



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 26-10-2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad NEIVA

El (Los) suscrito(s): Hugo Leonardo Aristizabal Martelo, con c.c. 1.002.152.146 Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado **“Evaluación de la aplicabilidad de polímeros comunes a las mezclas asfálticas en el proceso de pavimentación de la ciudad de Neiva”** presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de maestría en ingeniería y gestión ambiental;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

HUGO LEONARDO ARISTIZABAL MARTELO

Firma: 

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Aristizabal Martelo	Hugo Leonardo

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Pallares Muñoz	Myriam Rocio

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Magister en Ingeniería y Gestión ambiental

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Maestría en ingeniería y gestión ambiental

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2021

NÚMERO DE PÁGINAS: 77

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías_x__ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general_x__ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
o Cuadros_x__

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: No



MATERIAL ANEXO: No

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria): Ninguno

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

Inglés

- | | |
|--|--|
| 1. Residuos poliméricos comunes | common polymeric wastes. |
| 2. Aprovechamiento de materiales poliméricos | polymeric materials utilization. |
| 3. Reciclaje de materiales poliméricos para la pavimentación | recycling of polymeric material for paving |

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La principal materia prima para la pavimentación en Colombia y el mundo es el asfalto y la tendencia mundial por la producción limpia para descontaminar el planeta de residuos tóxicos que afectan el medio ambiente, ha llevado a buscar maneras de aprovechar los materiales poliméricos como sustituto o complemento en la construcción de estas obras de infraestructura. Pese a estar reglamentado y aprobado el uso de los materiales poliméricos en la pavimentación por el Instituto nacional de vías, su empleo es muy mínimo en el país, por ello, en esta investigación se documentó y evaluó la importancia de la aplicación de polímeros comunes reciclados en las mezclas asfálticas, encontrando que la cantidad de este tipo de residuos es alto y su aprovechamiento es muy mínimo o casi nulo. De hecho, casi el 30% de los residuos que llegan al relleno sanitario de la ciudad de Neiva son reutilizables y cerca del 12% lo conforman el polipropileno y otros polímeros comunes. Se comprobó que cuando estos polímeros se incorporan en proporciones de 6% y 8% en mezclas asfálticas para pavimentación según la norma INV-13, estos polímeros reciclados garantizaron un comportamiento mecánico aceptable, por lo que su potencial de uso en la pavimentación es grande, máxime en la región surcolombiana donde actualmente se está construyendo la vía nacional de cuarta generación, y en la propia ciudad de Neiva, donde también se está construyendo el sistema interno de carretas para el Sistema Estratégico de Transporte Público.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The main raw material for paving the road network in Colombia and the world is asphalt, and the global trend towards clean production to decontaminate the planet of toxic waste that affects the different habitats and the environment in general, has led to the search for ways to take advantage of polymeric materials as a substitute or complement in the construction of these infrastructure works. Despite being regulated and approved the use of polymeric materials in paving by INVIAS, their use is very minimal, which is why, in this research, the importance of the application of common recycled polymers in asphalt mixtures was documented and evaluated, finding that the amount of this type of waste is high and its use is very minimal or almost null. In fact, almost 30% of the waste that arrives at the landfill of the city of Neiva is reusable and about 12% is made up of polypropylene and other common polymers. It was found that when these polymers are incorporated in proportions of 6% and 8% in asphalt mixtures for paving according to the INV-13 standard, these recycled polymers guarantee acceptable mechanical behavior, so their potential for use in paving is great, especially in the southern Colombian region where the fourth-generation national road is currently being built, connecting the municipalities of Huila with the center and south of the country, and in the city of Neiva itself, where the internal system of carts for the Strategic Public Transportation System is also being built.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: NESTOR ENRIQUE CERQUERA PEÑA

Firma:

Nombre Jurado: LUZ MARINA BOTERO ROJAS

Firma:

**Evaluación de la aplicabilidad de polímeros comunes reciclados a las mezclas asfálticas en
el proceso de pavimentación de la ciudad de Neiva**



Hugo Leonardo Aristizábal Martelo
Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana
Neiva- Huila, 2021

Evaluación de la aplicabilidad de polímeros comunes reciclados a las mezclas asfálticas en el proceso de pavimentación de la ciudad de Neiva.

Hugo Leonardo Aristizábal Martelo

Trabajo de investigación presentado como requisito para para optar al título de Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental

Directora trabajo de grado

Myriam Rocío Pallares Muñoz

Ingeniera Civil, Magíster, Candidata a Doctor en Ingeniería de la Construcción

Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana

Neiva - Huila, 2021

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos de la siguiente manera:

Para mí es un gran orgullo contar con la fortuna de poderle dar gracias a Dios públicamente, por ello inicio de esta manera dándole gracias al todopoderoso por permitirme hacer realidad este sueño. De igual forma y con casi el mismo grado de importancia a mi padre y mi madre Liliana Martelo Rodríguez y Hugo Eugenio Aristizábal Rivera, sin ellos nada de esto estaría pasando ni hubiera sido escrito, extender este mismo sentido de agradecimiento a cada uno de mis familiares, amigos y personas que han hecho parte de este proceso educativo y la elaboración de este documento.

Específicamente agradecerle a la directora del proyecto Doc. Myriam Rocío Pallares, quien en cada momento estuvo presente y dispuesta a guiar cada paso en la ejecución del cronograma y aportando sus conocimientos contribuyo en el trabajo realizado, a la universidad Surcolombiana por capacitarme a nivel de maestría y Corhuila por conferirme el título profesional, a su vez a cada una de las entidades que suministraron información y prestaron sus servicios en cada una de las etapas del proceso, a Ingeolab; y finalmente a los jurados quienes con sus aportes y sugerencias garantizaron la calidad del documento y con su tiempo y dedicación lo perfeccionaron.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Justificación	13
2. Planteamiento del problema	16
3. Objetivos	23
3.1. Objetivo general	23
3.2. Objetivos específicos	23
4. Marco Teórico	24
4.1. Asfalto	24
4.1.1. Asfáltenos	24
4.1.2. Máltenos	25
4.2. Pavimentos y mezclas asfálticas	25
4.2.1. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas	26
4.3. Modificación de mezclas asfálticas	27
4.3.1. Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros	28
4.3.2. Tipos de Polímeros Modificadores	31
4.4. Síntesis normativa colombiana	35
5. Metodología, procedimientos y muestra de resultados	37
5.1. Metodología desarrollada	37

6.	Resultados y análisis	39
6.1.	Procedimientos	39
6.1.1.	Diseño de las Mezclas Asfálticas en Caliente	39
6.1.2.	Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros (Grano de Caucho sin Cal)	44
6.1.3.	Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros (Grano de Caucho y Cal)	48
6.1.4.	Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros (Polipropileno)	50
6.2.	Datos numéricos de la Mezcla Asfáltica con GCR Sin Cal	53
6.2.1.	Resultados del ensayo de flujo y estabilidad para briquetas con GCR sin Cal	56
6.3.	Resultados para la Mezcla Asfáltica Con GCR con Cal	58
6.3.1.	Resultados del ensayo de flujo y estabilidad para briquetas con GCR y Cal.	60
6.4.	Resultados para la Mezcla Asfáltica con Polipropileno (PP)	62
6.4.1.	Resultados del ensayo de flujo y estabilidad para Mezcla Asfáltica con Polipropileno (PP)	65
7.	Conclusiones	69
8.	Referencias	71

Listado de Figuras

	Pág.
Figura 1. Tamices	41
Figura 2. Diseño de mezcla asfáltica	41
Figura 3. Briquetas	42
Figura 4. Ensayo de estabilidad y flujo	43
Figura 5. Proceso de compactación	48
Figura 6. Briquetas con PP	52
Figura 7. Ensayos de estabilidad y flujo	56
Figura 8. Briqueta No. 1, 2,3 con 2% (GCR) y 4% de asfalto	57
Figura 9. Briqueta No. 4, 5,6, con 3% (GCR) y 5% de asfalto	57
Figura 10. Ensayos de estabilidad y flujo	60
Figura 11. Briquetas No. 1, 2,3 con 2% (GCR) y 4% de asfalto.	61
Figura 12. Briquetas No. 4, 5,6 con 3% (GCR) y 5% de asfalto.	62
Figura 13. Ensayo de estabilidad y flujo	65
Figura 14. Briquetas No. 1, 2,3 con 2% de polipropileno y 4% de asfalto.	66
Figura 15. Briquetas No. 4, 5,6, con 2% de polipropileno y 4% de asfalto.	67

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Caracterización de residuos sólidos domiciliarios de la zona rural de la ciudad de Neiva.	20
Tabla 2. Caracterización de residuos solidos	21
Tabla 3. Granulometría para mezclas asfálticas con GCR	45
Tabla 4. Granulometría para la Mezcla asfáltica y PP	50
Tabla 5. Briqueta GCR sin cal.	54
Tabla 6. Gravedad específica Bulk.	54
Tabla 7. Densidad del espécimen	55
Tabla 8. Porcentaje de agua absorbida	55
Tabla 9. Estabilidad y flujo	56
Tabla 10. Briquetas GCR y Cal	58
Tabla 11. Gravedad específica Briquetas con GCR y Cal	59
Tabla 12. Densidad del espécimen Briquetas con GCR y cal	59
Tabla 13. Agua absorbida Briquetas con GCR y Cal	60
Tabla 14. Estabilidad y Flujo	61
Tabla 15. Briquetas con polipropileno	63
Tabla 16. Gravedad específica Briquetas con PP	63
Tabla 17. Densidad del espécimen briquetas con PP	64

