	2
Viscosidad	INV.E-714	3	3	3

Fuente: Autor

7.1.4 Aplicación de ensayos

Se realizan cada uno de los ensayos que nos permitirán evaluar las características físicas que presenta el asfalto 60/70 modificado con cada uno de los porcentajes propuestos (10% GCR y 1%, 2% y 3% nanoarcilla).

Los equipos utilizados para el desarrollo de los ensayos son propiedad de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, permitiendo el correcto desarrollo de esta investigación.

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

En el ensayo de penetración inicialmente se prepara la muestra sometiéndola a un precalentamiento de 130°C en el horno por un periodo de 2 horas, cuando la muestra se encuentre en un estado líquido se procede a vaciar dentro de tres recipientes (ver Figura 7.9), luego se proceden sumergirla en un baño de agua destilada a una temperatura de 25 °C por un periodo de una hora y media a dos horas como determina la norma INV E-706-13 (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

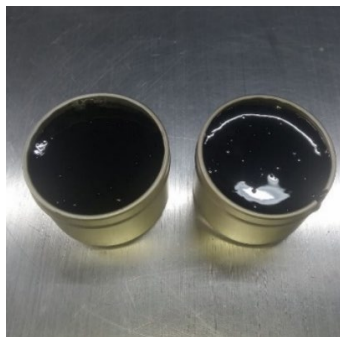


Figura 7.9 Muestra para ensayo de penetración

Fuente: Autor

Se obtuvieron las siguientes lecturas de cada una de las muestras (ver Figura 7.10) presentadas en las Tabla 7.7, Tabla 7.8 y Tabla 7.9 donde se puede identificar las consistencias y de manera indirecta la rigidez que ofrecen estas modificaciones posteriores a la inserción de la aguja, dando a entender que asfalto más rígido será aquel donde la aguja penetre menos (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Tabla 7.7 Resultado ensayo de penetración para modificación Asfalto 60/70 + 10% GCR + 1% NA

Muestra	Ensayos			Promedio
	1	2	3	
Molde 1	36.2	34.5	35.6	35.5
Molde 2	31.2	33.2	35.8	33.4
Molde 3	34.5	35.6	35.6	35.3

Fuente: Autor

Tabla 7.8 Resultado ensayo de penetración para modificación Asfalto 60/70 + 10% GCR + 2% NA

Muestra	Ensayos			Promedio
	1	2	3	
Molde 1	34.4	32.4	33.0	33.27
Molde 2	29.0	30.8	28.4	29.40
Molde 3	30.4	29.8	31.3	30.50

Fuente: Autor

Tabla 7.9 Resultado ensayo de penetración para modificación Asfalto 60/70 + 10% GCR + 3% NA

Muestra	Ensayos			Promedio
	1	2	3	
Molde 1	23.7	28.2	27.4	26.43

Molde 2	26.8	27.4	28.8	27.67
Molde 3	28.8	29.8	29.2	29.27

Fuente: Autor



Figura 7.10 Ensayo de penetración

Fuente: Autor

- **Ensayo de densidad y densidad relativa (gravedad específica)**

Inicialmente se deben pesar cada uno de los picnómetros vacíos con su respectiva tapa y llenos de agua, luego se agrega el material asfáltico modificado el cual fue precalentado a una temperatura de 130°C durante dos horas para la adecuada manipulación y colocación en los picnómetros (ver Figura 7.11), se dejan enfriar a temperatura ambiente y se registra su peso, por último, se sumerge el picnómetro con asfalto modificado en agua destilada para dejar entrar el agua y que cuando esté sea tapado no retenga burbujas, y se pesa nuevamente (ver Figura 7.12) según lo establecido por la norma INV E-707-13 (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013)



Figura 7.11 Llenado de picnómetros

Fuente: Autor



Figura 7.12 Ensayo de gravedad específica

Fuente: Autor

Del ensayo se obtuvieron los siguientes resultados como se observa en la Tabla 7.10, la Tabla 7.11 y la Tabla 7.12:

Tabla 7.10 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación Asfalto 60/70 + 10%

GCR + 1% NA

Muestra	Peso picnómetro (g)				Gravedad Específica
	A	B	C	D	
1	37.89	63.3	50.25	63.52	1.018
2	36.33	62.8	51.45	63.15	1.024
3	39.11	63.5	50.38	63.8	1.027

Fuente: Autor

Tabla 7.11 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación Asfalto 60/70 + 10%

GCR + 2% NA

Muestra	Peso picnómetro (g)				Gravedad Específica
	A	B	C	D	
1	37.89	63.30	52.25	63.67	1.026
2	36.33	62.80	57.32	63.1	1.014
3	39.11	63.50	56.93	63.8	1.017

Fuente: Autor

Tabla 7.12 Resultado ensayo de gravedad específica para modificación Asfalto 60/70 + 10%

GCR + 3% NA

Muestra	Peso picnómetro (g)				Gravedad Específica
	A	B	C	D	
1	37.89	63.3	57.58	64.1	1.042
2	36.33	62.8	58.59	63.4	1.028

3	39.11	63.5	57.83	64.2	1.039
---	-------	------	-------	------	-------

Fuente: Autor

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

A partir de este ensayo se obtuvo la temperatura en que el asfalto al ser calentado y en presencia de una llama, experimenta una llama intermitente (inflamación) y una constante (combustión). Para esto el ensayo se debe realizar agregando el material asfáltico modificado después de haberse 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, Al inicio del ensayo se debe calentar el asfalto a una temperatura inferior de 56° C por debajo del punto de inflamación esperado, luego de allí se reduce la intensidad de la llama y se empieza a incrementar la temperatura a intervalos de 5° a 6° C por minuto hasta alcanzar una temperatura que este por debajo de los 28° C del punto de inflamación esperado, una vez a esta temperatura se inicia el ejercicio de barrido con la llama del ensayo, realizando esta operación una vez por cada 2° C de aumento de la temperatura, hasta llegar al punto de inflamación del asfalto, tal como determina la norma INV E-709-13 (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).

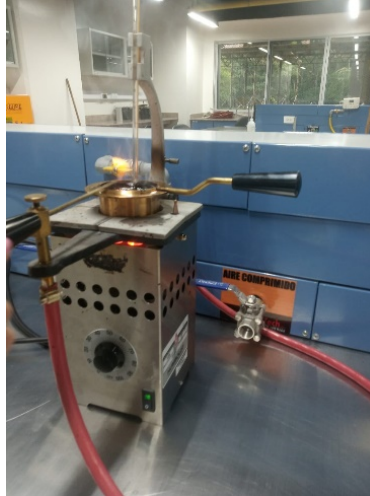


Figura 7.13 Ensayo de punto de inflamación y combustión

Fuente: Autor

Después de realizar dicho ensayo se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 7.13 y la Tabla 7.14:

Tabla 7.13 Resultado ensayo punto de inflamación

Modificación	Valor observado	
	°C	°F
A60/70+10%GCR+1%NA	265.00	515.00
A60/70+10%GCR+2%NA	260.00	500.00
A60/70+10%GCR+3%NA	240.00	464.00

Fuente: Autor

Tabla 7.14 Resultado ensayo punto de combustión

Modificación	Valor observado	
	°C	°F
A60/70+10%GCR+1%NA	290.00	555.00
A60/70+10%GCR+2%NA	300.00	572.00
A60/70+10%GCR+3%NA	350.00	716.00

Fuente: Autor

- **Ensayo de punto de ablandamiento**

Se precalienta la muestra asfalto modificado para poder fundirlo en dos anillos de latón (ver Figura 7.14) a temperatura ambiente, luego sobre cada uno de ellos se coloca unas esferas de acero. Se acomodan los anillos en una plataforma metálica (ver Figura 7.15), colocando todo este montaje dentro de un beaker, el cual debe contener agua destilada a una temperatura entre 1 y 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 7.16 y se registran los respectivos datos (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2013).