Tabla 18. Porcentaje de agua absorbida	64
Tabla 19. Resultados Estabilidad Vs Flujo	65
Tabla 20. Estabilidad Flujo de las Briquetas	68

Resumen

La principal materia prima para la pavimentación de la red de carreteras en Colombia y el mundo es el asfalto y la tendencia mundial por la producción limpia para descontaminar el planeta de residuos tóxicos que afectan los diferentes hábitats y en general, el medio ambiente, ha llevado a buscar maneras de aprovechar los materiales poliméricos como sustituto o complemento en la construcción de estas obras de infraestructura. Pese a estar reglamentado y aprobado el uso de los materiales poliméricos en la pavimentación por el INVIAS, su empleo es muy mínimo en el país, razón por la cual, en esta investigación se documentó y evaluó la importancia de la aplicación de polímeros comunes reciclados en las mezclas asfálticas, encontrando que la cantidad de este tipo de residuos es alto y su aprovechamiento es muy mínimo o casi nulo. De hecho, casi el 30% de los residuos que llegan al relleno sanitario de la ciudad de Neiva son reutilizables y cerca del 12% lo conforman el polipropileno y otros polímeros comunes. Se comprobó que cuando estos polímeros se incorporan en proporciones de 6% y 8% en mezclas asfálticas para pavimentación según la norma INV-13, estos polímeros reciclados garantizaron un comportamiento mecánico aceptable, por lo que su potencial de uso en la pavimentación es grande, máxime en la región surcolombiana donde actualmente se está construyendo la vía nacional de cuarta generación que conecta a los municipios del Huila con el centro y sur del país, y en la propia ciudad de Neiva, donde también se está construyendo el sistema interno de carretas para el Sistema Estratégico de Transporte Público.

Palabras clave: residuos poliméricos comunes, aprovechamiento de materiales poliméricos, reciclaje de materiales poliméricos para pavimentación.

Abstract

The main raw material for paving the road network in Colombia and the world is asphalt, and the global trend towards clean production to decontaminate the planet of toxic waste that affects the different habitats and the environment in general, has led to the search for ways to take advantage of polymeric materials as a substitute or complement in the construction of these infrastructure works. Despite being regulated and approved the use of polymeric materials in paving by INVIAS, their use is very minimal in the country, which is why, in this research, the importance of the application of common recycled polymers in asphalt mixtures was documented and evaluated, finding that the amount of this type of waste is high and its use is very minimal or almost null. In fact, almost 30% of the waste that arrives at the landfill of the city of Neiva is reusable and about 12% is made up of polypropylene and other common polymers. It was found that when these polymers are incorporated in proportions of 6% and 8% in asphalt mixtures for paving according to the INV-13 standard, these recycled polymers guarantee acceptable mechanical behavior, so their potential for use in paving is great, especially in the southern Colombian region where the fourth-generation national road is currently being built, connecting the municipalities of Huila with the center and south of the country, and in the city of Neiva itself, where the internal system of carts for the Strategic Public Transportation System is also being built.

Key words: common polymeric wastes, polymeric materials utilization, recycling of polymeric materials for paving.

Introducción

La presente investigación pretendió desarrollar una idea amigable con el medio ambiente, que a su vez contribuyera al crecimiento económico y la vinculación de algunos sectores de la sociedad neivana a un cambio mental y cultural, en aras de una mejor calidad de vida; arrojando como resultado tangible un producto útil no solo para la ciudad, sino para el mundo PAVIMENTO ECOLOGICO, con el cual se pudo definir de acuerdo al Instituto Nacional de Vías-INVIAS que, en sus ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, artículo 414 en el que se define al cemento asfáltico modificado con polímeros como: “aquel ligante hidrocarbonado resultante de la interacción física y/o química de polímeros con un cemento asfáltico” (Artículo.414, 2012)

Inicialmente fue necesario hacer referencia a la inmensa cantidad residuos que son desechados sin conciencia, esta situación para ningún habitante de la ciudad es ajena, diariamente se observó como el conductor arrojó su envase por la ventana del auto o al transeúnte tirando sus residuos en el andén. También era muy común encontrar gran cantidad de llantas desechadas en las esquinas, desencadenando innumerables problemas ambientales, sociales y visiblemente deterioro en la calidad del paisaje.

A partir de lo anterior surgió el interés en realizar la búsqueda de una mejor disposición final de estos residuos, a su vez, una eventual y efectiva reutilización para cada uno de ellos. Realizar lo anteriormente expuesto no fue posible sin una previa investigación que, acompañada de campañas de sensibilización, maximicen el reciclaje de polímeros comunes para transformarlos y posteriormente reutilizarlos en la malla vial; generando no solo empleo, sino una mejor calidad de vida para todos sus habitantes.

Los materiales por reciclar fueron de fácil acceso y los cuales presentaban diferentes características, mayoritariamente derivados del petróleo, al igual que lo es el asfalto. Por estas razones y teniendo en cuenta el análisis bibliográfico previo, se afirmó que existe una gran posibilidad de que la combinación entre polímeros comunes reciclados y asfalto dé como resultado el pavimento ecológico, denominación propuesta para el producto obtenido con dicha mezcla.

Finalmente se buscó evaluar cada uno de los factores que incidieron dentro de la ciudad, para una posible aplicación de esta alternativa, teniendo en cuenta la documentación bibliográfica presentada para en la investigación, acogiéndose así a la normatividad y regulación que define en sus documentos el INVIAS.

1. Justificación

El desarrollo de una ciudad, departamento o país está totalmente ligado al estado de su infraestructura vial, proporcionando accesibilidad, movilidad y otros servicios que las carreteras brindan; demostrando así su importancia en la economía. Un país se vuelve competitivo en el momento en que su infraestructura vial logra atender las demandas de su producción. Lo anterior, determinado también por la calidad y oferta de la infraestructura en el contexto actual de los modelos de transporte (Ribeiro, 2011). La mejora en el sistema de transporte colabora para el aumento en la competencia del mercado, garantizando la economía a escala de producción, y consecuentemente reducir los procesos y tiempos en la comercialización (Ballou, 1993).

La infraestructura de transporte vial en Colombia es uno de los aspectos más importantes que influye sobre la competitividad interna y externa del país, afectando notoriamente el crecimiento económico y el desarrollo sostenible. Según el ranking global de competitividad realizado por el Foro Económico Mundial, para el año 2016, Colombia se ubicó en el puesto 61 entre 138 países con un índice de 4.3%, resultado que ha causado grandes preocupaciones en cuanto al camino que debe seguir el país para llegar a ser más competitivo por medio de la infraestructura de transporte vial (Ordoñez Cetina & Parra Velandia, 2017).

Las cifras de entidades como INVIAS, administraciones municipales y los estudios realizados por diferentes autores evidencian que Colombia tiene un rezago significativo en la infraestructura de transporte en general, ocasionado entre otros factores por los bajos niveles de inversión. Esto debido a que la política fiscal establece una menor prioridad a los retornos de mediano y largo plazo de la inversión en capital, lo cual se asocia con una menor inversión productiva y una mayor relevancia a la inversión social, ocasionando fuertes atrasos en la infraestructura de transporte. Por ende, las posibles soluciones para salir de este rezago son

mejorar la calidad de la infraestructura con el fin de disminuir los costos de mantenimiento y rehabilitación; la descentralización de la infraestructura vial mediante instituciones que se encarguen de gestionar, administrar, rehabilitar y mantener la red vial secundaria y terciaria que presentan mayores atrasos e información; y mejorar los procesos de concesiones, a fin de fortalecer la estructura de los proyectos. (Ordoñez Cetina & Parra Velandia, 2017) (Yepes, 2013).

Lo hasta aquí expuesto muestra los grandes requerimientos de mejorar la infraestructura vial en el país, realidad similar a la que actualmente presenta el departamento de Huila específicamente la ciudad de Neiva donde según cifras del INVIAS en 2016 presentaba 482 km² pavimentados y los 520 km² restantes por pavimentar. Pese a los avances que se vienen adelantando en la ciudad con la implementación del SETP (sistema estratégico de transporte público) aún es difícil cumplir con las expectativas, adicional a este el crecimiento y expansión acelerada de la ciudad trae consigo mayor demanda de vías y kilómetros por pavimentar.

La materia prima en los procesos de pavimentación utilizados generalmente en Colombia y por supuesto en el Huila es el asfalto, por esta razón surge el interés de determinar de qué manera se puede contribuir desde la parte ambiental a mitigar el déficit en las vías de la ciudad; la revisión bibliográfica arroja resultados interesantes que se evaluarán a lo largo del documento. Los asfaltos debido a sus propiedades pueden ser modificados con diferentes tipos de sustancias, entre ellas están los polímeros, lo cual ayuda a presentar una mayor viscosidad (en función de la cantidad de polímero adicionado), experimentará un aumento en la resistencia ante los efectos del agua y mayor resistencia al envejecimiento, menor susceptibilidad a la variación de las temperaturas, y un incremento en el punto de inflamación entre otras. Todas estas mejoras

dependen del tipo de asfalto que se tenga de base y del tipo y cantidad de polímero con que éste se modifique (Huang L. Z., 2007).

2. Planteamiento del problema

¿Cuál sería la importancia de emplear polímeros comunes reciclados en las mezclas asfálticas, para los procesos de construcción y rehabilitación de la malla vial dentro de la ciudad de Neiva?

Para resolver este interrogante fue necesario realizar el proyecto investigativo de una manera responsable y honesta, determinando la posibilidad e importancia de emplear algunos polímeros junto al asfalto para que luego de un proceso de transformación esta mezcla sea empleada en la malla vial de la ciudad, obteniendo resultados visibles no solo en las vías, sino en la disminución de los residuos que llegan al relleno sanitario. El diario del Huila (Diario del Huila, 2015) afirmó en uno de sus encabezados que el relleno sanitario de Neiva colapsará en muy poco tiempo, dicho artículo planteó que en Colombia se produjeron 11,6 millones de toneladas de basura hasta el año 2015 y solo se recicló el 17%, no se hizo separación en la fuente ni recolección selectiva.

En cambio, países de la unión europea se aprovechan el 67% de los residuos generados. Retomando las palabras del director del departamento nacional de planeación citadas por el mismo Diario “se estima que en los próximos 10 años la generación de residuos crezca en 20% por lo que es importante que en los planes de ordenamiento se tenga en cuenta esta situación y habiliten usos de suelos para construir rellenos sanitarios, sitios de tratamiento y aprovechamiento de los residuos en los municipios” (Diario del Huila, 2015); cálculos de las empresas públicas de Neiva estipularon que a día a día el relleno sanitario Los Ángeles recibe alrededor de 400 Toneladas de residuos provenientes de la capital de Huila y una gran cantidad de municipios, sobre todo del norte y centro del departamento. Se debe tener en cuenta que el

departamento nacional de planeación catalogó dicho relleno como uno de los cuales está próximo a agotar su capacidad para recibir residuos (Diario del Huila, 2017).

Teniendo en cuenta la documentación bibliográfica que encontró al respecto: estudios investigaciones, ensayos, entre otros trabajos realizados en diversos lugares del mundo. A continuación, se realizó una breve referencia de la información más importante y pertinente, que de alguna manera ayudaron a dar solución a la pregunta planteada inicialmente. En Holanda, VolkerWessels una constructora de dicho país recicla el plástico para la elaboración de nuevas vías. La Editorial televisa afirma al respecto que: “Existen muchos beneficios al utilizar plástico reciclado en vez de asfalto sobre una superficie de conducción como son, la producción del material tendrá un costo ambiental reducido, durará más tiempo, requerirá de menos mantenimiento y podrá soportar temperaturas extremas. Además, será más fácil de colocar y el camino será hueco, dejando espacio para dejar cables de energía debajo de éste.” (Editorial Televisa S.A, 2015). En este sentido cabe resaltar que en la investigación lo que se buscaba es la mezcla entre, no solo plástico, sino otros polímeros que ya se han mencionado, incluyendo llantas que en muchas partes del mundo ya son utilizadas y en una línea futura los escombros que pueden remplazar la arena y la gravilla al realizar el proceso de pavimentación.

Existe también un estudio de dos investigadores que adicionaron desperdicios plásticos con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del asfalto obteniendo resultados altamente positivos, (Reyes Lizcano & Reyes Ortiz, 2010). Mediante sus pruebas encontraron, para su caso, las proporciones idóneas que garantizaron una mejor resistencia y compactación, que fueron las principales propiedades mecánicas cuando al asfalto se hace referencia. Estudios como este en los últimos años vienen tomando fuerza a consecuencia de la problemática que presentó el asfalto a raíz de los altos flujos vehiculares, el cambio climático y demás factores que puedan

incidir para disminuir la capacidad y duración en el tiempo de las propiedades mecánicas que posee el pavimento, generando fatigas, deformación permanente y ondulaciones asfálticas. Países como Estados Unidos, Venezuela, Costa Rica, México, Salvador y Brasil han manifestado su preocupación a través del adelanto de investigaciones en el tema; en Colombia, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), viene promoviendo a través de la actualización de las normas y especificaciones técnicas, el uso de nuevas alternativas de concretos asfálticos, que permiten la producción de mezclas asfálticas con mejores características que las actuales, debido a que se exigen mejores materiales y mayores controles de calidad para garantizar mayor resistencia de la mezcla asfáltica al ser sometido a diversas condiciones (Pérez, 2012).

Centrando la problemática en términos de pavimentación, Colombia presentó su malla vial en estado crítico debido a que la mayoría de su estructura no posee las características necesarias para enfrentaron las condiciones exigidas por el desarrollo creciente de la economía y la infraestructura, la carencia de estas características se observa en un deterioro prolongado del pavimento de las vías, generalmente debido a los altos costos en los que se incurre al utilizar nuevas tecnologías en el diseño y construcción de los pavimentos (Ramírez Jiménez, 2011). A partir de este problema (Pérez, 2012), menciona que surgió una solución que consiste en la modificación de mezclas asfálticas para mejorar las propiedades mecánicas del asfalto convencional, puesto que con el transcurrir del tiempo, estos disminuirían su vida útil como consecuencia de su exposición a factores como altas temperaturas, humedad y elevados niveles de tránsito, presentando problemas de deformación, fatiga y otros.

La problemática que se evidencia no es muy diferente a nivel local, donde para la mayoría de los habitantes es uno de los puntos a mejorar para el actual alcalde, encontrando en primer lugar la inseguridad y en tercero todo lo relacionado a infraestructura vial y movilidad

(La Nación, 2015) ; solo basta observar la mayoría de las vías de la ciudad para corroborar esta postura, las cuales presentan un gran déficit; a lo largo y ancho de la ciudad se encuentran huecos y ondulaciones en sus principales avenidas y en general en todos los sectores, esto sin mencionar la cantidad de vías que se encuentran sin pavimentar y el acelerado crecimiento urbanístico. Al realizar esta investigación se pretende obtener un pavimento más económico de similares o mejores características al que actualmente se emplea, alcanzando una reducción en los costos de pavimentación reflejados en una amplia mejoría de la infraestructura vial en la ciudad, evitando inicialmente la inadecuada disposición final que se le realiza a todos los residuos ya mencionados.

Retomando nuevamente la pregunta inicial para enfatizar un poco en el reciclaje, que para el caso resultó como un problema distante del deterioro de la malla vial, pero que puede contribuir a una posible solución; se logró afirmar que la falta de cultura que existe en todos los estratos sociales de la ciudad es la principal causa. Se analizó detenidamente el problema donde se pudo inferir que no fue falta de políticas, ni de gestión la ciudad, puesto que han avanzado mucho en este sentido; en sí es la existencia de un sin número de canecas en la mayoría de parques y zonas públicas, por ende, se afirmó que es netamente cultural y educativo, y que puede ser solucionado con campañas de sensibilización, vinculando y dando a conocer a la gente la iniciativa, que, en sí, es para solucionar un problema aun mayor, la pobreza de la malla vial.

¿Afectaría de alguna manera el reciclaje de polímeros en los residuos que son llevados al relleno sanitario los Ángeles?

Para generar un impacto altamente significativo se requiere de cambios, sin embargo, cada gramo de material que se reutilice va a afectar la cantidad de residuos que llegan al relleno

de la ciudad de Neiva, estimando que los índices de reducción probablemente no sean muy altos si se tiene en cuenta que este relleno acoge otros municipios del Huila. El Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) se convierte en este aspecto en una fuente bibliográfica muy significativa, de este mismo se extraen las siguientes tablas: Tabla 1, Tabla 2, que muestran la realidad de los residuos que llegaron al relleno sanitario, tomando como base una caracterización física de los residuos domiciliarios, en donde se realizó un muestreo tomado en el mismo relleno mencionado en (Diario del Huila, 2015).

Tabla1. Caracterización de residuos sólidos zona rural de la ciudad de Neiva.

Material en relleno sanitario	Peso Muestra (kg)	%Producción
Orgánicos	15.30	17.75%
Plástico	12.15	14.10%
Otros inservibles	31.30	36.32%
Textiles	4.01	4.65%
Plástico P.E.T.	5.56	6.45%
Cartón, Papel	2.66	3.09%
Caucho y cuero	2.02	2.34%
Vidrios	1.50	1.74%
Metales	5.32	6.17%
Madera, huesos	6.36	7.38%
Total	86.18	100%

Fuente: Adaptado actualización PGIRS 2015 Neiva-Huila, 2019

Es evidente que el 20.55% representado por P.E.T. y el plástico no reciclado podrían ser reutilizados en una eventual materialización de lo que el presente proyecto plantea. Adicionalmente hay que tener en cuenta que parte del plástico ya se recicla en la ciudad por empresas legalmente constituidas o algunos habitantes de la calle y recicladores informales para su sustento. Por esta razón fue necesario analizar la posibilidad de competir con las empresas que compran estos residuos en otras partes del país, teniendo en cuenta que se ahorrarían los costos de transporte por la ubicación del proyecto. La siguiente tabla (La Tabla 2) muestra la cantidad de residuos que son recuperados y la entidad encargada de hacerlo.