Figura 7.14 Anillos metálicos con muestra de asfalto modificado

Fuente: Autor



Figura 7.15 Montaje del ensayo de punto de ablandamiento

Fuente: Autor



Figura 7.16 Ensayo de punto de ablandamiento

Fuente: Autor

Con este ensayo se determinó la temperatura en la que comienza a fluir cada uno de los asfaltos modificados, como se puede observar en la Tabla 7.15:

Tabla 7.15 Resultado ensayo punto de ablandamiento

Modificación	Bola derecha	Bola izquierda
	°C	°C
A60/70+10%GCR+1%NA	53.50	53.70
A60/70+10%GCR+2%NA	55.70	54.00
A60/70+10%GCR+3%NA	57.50	61.20

Fuente: Autor

- **Ensayo de Viscosidad**

Para la preparación del ensayo se precalienta la muestra de asfalto modificado en un horno hasta 130°C en un tiempo determinado de dos horas, para luego colocarla la muestra en unos vástagos cilíndricos (ver Figura 7.17), los cuales se deben pesar previamente vacíos. Se deja a temperatura ambiente y por último se montan en el equipo de viscosidad rotacional (ver Figura 7.18), donde se ajusta la velocidad de rotación a 20 RPM y en un periodo mínimo de 10 minutos se espera que este se equilibre para tomar la lectura de viscosidad, la cual debe estar en Pa-s (Pascal segundo) como indica la norma INV E-717-13 (INVIAS, 717 - Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional, 2013).



Figura 7.17 Vástagos cilíndricos con muestra de asfalto modificado

Fuente: Autor



Figura 7.18 Ensayo de Viscosidad

Fuente: Autor

Por consiguiente, se registraron los siguientes resultados de cada uno de los ensayos de viscosidad a las diferentes muestras de Asfalto 60/70 + 10% GCR y sus diferentes adiciones de nanoarcilla, como se observa en las Tabla 7.16, Tabla 7.17 y Tabla 7.18.

Tabla 7.16 Viscosidad A 60/70 + 10% GRC + 1% NA

Muestra	Viscosidad (mPa-s)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	Temperatura (°C)
1	21500	20	43.1	60.4
2	22300	20	44.3	60.7
3	21600	20	43.6	60.4

Fuente: Autor

Tabla 7.17 Viscosidad A 60/70 + 10% GRC + 2% NA

Muestra	Viscosidad (mPa-s)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	Temperatura (°C)
1	25775	20	51.8	60.9
2	26822	20	52.4	61.2
3	26624	20	52.3	61.1

Fuente: Autor

Tabla 7.18 Viscosidad A 60/70 + 10% GRC + 3% NA

Muestra	Viscosidad (mPa-s)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	Temperatura (°C)
1	33150	20	66.5	71.2
2	35230	20	66.8	71.4
3	36340	20	67.2	71.8

Fuente: Autor

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los asfaltos en general deben ser caracterizados para así conocer su eventual desempeño, por eso las normativas como el INVIAS y AASHTO establecen los parámetros para evaluar las características físicas de cada uno de ellos y así poder ser aplicado como mezcla en una estructura de pavimento flexible, basados en la normativa INVIAS y en el artículo 413; quien dicta las especificaciones para el suministro de cemento asfáltico con grano de caucho reciclado (GCR) como están indicadas en la Tabla 8.1. Y así poder realizar las comparaciones de los resultados del ligante de asfáltico 60/70 base y los asfaltos modificados.

Tabla 8.1 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, ART. 413 Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado, 2013)

8.1 ENSAYO DE PENETRACIÓN

En este ensayo se realizaron las elaboraciones de tres muestras para cada uno de los porcentajes de modificación (10% GCR con 1%, 2% y 3% de nanoarcilla) para los cuales se obtuvieron los siguientes valores promedios:

Tabla 8.2 Resultado ensayo de penetración

Asfalto 60/70	Asfalto 60/70 + 10 GCR	A 60/70 + 10 GCR 1% NA	A 60/70 + 10 GCR 2% NA	A 60/70 + 10 GCR 3% NA
60.00	28.30	35.50	33.30	26,40
67.00	28.50	33.40	29.40	27,70
70.00	29.90	35.30	30.50	29,30

Fuente: Autor

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 8.2, se evidencia que el asfalto modificado con 10% de GCR y 3% de nanoarcilla es un material con características de mayor rigidez, ya que sus valores de penetración se encuentran en un rango de 26.43 mm a 29.27 mm, muy diferente a los asfaltos con 1% y 2% de nanoarcilla que obtuvieron penetraciones mayores, en comparación con a un asfalto 60/70 con 10% GCR, que se encuentran entre 28.30 mm y 29.90 mm como se indica en la Tabla 8.2, en el ensayo se puede observar que el asfalto convencional 60/70, tiene penetraciones iguales a 60 décimas de mm en comparación a los asfaltos modificados que se tornaron duros a mayor concentración de los modificadores. De antemano esto da a entender que lo modificadores generan un mayor endurecimiento en la mezcla cuando se procede aumentar el contenido de los mismos.

Con estos resultados se puede observar, que los asfaltos 60/70 convencional, demuestran que tienen una baja tendencia al fisuramiento, lo que garantiza una alta durabilidad y adherencia. Pero la probabilidad de que sufran de ahuellamientos es mucho más alta.

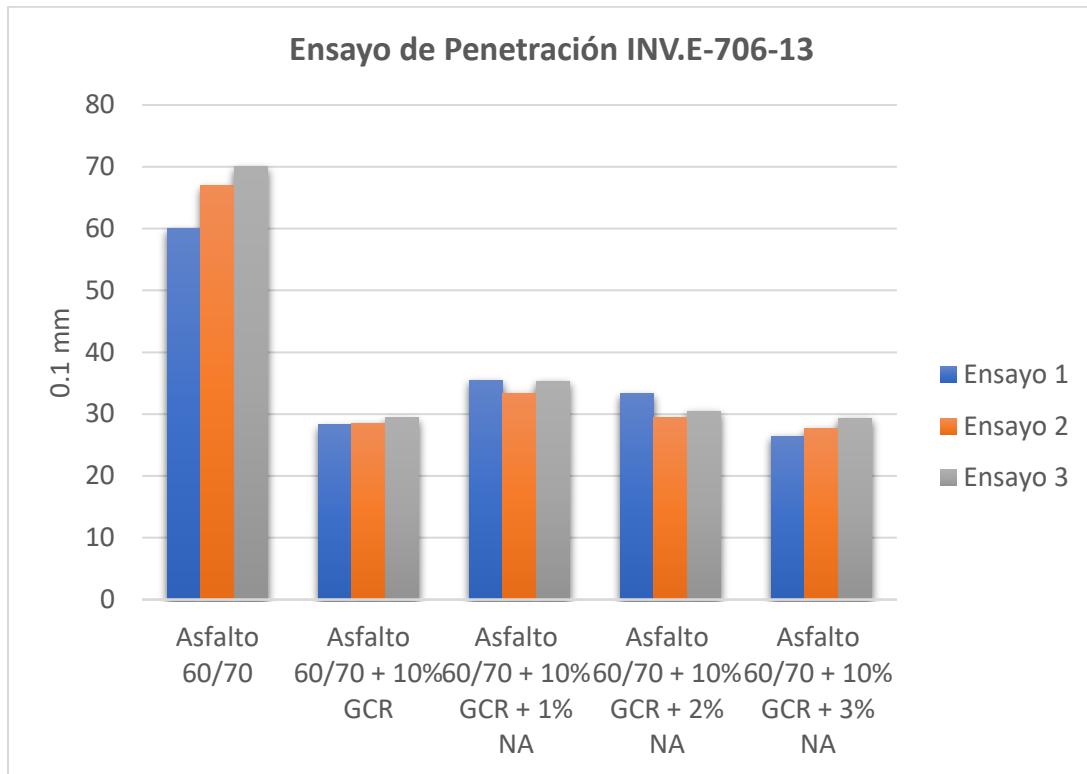


Figura 8.1 Resultados promedio ensayo penetración

Fuente: Autor

Según la Figura 8.1, se puede observar que los ensayos de penetración para las muestra de asfalto modificado con 10% GCR + 3% NA, tienen una mayor consistencia y son más rígidas que los asfaltos convencionales y que los asfalto con adición de 10% de GCR, mientras que a medida se fue bajando los porcentajes de adición de nanoarcilla (1% y 2%) la penetración en dichas muestra fue aumentando pero manteniéndose en medidas más bajas que los asfaltos convencionales, pero no tan favorable como el asfalto con 10% de GCR.

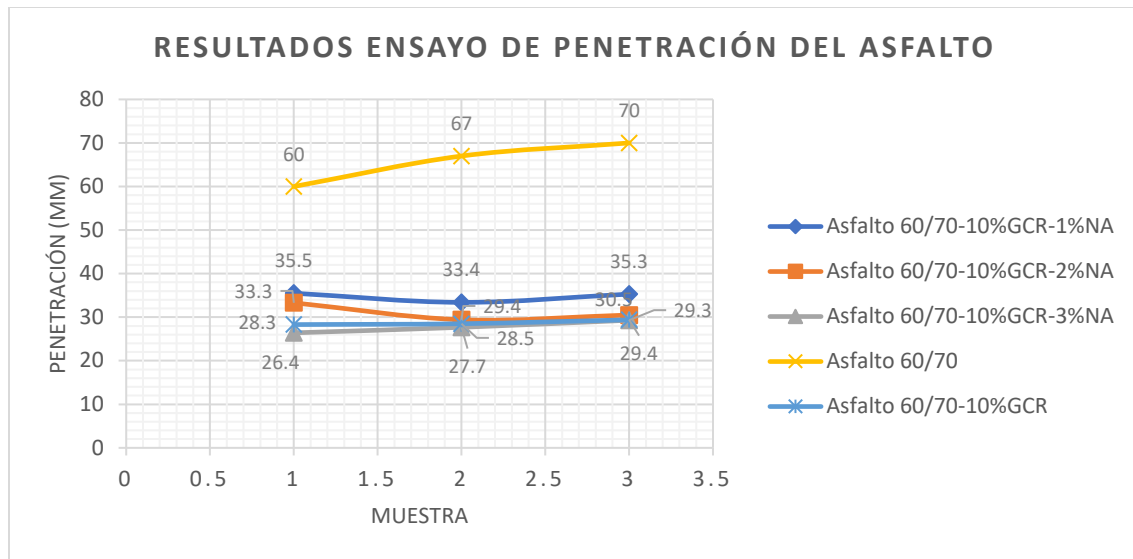


Figura 8.2 Resultados ensayo penetración

Fuente: Autor

Es importante y para tener en cuenta, que cuando se presentan una penetración mínima esto ocasiona que se dé una rigidez excesiva en comparación al asfalto convencional, lo cual produce fracturas en el pavimento y va disminuyendo su vida útil. Su alta rigidez también puede producir descaramiento, bache y piel de cocodrilo, por lo que se recomienda no usar porcentajes mayores al 3% de nanoarcilla; de acuerdo a la Figura 8.2 se observa que, en relación del asfalto 60/70 + 10% GCR + 3% NA con el asfalto 60/70 está un 46.32% por debajo de la penetración de 60mm y en comparación al asfalto 60/70 + 10% GCR presenta una diferencia promedio ± 0.94 mm.

8.2 ENSAYO DE DENSIDAD Y DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECIFICA)

En este ensayo se presenta los siguientes resultados que nos muestran la Tabla 8.3, donde se evidencia que las muestras con 10% GCR + 3% NA presenta un valor promedio de la gravedad específica de 1.04. Lo que nos indica que la participación de la nanoarcilla en la modificación

eleva el valor de la gravedad específica, mientras que los asfalto 60/70 mantiene una gravedad específica promedio de 1.02 y el asfalto con 10% GCR mantuvo un valor promedio de 1.03.

Tabla 8.3 Resultado ensayo de gravedad específica

Muestra	Asfalto 60/70	Asfalto 60/70 + 10% GCR	Asfalto 60/70 + 10% GCR 1% NA	Asfalto 60/70 + 10% GCR 2% NA	Asfalto 60/70 + 10% GCR 3% NA
1	1.020	1.032	1.018	1.026	1.042
2	1.020	1.031	1.024	1.014	1.028
3	1.020	1.033	1.027	1.017	1.039

Fuente: Autor

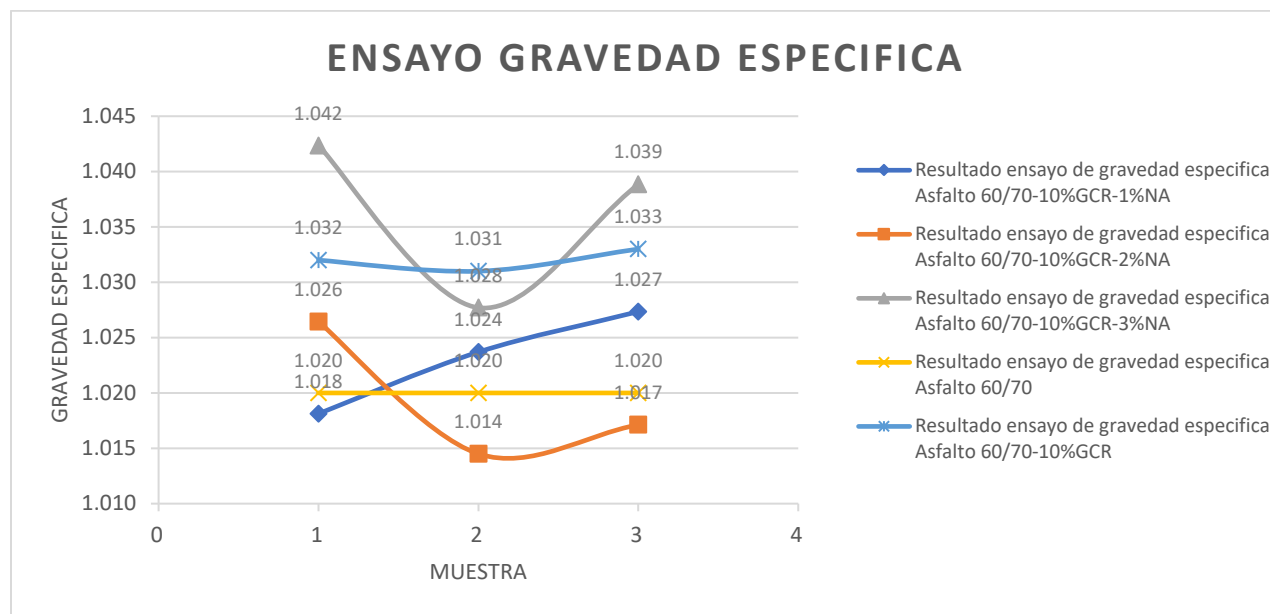


Figura 8.3 Ensayo de gravedad específica

Fuente: Autor

La tendencia que tuvo cada uno de los asfaltos con sus diferentes modificaciones se analiza en la Figura 8.3, donde se puede denotar, que el asfalto 60/70 + 10% GCR + 2% NA presentan dos puntos por debajo al asfalto convencional, sucediendo algo parecido con el asfalto 60/70 + 10% GCR + 1% NA que presento un por debajo. Los datos sustraídos del ensayo de gravedad especifican podrán ser utilizados para conversiones de unidades de volumen a masa y para realizar correcciones en las medidas de volumen.