Tabla 2. Caracterización de residuos solidos

Tipo de residuo	Relleno sanitario (kg/MES)	Ruta REC. Juan (kg/MES)	Institucional (kg/MES)	Grandes generadores (kg/MES)
Papel	11.250,0	1.371,0	469,1	434,0
Cartón	13.925,0	1.894,0	393,4	2.035,0
Vidrio	2.099,9	278,2	86,0	131,0
Plástico	31.999,0	927,0	192,5	535,0
Metales	6.072,5	373,3	76,0	52,5
Otros Recursos	0,0	300,0	0,0	31,0

Fuente: Reformulación PGIRS 2015 Neiva-Huila, 2019

Como se puede observar el plástico es el material que más se recupera como lo menciona (Altadill Colominas, 2009), por ende, las cantidades totales de plástico que se producen y llegan al relleno sanitario son muy elevadas, es necesario también tener en cuenta que la mayor cantidad de plástico es recuperado por el relleno es decir no se está llevando a cabo la separación en la fuente. Por esta razón se enfatiza en las campañas de sensibilización, buscando en un futuro

no muy lejano disminuir estas cantidades (31999 Kilogramos al mes) y reutilizar lo que se recicle.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Documentar y evaluar la importancia de la aplicación de polímeros comunes reciclados a las mezclas asfálticas, desde la perspectiva técnica, ambiental y local en la ciudad de Neiva.

3.2. Objetivos específicos

Revisar de forma detallada el estado del arte en relación a los asfaltos modificados con polímeros y caracterizar la información determinando la relevancia de la alternativa planteada.

Realizar diseños de mezclas asfálticas modificadas con polipropileno reciclado y diseños de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado para evaluar los resultados obtenidos.

Buscar acercamientos con los principales centros comerciales de la ciudad con el fin de obtener información acerca de las cantidades de polímeros que se desechan en dichos lugares.

4. Marco Teórico

4.1. Asfalto

La ASTM o American Society for Testing and Materials definió el asfalto como aquel material aglutinante de consistencia variable, de color oscuro, que se puede encontrar naturalmente y/o por refinación de petróleos. También es conocido como Bitumen; es común encontrar en literatura los términos de asfaltos y bitúmenes, en plural, confirmando la gran variedad de tipos y aplicaciones.

El asfalto es sin duda uno de los materiales más antiguos utilizados por el hombre. En Mesopotamia, el asfalto era usado como aglutinante en trabajos de albañilería y construcción de estrados, los reservorios de agua de los baños sagrados eran impermeabilizados con asfalto; pasajes bíblicos revelan de su empleo como impermeabilizante en el arca de Noé. A su vez los egipcios los utilizaron en trabajos de momificación. Posteriormente, se usó en pavimentación en 1802 en Francia, en 1838 en Estados Unidos y en 1869 en Inglaterra (Vinueza Elizalde, 2014). A partir de 1909, se inicia el uso del asfalto derivado del Petróleo, el cual por sus características de economía y pureza constituyen el día de hoy la principal fuente de abastecimiento. El asfalto es considerado como un sistema "Coloidal" (fase dispersa) denominado Asfáltenos, recubierto por una capa protectora de resinas polares, que se dispersa en un medio dispersante de máltenos, compuesto por mezcla de aceites y resinas (Martinez, 2003).

4.1.1. Asfáltenos

Son de color negro o pardo oscuro y amorfos que por acción del calor aumenta de volumen. Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza, comunicando a los asfaltos

estabilidad, cuerpo y transporte para los asfáltenos y las resinas. Contienen la totalidad de la parafina del asfalto, comunicándole la adhesividad (De Saja Saez, 2015)

4.1.2. Máltenos

Son líquidos viscosos compuestos de resmas y aceites. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas en la mezcla asfáltica, mientras que los aceites actúan como un medio de ductilidad y plasticidad, siendo estables (De Saja Saez, 2015)

4.2. Pavimentos y mezclas asfálticas

Diversos autores como (Hernandez Acosta, 2017) concuerdan con Papagiannakis y Masad quienes definen a un pavimento como una estructura de múltiples capas, diseñado para soportar los esfuerzos y deformaciones que se generan por el paso repetido de vehículos y por las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra construido. Por otra parte, las mezclas asfálticas son una combinación de agregados minerales (gravas y arena), aglomerados mediante un ligante asfáltico (asfáltenos), son usados en la elaboración de pavimentos dentro de ciudades urbanas, las cuales deben cumplir con características particulares que garanticen su durabilidad.

Para elaborar una mezcla asfáltica existen dos procesos: frío y caliente. El caliente permite la incorporación de residuos; en dicho proceso se mezclan agregados y se sacan antes de ser calentados a 150 grados centígrados, después se añade un ligante (asfalto) a la mezcla en proporciones que oscilan de 5 a 10 %. (Altadill Colominas, 2009).

4.2.1. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

Las deformaciones permanentes son uno de los tipos de fallas que presentan en los pavimentos asfálticos cuando son expuestos a altas temperaturas, tránsito pesado y bajas velocidades de carga. La reología de acuerdo a (Morea, 2011) es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales en el tiempo, las deformaciones permanentes de las capas asfálticas son básicamente un problema de flujo por tanto es coherente realizar la elección del asfalto en función de propiedades reológicas del mismo. (Morea, 2011) plantea como los pavimentos en la actualidad son sometidos a mayores cargas debido a los altos flujos de vehículos y las altas temperaturas, entre otras causas que generan fallas en los pavimentos las cuales pueden dividirse en 2 fisuraciones (térmicas o por fatiga) y deformaciones permanentes. De igual forma realiza una breve descripción de cada una de ellas:

Fisuración. es un fenómeno complejo que puede ser causado por diferentes factores, se puede asociar a tensiones inducidas en el pavimento producto de las cargas de tránsito, variaciones en la temperatura o una combinación de ambas. La fisuración ocurre cuando la tensión inducida por las cargas de tránsito y/o variaciones térmicas excede la resistencia a tracción de la mezcla. Este punto no se alcanza inmediatamente, sino que se produce en sucesivos ciclos de carga y descarga que van consumiendo la capacidad de la mezcla de resistir las tensiones inducidas. La fisuración térmica se da a temperaturas bajo 0 grados Celsius, se da por el enfriamiento de las capas superiores, impidiendo la libre contracción en las capas inferiores la libre contracción, lo cual genera tensiones que al superar la resistencia a tracción provocan la fisura o por cambios bruscos en la temperatura tal cual lo comparte (Hernandez Acosta, 2017) en su investigación referente al tema mencionado.

Deformaciones permanentes. Son conocidas también como ahuellamiento, se caracterizan por la existencia de una sección transversal de la superficie que deja de ocupar su posición original, se les da el nombre de deformación permanente porque representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga que son irrecuperables. (Morea, 2011)

4.3. Modificación de mezclas asfálticas

La modificación de mezclas asfálticas es una técnica utilizada desde hace más de 20 años para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a las mezclas convencionales, tal cual lo menciona (Rodríguez Gallego, 2005) con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito, busca reducir las deformaciones permanentes de las mezclas que componen las capas del pavimento, aumentando la rigidez, además disminuir la fisuración por efecto térmico y por fatiga, aumentando así su elasticidad.; diversos autores confirman esta postura entre ellos (Luque Ariza & Rincón Solano, 2011) quienes afirman que al rededor del mundo se han llevado a cabo estudios en los que el cemento asfáltico modificado ha presentado mejoras en sus propiedades físicas, sobre todo aquellos modificados con polímeros, en los cuales se ha demostrado que: aumenta la consistencia, disminuye la temperatura de ablandamiento, mejoras sus características reológicas y recupera en un mayor porcentaje su forma cuando es sometido a deformaciones.

4.3.1. Mezcla Asfáltica Modificada con Polímeros

En Colombia el asfalto se obtiene en el proceso de refinación de petróleo, el INVIAS INVIAS identifica dos a partir de diferentes ensayos según su nivel de penetración como “Apiay” con una penetración 60/70 y el “Barrancabermeja” con penetración 80/100 (Artículo 400-07) (Perez & Lopez, 2012); no obstante, existen diferentes métodos para el diseño de mezclas entre ellas aquellas que se modifican con polímeros. El cemento asfáltico de acuerdo al (Artículo.414, 2012), cuando es modificado con polímeros, se convierte en un ligante hidrocarbonado resultante de la interacción física y/o química de polímeros con un cemento asfáltico. En el desarrollo de la investigación con pavimentos, se debe tener en cuenta que se rigen de acuerdo a lo establecido por el INVIAS o el ASTM, entidades donde se reglamenta los parámetros que debe cumplir las mezclas modificadas con polímeros, para ser aprobada su respectiva aplicación (Ramirez, 2011). Teniendo en cuenta lo anterior la designación y las características básicas de los cementos asfálticos modificados con polímeros, estipuladas por el INVIAS en su (Artículo.414, 2012), son:

- El tipo I se basa en las propiedades de cementos asfálticos convencionales modificados con EVA o polietileno y se empleará en la elaboración de mezclas de tipo drenante.
- Los tipos II, III y IV se basan en las propiedades de cementos asfálticos convencionales modificados con copolímeros de bloque estirénico como el SBS. El Tipo II se aplicará en mezclas drenantes, discontinuas y densas, semidensas y gruesas en caliente en general; el Tipo III en mezclas discontinuas y densas, semidensas y gruesas en caliente en zonas de altas exigencias y el Tipo IV se utilizará en la elaboración de

mezclas antirreflectoras de grietas del tipo arena asfalto o riegos en caliente para membranas de absorción de esfuerzos.

- El tipo V es un asfalto modificado de alta consistencia, recomendado para la manufactura de mezclas asfálticas de alto módulo. Se podrán utilizar cementos asfálticos modificados con polímeros diferentes a los citados aquí, siempre que se cumplan las exigencias respectivas para los diferentes tipos.

En el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando son sometidas a niveles elevados de tránsito y de gradientes de temperatura (Figueroa Infante, 2007). En Colombia, los desarrollos investigativos en el área de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas son extensos en comparación con la cantidad de estructuras de pavimentos flexibles construidas con esta tecnología. (Rondón Quintana, 2008) Finalmente, los autores (Figueroa Infante, 2007) (Rondon Quintana, 2014) dicen que al utilizar cualquiera de estos modificadores, se pretende tener una resistencia al envejecimiento, a los efectos del agua y en general a las condiciones climáticas, buscar una mejor adherencia con los pétreos, propiedades elásticas, de viscosidad y en general con estas condiciones se alcanzan mezclas con mayor resistencia a la deformación y a la fatiga. Polímeros

La materia está formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros. Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas muy diversas. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones, unas se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales. (Jang B. e., 1992); El autor en su libro, ciencia y

tecnología de composite, también afirma que existen polímeros naturales como el algodón, formado por fibras de celulosas. La celulosa se encuentra en la madera y en los tallos de muchas plantas, y se emplean para hacer telas y papel, la seda y la lana son otros ejemplos. Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que se usan son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas. Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, para (Dong, 2011); (Hsu, 2011); (Punith, 2012) los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

Existen diferentes tipos de polímeros: naturales y artificiales. Algunos de estos materiales son: el almidón, las proteínas, la celulosa, el algodón, las pieles, las fibras sintéticas, los plásticos, los cauchos, las pinturas, los adhesivos, el icopor, etc. (Figuerola Infante, 2007). Estos autores continúan citando a Herman Staudinger quien en el año de 1926 en una reunión anual de físicos y ambientalistas alemanes mostraba por primera vez sus descubrimientos sobre algunos de estos materiales.

El consumo de polímeros ha aumentado en los últimos años. Ellos han sustituido parcial y a veces totalmente a muchos materiales naturales como la madera, el algodón, el papel, la lana, la piel, el acero, el cemento. Los factores que han favorecido el mercado son los precios competitivos y a veces inferiores a los de los productos naturales, y el hecho de que el petróleo ofrece una mayor disponibilidad de materiales sintéticos que otras fuentes naturales (Odián G. , 1991). La crisis petrolera de 1974 también influyó en el aumento del consumo, sobre todo en la industria automotriz. Los polímeros permitían disminuir el peso de los vehículos, lo cual repercutía en un ahorro en el consumo de combustible por kilómetro recorrido. Entre los

polímeros usados para reducir el peso de los automóviles se encuentran los poliésteres, polipropileno, cloruro de polivinilo, poliuretanos, polietileno, nylon y ABS (acrilonitrilo-butadienoestireno); sin embargo, el mercado más grande es el de los empaques y embalajes (Odián G. , 1991).

Hace algo más de veinte años se está empleando los SBR (Estireno Butadieno Hule) y SBS (Estireno Butadieno Estireno) para mejorar los asfaltos en proporciones del 6% al 12% con resultados excelentes, siendo mejores los de tipo SBS. Posteriormente se empezó a modificar con polímeros el asfalto para pavimentos, sobre los cuales se observaron algunas ventajas como el cambio de viscosidad y además el comportamiento a temperaturas muy bajas, hasta menos de 40° C (Oda, 2002).

4.3.2. Tipos de Polímeros Modificadores

Diferentes autores alrededor del mundo como lo son (Aristizabal Martelo, 2015) y (Jang B. e., 1992) han realizado investigaciones con respecto a cómo los polímeros aportan sus propiedades a las mezclas asfálticas, Fernández *et al.*, en su artículo describe tres tipos de polímeros modificadores y sus respectivas características:

- Termoplásticos: se reblandecen con calor, pueden ser solubles. Al enfriarse se dejan moldear sin perder propiedades. Son polímeros lineales que forman pequeñas ramificaciones. Los principales de este tipo son Polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno, copolímeros de etileno-acetato
- Termo endurecibles: formados por la base y el endurecedor. No se pueden transformar después de deformarse. Entre este tipo están resinas fenólicas, epoxi, resinas de poliéster y resinas de poliuretano

- Elastómeros o cauchos: caucho natural, caucho etileno-propileno, butadieno estireno (SBR), caucho de policloropeno, elastómeros termoplásticos de butadieno estireno (SBS).

Dentro de los principales estudios sobre los polímeros que modifican en asfalto se pueden encontrar especialmente sobre el grano de caucho reciclado (GCR) (Yung V., 2016) relaciona una serie de ventajas al utilizar GCR para la modificación de asfaltos y mezclas asfálticas, los autores citan una serie de documentos en los cuales se confirman cada una de las ventajas:

- Aumento en la resistencia a la fatiga y al ahuellamiento (Dong, 2011); (Hsu, 2011); (Punith, 2012).
- Incremento de la resistencia al envejecimiento ((Huang L. Z., 2007); (Dong, 2011) (Punith V. e., 2011).
- Incremento en la resistencia al daño por humedad (Dong, 2011); (Punith V. e., 2011) .
- Aumento de la resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas (Choubane, 1999); (Huang L. Z., 2007); (Khodary, 2010)).
- Menor susceptibilidad térmica (Othman, 2006); (Khodary, 2010); (Dong, 2011).
- Mayor resistencia del asfalto modificado al calor (IDU y Universidad de los Andes, 2002, 2005).
- Incremento en la recuperación elástica del asfalto bajo carga (Huang L. Z., 2007); (Khodary, 2010).
- Generan capas asfálticas de mayor durabilidad y menor necesidad de mantenimiento en proyectos viales (Wang, 2006); (Cooper, 2007); (Lee, 2007).

- Disminución del ruido de rodadura (Putman, 2005); (Anderson, 2008); (Wang L. e., 2009).
- Mejoramiento de las propiedades reológicas (Huang S. , 2008); (Kumar, 2010); (Punith V. e., 2011).
- Disminuyen el impacto ambiental negativo que producen las llantas (Huang L. Z., 2007); (Wang L. e., 2009); (Xiao, 2009).
- De igual manera se citan algunas desventajas de utilizar GCR para modificar asfaltos
- Incrementan la viscosidad del ligante generando un aumento en la temperatura de mezcla y compactación (Bahia, 1994) (Ballou, 1993).
- En ciertos casos, el caucho capta parte de los aceites del asfalto, lo que afecta las propiedades de adherencia y cohesión (Peralta, 2010).
- La modificación del CA con el GCR se realiza a temperaturas elevadas (entre 175 y 200 °C), produciendo un aumento en el uso de energía y combustibles durante la fabricación de la mezcla (Dong, 2011).
- Hay necesidad de comprar un equipo de modificación para mezclar el asfalto con el GCR y almacenarlo, lo que incrementa el costo inicial de la mezcla.

Finalmente es oportuno afirmar que existen varios modificadores poliméricos aprobados por las normas ASTM (American Society for Testing Materials) y son:

Tipo I: Polímeros elastómeros a base de estireno, usados principalmente en carpetas delgadas, pavimentos con tránsito pesado y cualquier tipo de clima, ya que se busca mejorar el comportamiento de las mezclas a altas y bajas temperaturas (Sanchez Gonzales, 2005).

Tipo II: Polímeros elastoméricos con una configuración de caucho de estireno, butadieno látex o neopreno látex, mejoran el comportamiento del asfalto a bajas temperaturas. Se usa para el mejoramiento del asfalto en climas fríos (Sanchez Gonzales, 2005).

Tipo III: Polímero tipo plastómero, mejora el comportamiento del asfalto a altas temperaturas, sirve para mejorar el ahuellamiento a altas temperaturas. Se usa para el mejoramiento de asfalto en climas calientes (Sanchez Gonzales, 2005)

GCR: Es fabricado con el procesamiento (molienda) de neumáticos, mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión del asfalto, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o cambios de temperatura. Se usa en carpetas delgadas a cualquier temperatura. (Sanchez Gonzales, 2005).