En la Figura 8.2, se observa los valores promedios obtenidos en cada una de las muestras y donde se hace más notable el aumento del peso específico del asfalto modificado con 10% GCR y 3% NA, pero a medida que se disminuyó el porcentaje de nanoarcilla también disminuye su valor de peso específico manteniéndose igual a los valores arrojados para el asfalto 60/70, dando indicar el aporte que hace la nanoarcilla.

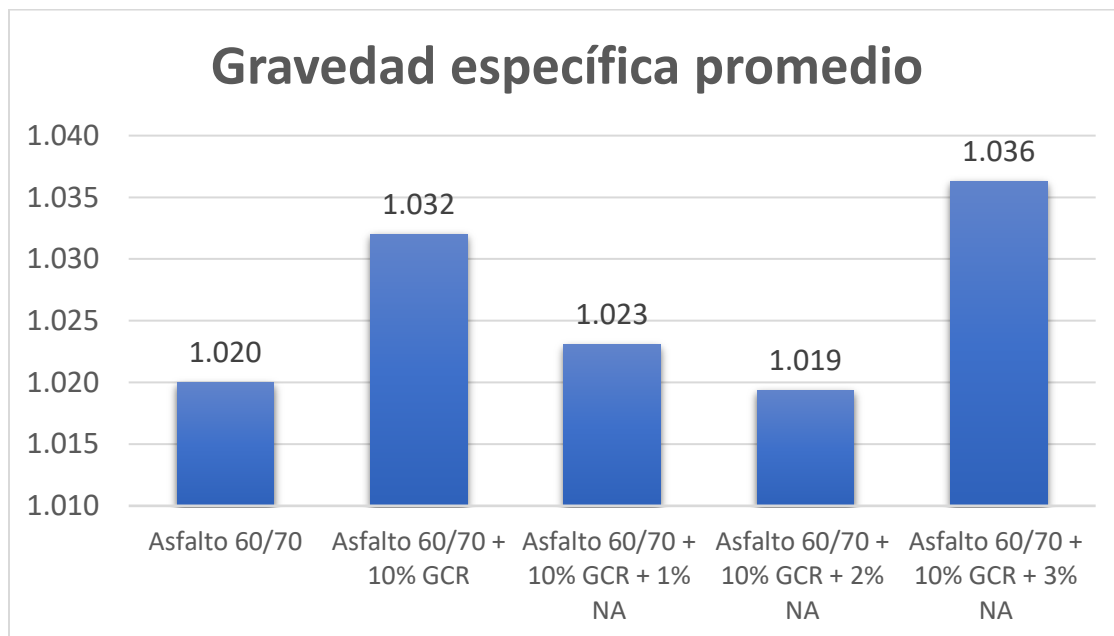


Figura 8.4 Gravedad específica promedio

Fuente: Autor

8.3 ENSAYO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN

Los resultados determinados del ensayo de inflamación y combustión corregidos se pueden observar en las Tabla 8.4 y Tabla 8.5. El que primero llegó a su punto de inflamación es el asfalto con 10% GCR + 3 % NA con una temperatura de 241 °C, lo que indica que reacciona más rápidamente al calor que las muestras modificadas. La muestra de 10% GCR + 2% de nanoarcilla llegó a una temperatura de 261 °C, mientras que la muestra de 10% GCR + 1% llegó a una temperatura de 266 °C; así mismo, en el caso del punto de combustión, la muestra con menor porcentaje de nanoarcilla (Asfalto 60/70 + 10% GCR + 1% NA) llegó a su punto de ignición a una menor temperatura, como se muestra en la Tabla 8.5.

Tabla 8.4 Resultado ensayo punto de inflamación

Modificación	Valor observado		C1	C2	C3
	°C	°F	°C	°F	°C
Asfalto 60/70 +10%GCR+1%NA	265.00	515.00	266.36	517.46	266.35
Asfalto 60/70 +10%GCR+2%NA	260.00	500.00	261.36	502.46	261.35
Asfalto 60/70 +10%GCR+3%NA	240.00	464.00	241.36	466.46	241.35

Fuente: Autor

Tabla 8.5 Resultado ensayo punto de combustión

Modificación	Valor observado		C1	C2	C3
	°C	°F	°C	°F	°C

Asfalto 60/70					
+10%GCR+1%NA	290.00	555.00	291.36	557.46	291.35
Asfalto 60/70					
+10%GCR+2%NA	300.00	572.00	301.86	574.46	301.35
Asfalto 60/70					
+10%GCR+3%NA	350.00	716.00	351.86	718.46	351.35

Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos, se puede analizar que un asfalto modificado con GCR y adición de nanoarcilla presenta menor resistencia al punto de inflamación, ya que, en comparación con un asfalto de 60/70 sin ninguna modificación la temperatura que presenta en el punto de inflamación es de 269 °C como se observa en la Tabla 7.3. También una de las causantes que se presente a bajas temperatura su punto de inflamación puede ser el GCR que está en cada una de las modificaciones.

Analizando los puntos de combustión corregido de cada uno de los asfaltos modificados se puede observar que: el asfalto con 10% GCR + 1% NA tiene una temperatura de 291 °C, el de 10% GCR + 2% NA obtuvo una temperatura 301°C y el 10% GCR + 3% NA manifestó una temperatura 351 °C, dando a entender que son más sólidos y viscosos, cabe aclarar que no se hace la comparación el asfalto 60/70, ya que en la empresa que brinda el producto no determinan dicho valor.

En la Figura 8.5 se evidencia que, con las mezclas modificadas se pueden obtener valores mayores del punto de inflamación de las mezclas asfálticas, y de la misma manera este valor cumple con el valor mínimo de 230 °C para el punto de ignición del asfalto de acuerdo a la norma 410 de 2013 del INVIAS.