El uso de polímeros reciclados en la carpeta asfáltica se incorporó en la norma ASTM, con el uso del GCR, aunque aún no se han implementado otro tipo de polímeros reciclados como el poliestireno expandido (residuos de icopor), el polietilentereftalato (PET-residuos de botellas plásticas) entre otros. Se sabe que los residuos de estos polímeros podrían representar mejoras en las propiedades mecánicas del asfalto, como la permeabilidad, la resistencia a las deformaciones por temperatura, el aumento en la fricción neumático – pavimento entre otras. Además de mejorar sus propiedades mecánicas estas adiciones proporcionan al asfalto la capacidad de

disipar energía, debido a la organización interna de los polímeros, ya que están formados por largas cadenas que al estirarse poseen la capacidad de liberar mucha energía. (Ramirez, 2011)

En países como México y Brasil el uso de elastómeros reticulados vulcanizados (GCR), se ha desarrollado en los últimos años, dándole al pavimento la capacidad de comportarse como un material más elástico soportando así mayores deformaciones sin salir de su límite elástico y volviendo a su estado natural sin haber sufrido deformaciones permanentes, no solo está la ventaja de su aumento en la elasticidad sino en la reutilización de un material de los más contaminantes a nivel mundial y del cual su reciclaje en otros productos no es muy aprovechado. En el desarrollo de la investigación con pavimentos, se debe tener en cuenta que se rigen por unos parámetros ya establecidos por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) o el American Society for Testing Materials (ASTM), en los cuales se reglamenta los parámetros que deben cumplir las mezclas modificadas con polímeros, para poder ser aprobada su respectiva aplicación. Para el desarrollo de la mezcla con polímeros es esencial la selección correcta del asfalto base, ya que tanto el asfalto como el polímero deben ser compatibles. (Ramirez, 2011)

4.4. Síntesis normativa colombiana

En términos generales el marco normativo colombiano en temas de residuos sólidos, tiene su origen con la ley 9 de 1979 (código sanitario nacional) y el decreto ley 2811 de 1975 (código nacional de los recursos naturales renovables y de protección del medio ambiente), para traer esta normatividad a términos un poco más recientes es necesario citar a la constitución política de 1991 que en su artículo 79 promulga un modelo de desarrollo sostenible para el país, y seguidamente el artículo 80 consagra el derecho a un ambiente sano para todas las personas.

Con relación a lo que tiene que ver con asfaltos modificados con polímeros y su normatividad está dada por el INVIAS que es una agencia de la rama ejecutiva del gobierno de Colombia a cargo de la asignación, regulación y supervisión de los contratos para la construcción de autopistas y carreteras y el mantenimiento de las mismas El Instituto Nacional de Vías, INVIAS, tendrá como objeto la ejecución de las políticas, estrategias, planes, programas y proyectos de la infraestructura no concesionada de la Red Vial Nacional de carreteras primaria y terciaria, férrea, fluvial y de la infraestructura marítima, de acuerdo con los lineamientos dados por el Ministerio de Transporte (INVIAS, 2020). En este sentido se tienen las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, específicamente su capítulo 4 relacionado con los pavimentos asfálticos y sus artículos 414 y 415 los cuales se enfatizan en los asfaltos modificados con polímeros.

5. Metodología, procedimientos y muestra de resultados

5.1. Metodología desarrollada

Para el desarrollo de la investigación fue necesario tener conocimiento de las metodologías a utilizar, distinguir sus bases teóricas en los procedimientos que se realizan para cumplir con los objetivos propuestos; para ello se determina una metodología basada en (Bernal, 2010) y su libro metodología de la investigación, por medio del cual se puede enmarcar en la investigación dentro del método galileano debido a su carácter experimental, con un enfoque sintético por integrar muchos componentes investigativos dispersos y reunirlos en uno solo. El mismo Bernal cita a (Cerdeña, 2000) resaltando de su postura que “uno de los problemas más agudos y complejos que debe enfrentar en la actualidad cualquier individuo que quiera investigar es, sin lugar a dudas, la gran cantidad de métodos, técnicas e instrumentos que existen como opciones, los cuales, a la vez, forman parte de un número de paradigmas, posturas epistemológicas y escuelas filosóficas, cuyo volumen y diversidad desconciertan”. Apropiando estas palabras y evitando el problema que se menciona en ellas se realiza una descripción de las actividades más importantes en el desarrollo del cronograma.

Inicialmente se realiza una revisión bibliográfica que es una etapa que transversalmente se ejecuta en toda la investigación, debido a que constantemente se debe retroalimentar lo que se experimenta y los nuevos conocimientos en búsqueda de una mejora continua. Paralelamente a lo anteriormente expuesto se inician los acercamientos infructuosos a los centros comerciales Centro Comercial San Pedro Plaza, Centro Comercial Santa Lucía Plaza, Centro Comercial San Juan Plaza, siendo estos los tres con mayor presencia y concurrencia de los neivanos, a ellos se les solicita un estimado de la producción de residuos de tipo plásticos en sus instalaciones.

También fue necesario consultar con entidades como la secretaria de medio ambiente de la ciudad de Neiva y empresas como Ciudad Limpia quien es la encargada de la recolección, transporte y disposición final de los residuos en la ciudad.

No obstante, por términos de hermetismo en la información y términos de la pandemia (Covid-19) fue imposible obtener información confiable en estos lugares, especialmente en los centros comerciales. Aun así, se realizaron trabajos de campo y de recopilación de información bibliográfica que permitieron continuar con la investigación. De esta manera se avanzó con el fin de alcanzar cada uno de los objetivos inicialmente planteados.

6. Resultados y análisis

6.1. Procedimientos

6.1.1. Diseño de las Mezclas Asfálticas en Caliente

Consistió en fabricar 3 probetas cilíndricas de mezcla asfálticas de (4") de diámetro y una altura de (2 ½"), las cuales son sometidas a una serie de ensayos para conocer su estabilidad y flujo. Siguiendo la norma INV E 748-13.

Equipos.

- Molde cilíndrico con collar de extensión y una placa de base plana.
- Extractor de probetas. Este debe ser un elemento de acero que tenga forma de disco este elemento debe tener las siguientes dimensiones: Diámetro de (10 cm), espesor de (1.27 cm). Este es utilizado para extraer la bobeta del molde luego de su compactación.
- Martillo de compactación. Es un dispositivo en acero con una base plana circular con una caída libre de (10 lb) de peso.

Horno.

- Mordazas. Consiste en dos segmentos cilíndricos de hierro, la mordaza inferior va montada sobre una base plana provista de dos varillas perpendiculares que sirven como guía para ensamblar la mordaza superior.

- Máquina de compresión. Es un equipo mecánico o hidráulico capaz de producir una velocidad de desplazamiento vertical de (50 +- 5 mm)
- Medidor de estabilidad. La resistencia de cada una de las probetas se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa. El anillo deberá estar unido al marco de carga y a un adaptador que permita transmitir la carga de la mordaza.
- Medidor de deformación (flujo). Deformímetro de lectura final fija.
- Baño maría. Instrumento rectangular compuesto por un recipiente que tenga la capacidad de contener agua a una temperatura mínima de (60 °C) durante un largo periodo de tiempo.
- Termómetro de mercurio o bimetálico. Instrumento que permitió tener lecturas de temperatura ente (10 C° - 200°C)
- Balanza. Este equipo debió tener una capacidad de (2000 gr)

Elaboración de probetas. Se deberá preparar una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto (con incrementos de 0.5% en masa entre ellos)

Para cada probeta se necesitan (1200 gr) de ingredientes.

Preparación de agregados. Luego de practicarles los ensayos correspondientes a los agregados se procedió a prepararlos para la elaboración de las briquetas. Se inició con el secado hasta masa constante a una temperatura entre (105 °C y 110 °C) y se separaron usando los siguientes tamices

Figura 1. Tamices

25.0 mm a 19.0 mm	(1" a ¾")
19.0 mm a 9.50 mm	(¾" a 3/8")
9.50 mm a 4.75 mm	(3/8" a No. 4)
4.75 mm a 2.36 mm	(No. 4 a No. 8)
Pasante de 2.36 mm	(No. 8)

Fuente: Documentos técnicos INVIAS, 2020

Se tomaron las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculados, cada una de las probetas elaboradas debe tener una altura de $(63.5 \pm 0.5\text{mm})$. Los agregados fueron calentados en el horno a una temperatura que no sobrepasen los (28°C) , luego de esto se transfirieron a un recipiente de mezclado donde se mezclaron durante 5 segundos.

Los agregados y el asfalto se mezclaron rápidamente hasta obtener un resultado homogéneo, es importante tener en cuenta que se debe evitar pérdida de material durante el mezclado y el manejo posterior.

Figura 2. Diseño de mezcla asfáltica



Fuente: Ingeolab, 2020

Se armó el conjunto de moldes para las probetas, antes de verter la mezcla asfáltica, se posicionó en el fondo del molde un filtro de papel que se ajustara a el área interna del molde.

Seguidamente se introdujo toda la porción de la mezcla en el molde y se golpeó con una espátula 15 veces alrededor del perímetro, 10 sobre el interior, luego se colocó un filtro de papel sobre la mezcla. Ahí se tuvo en cuenta que la temperatura para elaborar las briquetas tiene que ser entre 120 °C – 135°C.

Se ubicó el molde con la muestra asfáltica en el pedestal de compactación y se aplicó 75 golpes según la norma INV -13 para estos golpes se hizo el uso del martillo se compactación. Al finalizar los golpes se retiró el molde y se volvió a ubicar en el sentido opuesto para aplicarle los 75 golpes en la cara opuesta de la probeta. Cuando se terminó el proceso de compactación, la probeta se dejó en reposo hasta que no se produzca ningún daño al momento de extraerla del molde.

Figura 3. Briquetas



Fuente: Ingeolab, 2020

Cumpliendo el periodo de reposo se determinó la densidad Bulk. Este proceso se inició tomando el peso de cada una de las probetas y luego se sometieron a un baño en agua por 3 minutos, sacándose después y pesándolas, para luego se hizo el peso en el agua.