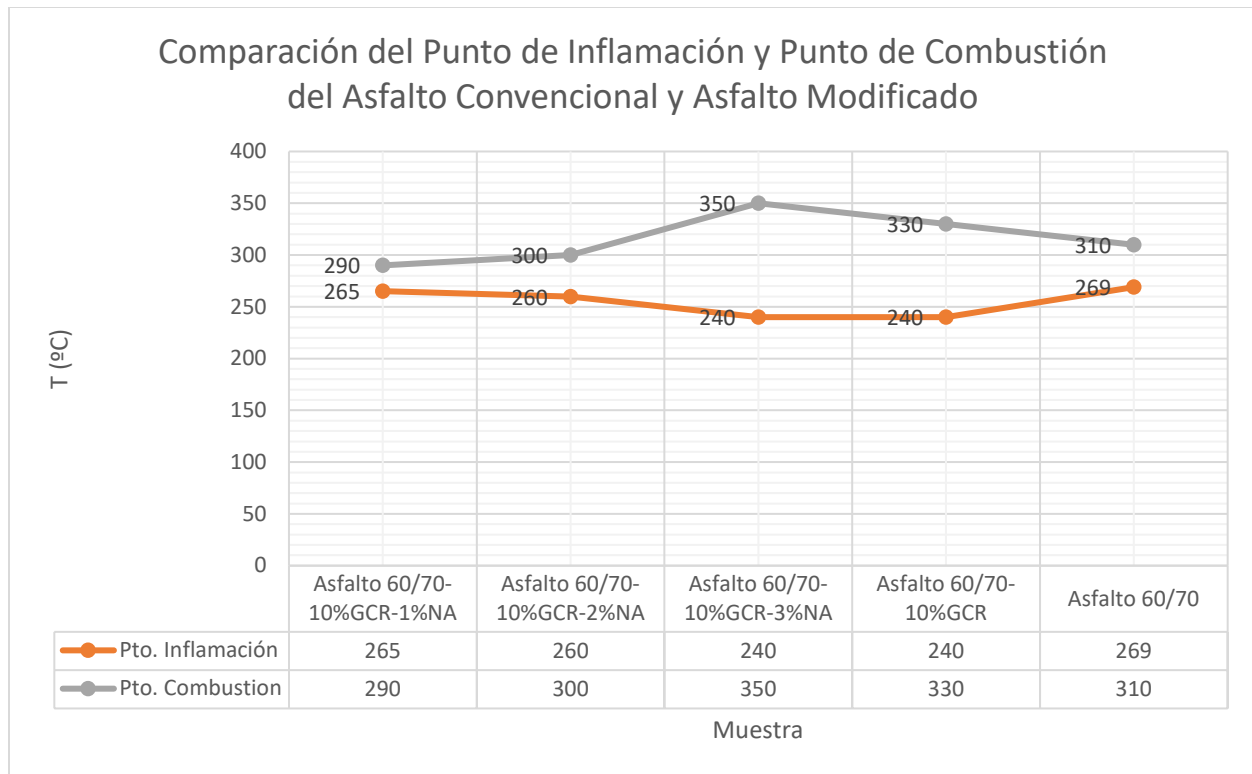


Figura 8.5 Comparación del punto de inflamación y punto de combustión

Fuente: Autor

Es importante anotar, que el ensayo de punto de inflamación y combustión es una prueba de seguridad, para así poder evitar que se presente algún incendio en la planta o emisión de gases que sin tener las adecuadas precauciones podrían causar accidentes. También se debe tener en cuenta que las mezclas asfálticas requieran de mayor temperatura, ya que esto también puede estar sucediendo por falta de asfáltenos en el asfalto o que se haya presentado una pérdida de solventes cuando se realizan las modificaciones.

8.4 ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Se determinan los siguientes valores que se muestran en la Tabla 8.6, donde se puede notar que el asfalto con 10% de GCR + 3% presenta fluidez a una temperatura promedio de 59.32 °C,

mientras los asfaltos de 10% GCR + 2% NA se desarrolla a una temperatura de 54.85 °C y el de 10% GCR + 15 NA a una temperatura de 53.60 °C, lo que indica que la presencia de nanoarcilla mantiene más adheridos las partículas dándole una mayor resistencia a la temperatura de fluidez. Lo que puede referirse a una mayor resistencia a las deformaciones del asfalto (Bastidas Martínez & Rondón Quintana, 2020).

Tabla 8.6 Resultado ensayo punto de ablandamiento

Modificación	Bola derecha	Bola izquierda	Promedio
	°C	°C	°C
Asfalto 60/70	53.50	53.70	53.60
+10%GCR+1%NA			
Asfalto 60/70	55.70	54.00	54.85
+10%GCR+2%NA			
Asfalto 60/70	57.50	61.20	59.35
+10%GCR+3%NA			

Fuente: Autor

Haciendo una evaluación de los puntos ablandamiento obtenidos en comparación asfalto base 60/70 el cual tiene un punto de ablandamiento a una temperatura de 48.1 °C según la Tabla 7.3 y el asfalto con 10% GCR que tiene una temperatura de 54.2 °C. Como se puede analizar que a medida que se aumente la adición nanoarcilla (ver Figura 8.3), hace que el asfalto tenga mayor rigidez y viscosidad, para que pueda soportar temperaturas elevadas.

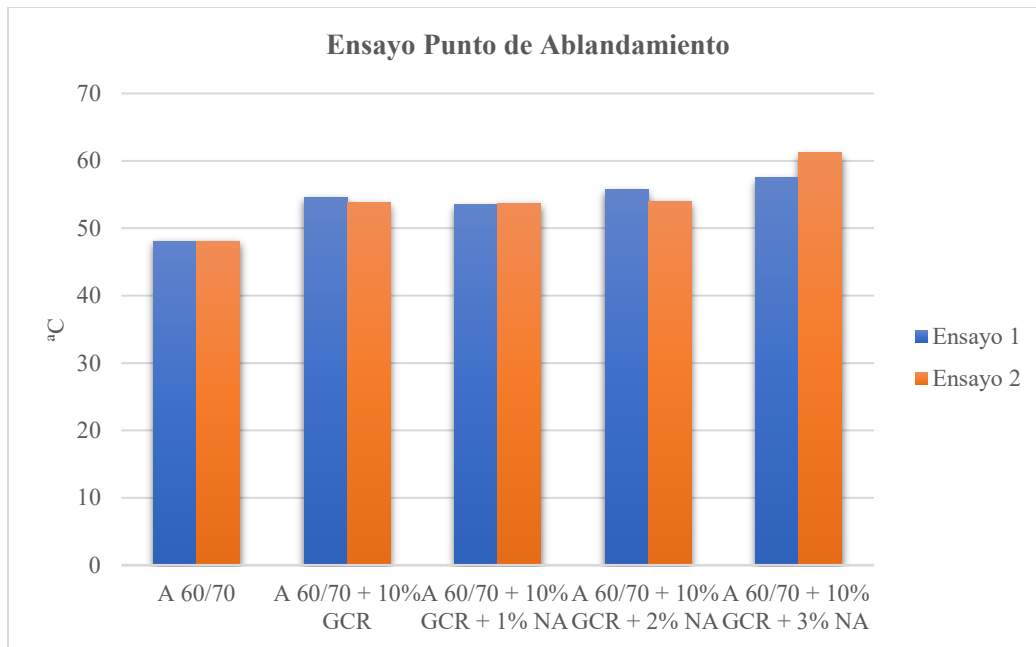


Figura 8.6 Punto de ablandamiento

Fuente: Autor

Se puede observar que todas las muestras modificadas presentan un punto de ablandamiento mayor al asfalto convencional (ver Figura 8.7), donde la muestra que tiene una mayor lectura es la del asfalto 60/70 + 10% GCR + 3% NA con una diferencia de 9.4 °C por encima del convencional. De la Figura 8.7 se puede analizar, que a medida que aumenta el porcentaje de nanoarcilla se incrementó la temperatura en el asfalto modificado, otorgando mezclas más resistentes a la deformación permanente.