Por último, se practicó el ensayo para la estabilidad y el flujo que se debió practicar luego de 24 siguientes a la compactación de las probetas. Se colocaron en un baño de agua por 30 minutos a una temperatura de 60 °C; Es importante aclarar que se limpió y lubricó las barras de la mordaza de manera que la mordaza superior se deslizara libremente. Se retiró la probeta del baño de agua y también cualquier exceso de agua con una toalla. Se montaron la mordaza superior con el medidor de deformación, el conjunto se ubicó en la prensa de una manera que este quedará centrado en la prensa, luego se colocaron el medidor de flujo, se ajustaron a cero y se mantuvieron en el vástago firmemente contra la mordaza mientras se aplicaba la carga de ensayo.

Figura 4. Ensayo de estabilidad y flujo



Fuente: Ingeolab, 2020

De igual manera se debió realizar un estudio de agregados para el diseño de mezclas en laboratorio practicando los siguientes ensayos: Gradaciones de sus materiales, peso específico, absorción de agregados gruesos, gravedad específica de agregados finos, equivalente de arena, porcentaje de caras fracturadas, índice de aplanamiento y alargamiento, gravedad específica máxima, masa unitaria suelta y apisonada de agregados, abrasión de agregados en la máquina de los ángeles y producción de agregados y mezcla asfáltica.

Se inició con la gradación del agregado grueso, tomando una cantidad máxima de (10 kg) de grava triturada y se realizó primero con el cuarteo, esto consistió, en colocar la muestra en una superficie limpia, dura y nivelada para mezclarlo y formar una pila cónica con ayuda de una pala o cucharón.

Se aplanó el cono apretándolo con la pala y una vez se logró un espesor uniforme, se cuarteo colocando por diámetros para tener cuatro porciones iguales, en las cuales se descartaron dos diagonalmente opuestas y se repitió el proceso hasta obtener la cantidad de material deseado.

Para este tipo de gradaciones se necesitó una cantidad de material que estuviera aproximadamente entre 5000 gr – 6000 gr. Al finalizar el proceso de cuarteo la mezcla fue pesada y se continuó con el proceso de lavado. Proceso en el cual se usó el tamiz No. 200 para que al momento de lavarse el material más fino quedara retenido en la malla y no se perdiera. Al finalizar el lavado, la muestra fue llevada al horno para su completo secado, y continuar con su respectiva gradación.

6.1.2. Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros (Grano de Caucho sin Cal)

Continuando con la descripción de la metodología y conociendo los procesos principales para la realización de un diseño de mezcla a continuación se desarrolla el diseño de mezclas

asfálticas en caliente en donde se efectuó la incorporación de Grano de Caucho Reciclado (GCR).

Agregados pétreos. La granulometría definida para este diseño fue M-GCR-19. Estos agregados, en conjunto e individualmente deben satisfacer los requisitos de calidad exigidos por la especificación de construcción aplicable. Según la norma INV 467-13, como lo enseña la tabla 3.

Tabla 3. Granulometría para mezclas asfálticas con GCR

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm/U.S. Standard)								
	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.36	0.60	0.30	0.75
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 30	No. 50	No. 200
	% PASA								
M-GCR-25	100	90-100	65-85	50--70	30-45	16-28	6-16	4-12	2-6
M-GCR-19		100	90-100	70-90	35-50	20-32	8-18	5-14	2-6
M-GCR-12			100	90-100	50-65	28-40	18-22	6-16	3-7
TOLERANCIAS EN DORMA DE TRABAJO %			4%				3%		2%

Fuente: Documentos técnicos INVIAS, 2020

NOTA. Es necesario practicar una serie de ensayos a la mezcla asfáltica modificada con polímeros (GCR), para determinar la calidad del asfalto.

Llenante mineral. Este tipo de mezcla (asfalto modificado con grano de caucho), requiere la incorporación de llenante mineral, estos pueden ser cemento hidráulico o cal hidratada. Según la norma INV E-824-13.

NOTA. En este caso la cal es remplazada por (10 %) de arena fina, esto con el fin de conocer su comportamiento.

Gravedad específica. Se requiere conocer la gravedad específica de los agregados (finos y gruesos), este procedimiento se practica cuando a los agregados se les realiza sus respectivos ensayos de verificación y calidad. Todo esto siguiendo la norma INV E-222-13 para los finos – INV E-223-13 para los gruesos.

Es importante tener en cuenta que también se debe practicar la gravedad específica al agregado combinado incluyendo la llenante mineral.

Elaboración de probetas. Se elaboraron 2 juegos de probetas, cada uno con tres especímenes. Estos juegos se conforman de:

- Agregados pétreos.
- Grano de caucho reciclado (GCR).
- Asfalto.

Se elaboraron probetas con diferentes contenidos de asfalto y grano de caucho (GCR), estos contenidos son de 2.0% grano de caucho - 4.0% de asfalto y 3.0% grano de caucho - 5.0 % asfalto, teniendo en cuenta por cada contenido de asfalto que se preparan 3 probetas. La temperatura para la mezcla de agregados más llenante mineral debe ser a una temperatura de 160°C y se mantuvieron hasta el momento de elaboración de la mezcla con el asfalto – caucho.

Es importante mantener la mezcla, asfalto-GCR, en un recipiente con tapa floja por aproximadamente dos horas en el horno a una temperatura de 160 °C, una vez se retiró del horno, se procedió a realizar la mezcla con una espátula de longitud suficiente para alcanzar el fondo del recipiente hasta que las partículas de ligante y caucho quedaran uniformemente distribuidas.

La mezcla de asfalto-caucho y los agregados debieron realizarse rápidamente para lograr el cubrimiento homogéneo.

NOTA. Se observó que si se presenta demora con el mezclado del asfalto-caucho y los agregados se deberán volver a mezclar inmediatamente antes de la incorporación de los agregados.

Cada amasada se colocó sobre una lona y se sometió al proceso de enrollamiento o conocido como el empleando la lona, y se cortaron en 6 segmentos iguales. Cada espécimen se extendió hasta donde fue posible sobre una bandeja evitando en apelmazamiento de las partículas, sometiéndolo luego a hornear por dos horas a una temperatura de 150 °C.

El conjunto de moldes para las probetas, deben calentarse a una temperatura de 160 °C, se procede a armar el conjunto de moldes y antes de agregar la mezcla se ubicaron filtros de papel del tamaño del área interna del molde. Se colocaron la porción de mezcla dentro del molde y se golpearon con una espátula 10 veces alrededor del perímetro y 10 en su interior, donde se redondearon la superficie de la mezcla.

Se llevó el molde con la muestra dentro del horno hasta que esta tuviera una temperatura de 160 °C necesaria para la compactación. Inmediatamente tuvo la apropiada temperatura 160 °C, se acomodaron en el pedestal de compactación y se aplicaron 75 golpes por cada cara con el martillo de compactación.

Se retiraron el collar, la placa de base y los discos de papel. Se volvieron a poner el molde sobre la placa de base, Y se dejaron enfriar en posición vertical hasta que se enfrió lo suficiente para permitir su extracción del molde sin sufrir daño.

Se procedió a medir la altura de cada uno de los especímenes

Figura 5. Proceso de compactación



Fuente: Ingeolab, 2020

NOTA. Es importante aclarar que en caso de la probeta presenta aumento de altura luego de la compactación, se deberá descartar los especímenes con este tipo de asfalto-GCR.

Gravedad Específica Bulk. Para conocer la densidad Bulk, cada una de las probetas se les debe practicarle el siguiente método INV E-733 13.

Este proceso consistió en que los especímenes se pesaran y se sumergieran en un baño de agua por tres minutos, al finalizar este tiempo se retiraron del agua, se secó la superficie con una toalla húmeda para posteriormente volver a pesar, al finalizar con el procedimiento se determinó el peso del espécimen en el aire. Este procedimiento se repitió para cada uno de los métodos estudiados en la investigación.

6.1.3. Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros (Grano de Caucho y Cal)

En este diseño de mezclas asfálticas en caliente se efectuó la incorporación de Grano de Caucho Reciclado (GCR) y cal; para este diseño los agregados pétreos, la llenante mineral y la

gravedad específica se determinan de igual manera que en las mezclas asfálticas con GCR sin cal.

Elaboración de probetas. Se elaboraron 2 juegos de probetas, cada uno con tres especímenes. Estos juegos se conforman de: Agregados pétreos, GCR, asfalto, cal.

Se elaboran probetas con diferentes contenidos de asfalto y GCR, estos contenidos son de (2.0% grano de caucho – 4.0% de asfalto) y (3.0% grano de caucho – 5.0 % asfalto), teniendo en cuenta por cada contenido de asfalto que se preparan 3 probetas. La temperatura para la mezcla de agregados más llenante mineral debe ser a una temperatura de 160°C y se mantiene hasta el momento de elaboración de la mezcla con el asfalto – caucho.

Fue importante mantener la mezcla (asfalto-caucho) en un recipiente con tapa floja por aproximadamente dos horas en el horno a una temperatura de 160 °C, una vez se retiró del horno, se mezcló con una espátula de longitud suficiente para alcanzar el fondo del recipiente hasta que las partículas de ligante y caucho quedaron uniformemente distribuidas.