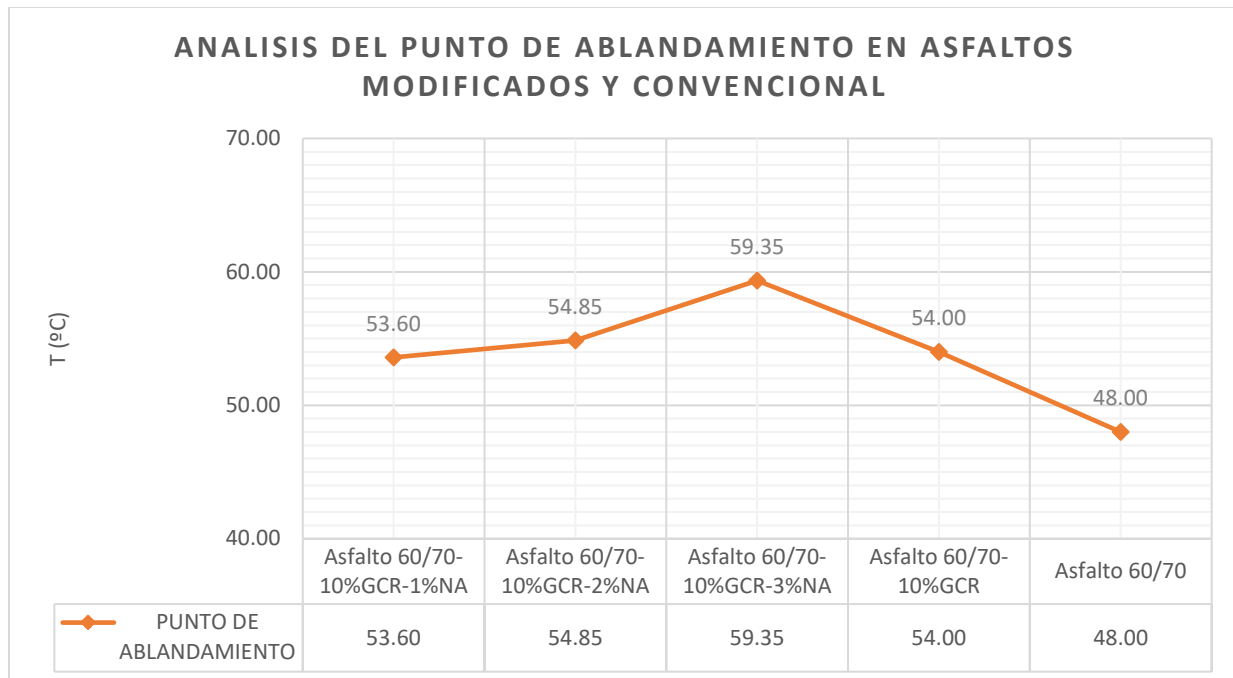


Figura 8.7 Análisis del punto de ablandamiento

Fuente: Autor

8.5 ENSAYO DE VISCOSIDAD

El asfalto a temperaturas elevadas se comporta como un material viscoso-elástico; es decir que tiene un comportamiento medio entre un sólido de Hooke (elástico) y un líquido de Newton (viscoso), pero a temperaturas mayores de 100 °C el asfalto tiene una consistencia más fluida. Y mientras tanto, en temperaturas menores a los 0 °C se comporta como una banda de goma.

En el ensayo de viscosidad rotacional de los diferentes asfaltos modificados, se obtuvieron los siguientes resultados que muestran la Tabla 8.7. Donde en comparación al asfalto convencional (asfalto 60/70) que alcanza la viscosidad una temperatura de 55.27 °C según la Tabla 7.3, los asfaltos con modificación de GCR + NA necesitan de temperaturas más altas para poder comenzar a fluir.

Tabla 8.7 Resultado ensayo de viscosidad

Muestra	Asfalto 60/70 + 10%		Asfalto 60/70 + 10%		Asfalto 60/70 + 10%	
	GRC + 1% NA		GRC + 2% NA		GRC + 3% NA	
	Viscosidad	Temperatura	Viscosidad	Temperatura	Viscosidad	Temperatura
	(mPa-s)	(°C)	(mPa-s)	(°C)	(mPa-s)	(°C)
1	21500	60.4	25775	60.9	33150	71.2
2	22300	60.7	26822	61.2	35230	71.4
3	21600	60.4	26624	61.1	36340	71.8

Fuente: Autor

En la normativa colombiana para el estudio de asfalto, la viscosidad rotacional no presenta parámetros que establezcan un comportamiento adecuado de los ligantes.

Pero se puede observar que la viscosidad en las diferentes modificaciones presente un aumento considerable a medida que se le adiciona más nanoarcilla, indicando que presenta una resistencia mayor a la fluidez ocasionando que las temperaturas sean mayores. En la Figura 8.8 se puede observar que la muestra de Asfalto 60/70 + 10% GRC + 3% NA necesito de una temperatura de 71.4 °C para alcanzar la fluidez mientras los asfaltos con modificaciones menores de nanoarcilla estuvieron cerca las temperaturas que necesita los asfaltos que solo tienen adición de 10% GCR, pero sin bajar a la temperatura de la muestra base (asfalto 60/70).

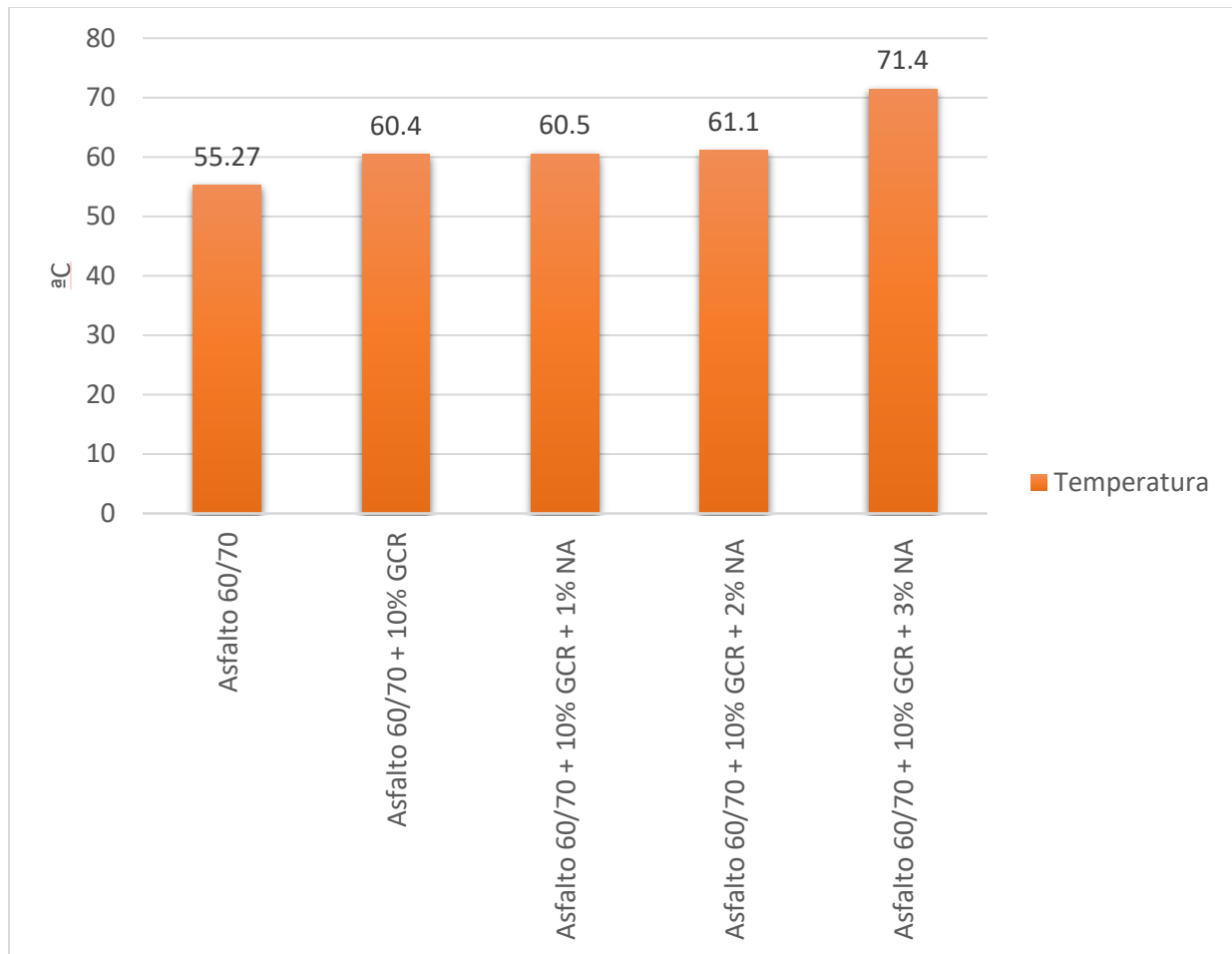


Figura 8.8 Temperatura ensayo de viscosidad

Fuente: Autor

El comportamiento físico del GCR hace que sea más flexible la mezcla a bajas temperaturas y menos plástica a altas temperaturas, produciendo notoriamente que el asfalto aumente su rigidez y viscosidad ante un ligante convencional. La presencia de nanoarcilla demuestra un incremento en los parámetros de viscosidad muy notorio, lo que puede dar a entender que la nanoarcilla tiene un comportamiento plástico debido que las partículas con el GCR facilitan la cohesión y evitan el desplazamiento entre ellas al ejercerse un esfuerzo.

Es de aclarar que los asfaltos modificados con viscosidades mayores al asfalto convencional, tendrá más dificultad a la hora de realizar el bombeo de dicha mezcla y así mismo el recubrimiento entre los agregados, ya que su manejabilidad impediría realizarlo de manera adecuada, ocasionando que se presente mayores vacíos en el pavimento y provocando un endurecimiento prematuro, lo que generaría un agrietamiento o desintegración de las partículas y esto se notaría al final reflejado en la durabilidad del pavimento.

9 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1 CONCLUSIONES

La incorporación de nanoarcilla en un asfalto con GCR demostró efectos favorables en las propiedades físicas, demostrando una mayor resistencia a altas temperaturas y debido a las partículas nanométricas una mejor homogenización de los materiales, teniendo en cuenta que si se utilizan adiciones mayores al 3% en el asfalto presentara una mayor rigidez, ocasionando que se puedan presentar fallos por fractura y fatiga.

En los ensayos de penetración se puede destacar el aumento de la consistencia y rigidez del asfalto modificado con GCR y nanoarcilla, respecto a la mezcla base y el asfalto modificado solo con GCR, presentando este un 53.9% de disminución a la penetración frente al asfalto base y un 3.69% en comparación al asfalto modificado con 10% GCR. Esta notoria mejoría a la propiedad puede traer mayores beneficios a la modificación de asfalto con GCR, ya que aumenta su vida útil y menor posibilidad al fisuramiento de la carpeta asfáltica.

Respecto al punto de ablandamiento se encontró que la adición de nanoarcilla a este asfalto modificado favorece la resistencia altas temperaturas, En otras palabras, muestra las ventajas de la mezcla para que se comporte como un sólido a temperaturas más altas. En efecto, el asfalto con 10% GCR + 3% NA evidenció su estado fluidez a una temperatura de 59.35 °C, un 18.96% encima del asfalto base y un 8.71% superior a un asfalto modificado con GCR, lo que indica que este menos susceptible a problemas de ahuellamiento.

La viscosidad demuestra que la cohesión entre la nanoarcilla y el GCR mejora notablemente, ya que el desplazamiento entre ellas disminuye aumentando su viscosidad y obteniendo una mejor

compatibilidad de la mezcla, esto garantiza que el asfalto modificado con GCR y nanoarcilla pueda tener un comportamiento adecuado en la colocación y compactación.

La presencia de nanoarcilla en asfaltos con GCR, manifiesta una notable mejoría en su composición. Se puede decir que estas modificaciones dan una unión adecuada a cada una de las partículas de la mezcla aumentando su resistencia en altas temperaturas de servicio y siendo más rígida lo que vuelve más competente esta estructura de pavimento para su puesta en marcha.

Por otro lado, debido al uso de dos modificadores, el aumento de rigidez y consistencia del material, teniendo un gran punto a favor, es su fluidez, lo que ayudará a enfrentar mejor los posibles defectos en la estructura del pavimento y asegurando su durabilidad.

Con los estudios realizados en cada uno de los ensayos se pudo concluir, que la modificación que presenta mayores ventajas es, el asfalto 60/70 con adición de 10% de GCR + 3%, puesto que tiene la capacidad de resistir altas temperaturas, ya que teniendo un comportamiento plástico puede sufrir una mayor deformación elástica antes de fallar. También aumenta la resina aglutinante, mejora la adhesión y cohesión entre las partículas y proporciona una mayor flexibilidad para la estructura molecular de la mezcla asfáltica.

Uno de los inconvenientes de la investigación, fue no contar con los equipos disponibles para estudiar diferentes comportamientos del asfalto al ser sometidos a estas modificaciones.

Por otra parte, la investigación demostró que con un asfalto modificado con 10% GCR + 3% NA comienza a presentar mayor resistencia a las deformaciones permanentes, pero si supera el 3% de nanoarcilla algunas de las propiedades serán desfavorables.

9.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda para futuros trabajos la adecuada manipulación de los materiales modificadores, ya que al entrar en contacto con la humedad pueden dañar la modificación del ligante y su composición, adicional el GCR debe tener en cuenta las especificaciones mencionadas en el Artículo 413 de INVIAS ya que este indica el adecuado empleo para este agente modificador.
- Debido a la manipulación de este asfalto modificado y su comportamiento visco-elástico se mantenga un porcentaje menor del 15% GCR, ya que se hace muy difícil su manipulación para la realización de cada uno de los ensayos.
- En futuras investigaciones, se recomienda continuar desarrollando con un ligante asfáltico 60/70 modificado con 10% GCR y 3% nanoarcilla, ya que este presenta unas propiedades físicas muy favorables.
- En asfalto convencionales es muy apropiado realizar el ensayo de viscosidad rotacional, ya que maneja temperaturas muy bajas en comparación asfalto modificados, para los cuales se requerirá una alta temperatura tanto para su producción como compactación. Por lo que se recomienda estudiar el método de Viscosidad de Corte Cero (ZSV, por sus siglas en inglés). Una metodología apropiada para determinar las temperaturas de mezclado y compactación en asfaltos modificados y mas si presentan altos valores de viscosidad (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

BIBLIOGRAFÍA

- Arribas, C. (2015). *Los neumáticos fuera de uso*. El Ecologista.
- ASOPAC. (2004). *Cartilla del pavimento asfáltico*. Colombia: Panamericana.
- 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 .
- de Melo, J., & Trichês, G. (2017). Evaluation of properties and fatigue life estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay. *Construction and Building Materials*, 364-373.
- 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 sostenible en Bogotá*. Bogotá: Universidad Santo Tomás .
- Ezzat, H., El-Badawy, S., Gabr, A., Zaki, E.-S. I., & Breakah, T. (2016). Evaluation of Asphalt Binders Modified with Nanoclay and Nanosilica. *Procedia Engineering*, 1260-1267.
- Fakhri, M., & Rahimzadeh Mottahed, A. (2021). Improving moisture and fracture resistance of warm mix asphalt containing RAP and nanoclay additive. *Construction and Building Materials*, 121900.

- Garnica Anguas, P., & Gómez López, J. A. (2001). *Deformaciones permanentes en materiales granulares para la seccion estructural de carreteras*. Sanfadila: Instituto mexicano del transporte.
- Giannelis, E., Krishnamoorti, R., & Manias, E. (1999). Polymer-Silicate Nanocomposites: Model Systems for Confined Polymers and Polymer Brushes. En *Polymers in Confined Environments* (págs. 107-147).
- Grupo Editorial Editec SPA. (2019). La importancia del análisis reológico. *Minería Chilena*.
- Guile, D. B. (2006). *Effects of nanoclay modification on the rheological properties of bituminous*. Delft: Msc Thesis.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). 706 - Penetración de los materiales bituminosos. En *Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*. Colombia. Recuperado el 12 de 04 de 2019
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). 709 - Punto de Inflamación y combustión mediante la copa abierta cleveland. En *Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*.
- Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2013). 706 - Penetración de 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 Picnometro). En *Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*.
- Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2013). 707 - Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del 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). 717 - Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional. En *Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*.
- 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).
- Jahromi, S. G., & Rajaei, S. (2013). Nanoclay-modified asphalt mixtures for eco-efficient construction. En *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction* (págs. 108-126). Woodhead Publishing.
- 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 normatica mexicana mediante ensayo de pista*. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech.
- Perales Caldas , E. R. (2017). *Pavimentos* . Lima : Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Perugachi, R., & Paredes, C. (2006). Las Nanoarcillas y sus potenciales aplicaciones en el Ecuador. *Revista Tecnológica ESPOL*, 121-124.
- QuercusLab. (24 de Junio de 2015). *QuercusLab*. Obtenido de <https://quercuslab.es/blog/metodo-del-picnometro-para-determinar-densidades/>
- Ramírez Villamizar, A., Ladino Rubio, I. L., & Rosas Ramírez, J. P. (2014). *Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho reecnología GAP GRADED para la ciudad de Bogotá*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA , Bogotá D.C.
- Reyes Lizcano, F. (2003). *Diseño racional de pavimentos*. Santa Fe de Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería.
- 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: Alcaldia 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.
- Yao, H., & You, Z. (2016). Nanoclay modified asphalt. En K. J. Loh, & Nagarajaiah, *Innovative Developments of Advanced Multifunctional Nanocomposites in Civil and Structural Engineering* (págs. 183-216). Elsevier Ltd.
- You, Z., Mills-Beale, J., M. Foley, J., Roy, S., M. Odegard, G., Dai, Q., & Wei Goh, S. (2010). Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization. *Construction & Building Materials*, 1072-1078.
- Yu, J., Xua, Z., Wu, S., & Liu, G. (2007). Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts. *447*, 233-238.
- Zapién Castillo, S. (2015). *Obtención de mezclas de asfalto modificado con sebs y nanoarcilla*. Ciudad Madero, México: Tecnólogo Nacional de México.
- Zhang, J., Junlong , W., Yiqian, W., Youpeng, W., & Yunpun, W. (2008). Preparation and properties of organic palygorskite SBR/organic palygorskite compound and asphalt modified with the compound. *Construction and Building Materials*, 1820-1830.

ANEXO

ANEXO A. FICHA TECNICA ASFALTO CONVENCIONAL 60/70 - PLANTA PASOLIN

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	55.2	Reportar	
Índice de penetración	I.N.V. E-724	-1.0		-1 hasta +1	

ANEXO B. ENSAYOS DE PENETRACIÓN

Muestra	Molde	Ensayos			Promedio
		1	2	3	
A60/70+10%GCR+ 1% NA	Molde 1	36.2	34.5	35.6	35.5
A60/70+10%GCR+ 1% NA	Molde 2	31.2	33.2	35.8	33.4
A60/70+10%GCR+ 1% NA	Molde 3	34.5	35.6	35.6	35.3

Muestra	Molde	Ensayos			Promedio
		1	2	3	
A60/70+10%GCR+ 2% NA	Molde 1	34.4	32.4	33.0	33.20
A60/70+10%GCR+ 2% NA	Molde 2	29.0	30.8	28.4	29.40
A60/70+10%GCR+ 2% NA	Molde 3	30.4	29.8	31.3	30.50

Muestra	Molde	Ensayos			Promedio
		1	2	3	
A60/70+10%GCR+ 3% NA	Molde 1	23.7	28.2	27.4	26.40
A60/70+10%GCR+ 3% NA	Molde 2	26.8	27.4	28.8	27.70
A60/70+10%GCR+ 3% NA	Molde 3	28.8	29.8	29.2	29.30

Muestra	Molde	Ensayos			Promedio
		1	2	3	
A60/70+10%GCR	Molde 1	28.3	28.4	28.3	28.30
A60/70+10%GCR	Molde 2	28.2	28.5	28.8	28.50
A60/70+10%GCR	Molde 3	28.8	29.8	29.6	29.40

ANEXO C. ENSAYOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

Muestra	Molde	Peso picnómetro (g)				Gravedad Específica
		A	B	C	D	
A60/70+10%GCR+ 1% NA	1	37.89	63.3	50.25	63.52	1.018
A60/70+10%GCR+ 1% NA	2	36.33	62.8	51.45	63.15	1.024
A60/70+10%GCR+ 1% NA	3	39.11	63.5	50.38	63.8	1.027

Muestra	Molde	Peso picnómetro (g)				Gravedad Específica
		A	B	C	D	
A60/70+10%GCR+ 2% NA	1	37.89	63.30	52.25	63.67	1.026
A60/70+10%GCR+ 2% NA	2	36.33	62.80	57.32	63.1	1.014

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN ASFALTO 60/70 MODIFICADO CON GCR Y NANOARCILLA

A60/70+10%GCR+ 2% NA	3	39.11	63.50	56.93	63.8	1.017
Muestra	Molde	Peso picnómetro (g)				Gravedad
						d
		A	B	C	D	Específico
A60/70+10%GCR+ 3% NA	1	37.89	63.3	57.58	64.1	1.042
A60/70+10%GCR+ 3% NA	2	36.33	62.8	58.59	63.4	1.028
A60/70+10%GCR+ 3% NA	3	39.11	63.5	57.83	64.2	1.039

ANEXO D. ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN

Muestra	Valor observado	
	°C	°F
A60/70+10%GCR+1%NA	265.00	515.00
A60/70+10%GCR+2%NA	260.00	500.00
A60/70+10%GCR+3%NA	240.00	464.00
A60/70+10%GCR	240.00	446.00

Muestra	Valor observado	
	°C	°F
A60/70+10%GCR+1%NA	290.00	555.00
A60/70+10%GCR+2%NA	300.00	572.00
A60/70+10%GCR+3%NA	350.00	716.00
A60/70+10%GCR	330.00	626.00

ANEXO E. ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Muestra	Bola derecha	Bola izquierda	Punto de ablandamiento promedio
	°C	°C	°C
A60/70+10%GCR+1%NA	53.50	53.70	53.60
A60/70+10%GCR+2%NA	55.70	54.00	54.85
A60/70+10%GCR+3%NA	57.50	61.20	59.35
A60/70+10%GCR	54.60	53.80	54.20

ANEXO F. ENSAYO DE VISCOSIDAD EMPLEANDO EL VISCOSÍMETRO ROTACIONAL

Muestra	Molde	Viscosidad	Velocidad	Torque	Temperatura
		(mPa-s)	(RPM)	(%)	(°C)
A-GCR10%- NA1%	1	21500	20	43.1	60.4
A-GCR10%- NA1%	2	22300	20	44.3	60.7
A-GCR10%- NA1%	3	21600	20	43.6	60.4
A-GCR10%- NA2%	1	25775	20	51.8	60.9

A-GCR10%- NA2%	2	26822	20	52.4	61.2
A-GCR10%- NA2%	3	26624	20	52.3	61.1
Muestra	Molde	Viscosidad (mPa-s)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	Temperatura (°C)
A-GCR10%- NA3%	1	33150	20	66.5	71.2
A-GCR10%- NA3%	2	35230	20	66.8	71.4
A-GCR10%- NA3%	3	36340	20	67.2	71.8