La mezcla de asfalto-caucho y los agregados se realizaron rápidamente para lograr el cubrimiento homogéneo.

NOTA. Si se presenta demora con el mezclado del asfalto-caucho y los agregados se deberán volver a mezclar inmediatamente antes de la incorporación de los agregados. Y se sigue el mismo procedimiento anterior hasta obtener los resultados que serán presentados en su respectivo capítulo.

6.1.4. Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros (Polipropileno)

En este diseño de mezclas asfálticas en caliente en donde se efectuó la incorporación de Polipropileno (PP).

Agregados pétreos. La granulometría definida para este diseño fue MDC-19. Estos agregados, en conjunto e individualmente deben satisfacer los requisitos de calidad exigidos por la especificación de construcción aplicable. Según la norma INV 467-13. Como lo enseña la tabla 4.

Tabla 4. Granulometría para la Mezcla asfáltica y PP

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm/U.S. Standard)									
		37-5 1 1/2"	25.0 1"	19.0 3/4"	12-0 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.00 No. 10	0.45 No. 40	0.180 No. 80	0.075 No. 200
		% PASA									
DENSA	MDC-25	100	80-95	67-95	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8	
	MDC-19	100	80-95	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8	
	MDC-10	100	80-95	80-95	70-88	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10	
SEMIDENSA	MSC-25	100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7	
	MSC-19	100	80-95	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7	
GRUESA	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25	100	75-95	65-85	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
ALTO MODULO	MAM-25	100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9	
TOLERANCIA EN PRODUCCION SOBRE LA FORMULA DE TRABAJO				4%			3%			2%	

Fuente: Documentos técnicos INVIAS, 2020

NOTA. Es necesario practicar una serie de ensayos a la mezcla asfáltica modificada con polímeros (Polipropileno), para determinar la calidad del asfalto.

Llenante mineral. Este tipo de mezcla (asfalto modificado con polipropileno), requiere la incorporación de llenante mineral, estos pueden ser cemento hidráulico o cal hidratada. En este diseño se optó por usar cemento hidráulico. Según la norma INV E-824-13.

Gravedad específica. Se requiere conocer la gravedad específica de los agregados (finos y gruesos), este procedimiento se practica cuando a los agregados se les realiza sus respectivos ensayos de verificación y calidad. Todo esto siguiendo la norma INV E-222-13 para los finos – INV E-223-13 para los gruesos.

Es importante tener en cuenta que también se debe practicar la gravedad específica al agregado combinado incluyendo la llenante mineral.

Elaboración de probetas. Se elaboraron 2 juegos de probetas, cada uno con tres especímenes. Estos juegos se conforman de: agregados pétreos, PP, asfalto y cal.

Se elaboraron probetas con diferentes contenidos de asfalto y polipropileno (PP), estos contenidos son de (2.0% polipropileno - 4.0% de asfalto) y (3.0% polipropileno - 5.0 % asfalto), teniendo en cuenta que, por cada contenido de asfalto que se debieron preparar 3 probetas. La temperatura para la mezcla de agregados más llenante mineral debieron ser a una temperatura de 160°C y se mantuvieron hasta el momento de elaboración de la mezcla con el polipropileno-asfalto. Es importante mantener la mezcla (polipropileno - asfalto) en un recipiente con tapa floja por aproximadamente dos horas en el horno a una temperatura de 160 °C, una vez retirado del horno, se mezclaron con una espátula de longitud suficiente para alcanzar el fondo del recipiente hasta que las partículas de ligante y polipropileno quedaran uniformemente distribuidas.

La mezclaron de polipropileno-asfalto y los agregados debieron realizarse rápidamente para lograr el cubrimiento homogéneo.

Cada amasada se colocó sobre una lona y se sometieron al proceso de enrollamiento (empleando la lona) y se cortaron en 6 segmentos iguales. Cada espécimen se extendió hasta donde sea posible sobre una bandeja evitando el apelmazamiento de las partículas y se sometieron al horneado por dos horas a una temperatura de 150 °C.

El conjunto de moldes para las probetas, debieron calentarse a una temperatura de 160 °C, se procedió a armar el conjunto de moldes y antes de agregar la mezcla, se ubicaron filtros de papel del tamaño del área interna del molde. Se colocaron la porción de mezcla dentro del molde y se golpearon con una espátula 10 veces alrededor del perímetro y 10 en su interior, donde luego se redondeó la superficie de la mezcla.

Se llevó el molde con la muestra dentro del horno hasta que esta tuviera una temperatura de 160 °C necesaria para la compactación. Inmediatamente tuviera su apropiada temperatura 160 °C se acomodó en el pedestal de compactación y se aplican 75 golpes por cada cara con el martillo de compactación. Se retiró el collar, la placa de base y los discos de papel. Se volvió a poner el molde sobre la placa de base, cada una de las probetas se dejó enfriar en posición vertical hasta que se enfrió lo suficiente para permitir su extracción del molde sin sufrir daño y se procedió a medir la altura de cada uno de los especímenes.

Figura 6. Briquetas con PP



Fuente: Ingeolab, 2020

Gravedad Específica Bulk. Para conocer la densidad Bulk, cada una de las probetas se les debió practicar el siguiente método INV E-733 13.

Consistió en que los especímenes se pesaran y se sumergieran en un baño de agua por tres minutos, al finalizar este tiempo se retiraron del agua, se secó la superficie con una toalla húmeda para posteriormente volver a pesar, para finalizar con el procedimiento se determinó el peso del espécimen en el aire.

Cabe resaltar que a cada una de las mezclas realizadas se les efectuaron los ensayos de estabilidad y flujo de acuerdo a la normal INV E 748-13, ella dice que para conocer la estabilidad y flujo en ensayo se debe realizar dentro de las 24 horas siguientes a la compactación. Se colocaron las probetas en un baño de agua por 30 minutos, a una temperatura de 60 °C. Al finalizar el tiempo de baño, la briqueta se retiró y se secó para eliminar el exceso de agua con una toalla y se ubicó en la mordaza inferior; se montó la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se situó centrado sobre la prensa, se ajustó el medidor de funjo en cero. Se aplicó la carga sobre la probeta con la prensa hasta que ocurriera la falla.

Con el fin de analizar cada uno de los resultados obtenidos a continuación se describió los datos arrojados para cada una de las mezclas asfálticas diseñadas.

6.2. Datos numéricos de la Mezcla Asfáltica con GCR Sin Cal

Las Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8 muestran los resultados obtenidos para la mezcla asfáltica con GCR sin cal se la siguiente manera:

Tabla 5. Briqueta GCR sin cal.

No. MUESTRA	% GCR	% ASFALTO	ESPESOR BRIQUETA (mm)	PESO MUESTRA SOLA (AIRE)	PESO MUESTRA SSS	PESO MUESTRA EN EL AGUA
1	2	4	60 mm	1145 gr	1150 gr	647,6 gr
2	2	4	63 mm	1216 gr	1225 gr	690,3 gr
3	2	4	63 mm	1140 gr	1150 gr	630,3 gr
4	3	5	67 mm	1080 gr	1085 gr	581,4 gr
5	3	5	65 mm	1220 gr	1230 gr	674,4 gr
6	3	5	67 mm	1170 gr	1180 gr	651 gr

Fuente: Elaboración propia, 2021

Inicialmente se calculó la gravedad específica Bulk; Tabla 6; dada por la siguiente ecuación:

$$\text{GRAVEDAD ESPECIFICA BULK} = (A/(B-C))$$

A: Masa del espécimen seco.

B: Masa del espécimen saturado.

C: Masa del espécimen sumergido en el agua.

Tabla 6. Gravedad específica Bulk.

No. Muestra.	Gravedad Especifica Bulk
1	2,279 gr
2	2,274 gr
3	2,194 gr
4	2,145 gr
5	2,196 gr
6	2,212 gr

Fuente: Elaboración propia, 2021

Posteriormente se calculó la densidad del espécimen. Donde $DENSIDAD = Gravedad$ específica Bulk x 997.0. Tabla 7.

Tabla 7. Densidad del espécimen

No. Muestra	Densidad del espécimen
1	2272
2	2267
3	2187
4	2138
5	2189
6	2205

Fuente: Elaboración propia, 2021

Finalmente se calculó el porcentaje de agua absorbida. Tabla 8.

$$PORCENTAJE DE AGUA ABSORBIDA = (B-A) / (B-C) \times 100$$

Tabla 8. Porcentaje de agua absorbida

No. Muestra	% Agua absorbida
1	1,0
2	1,7
3	1,9
4	1,0
5	1,8
6	1,9

Fuente: Elaboración propia, 2021

NOTA. Se debe tener en cuenta que el porcentaje de absorción no debe superar más de 2% ya que si esto ocurre es necesario determinar la gravedad específica con las normas INV E 734-13 o INV E 802-13.

6.2.1. Resultados del ensayo de flujo y estabilidad para briquetas con GCR sin Cal

En la Figura 7 se encuentra evidencia fotográfica de los ensayos de estabilidad y flujo para este tipo ensayos, de igual manera que en la Tabla 9 se muestran sus resultados.

Figura 7. Ensayos de estabilidad y flujo



Fuente: Ingeolab, 2020

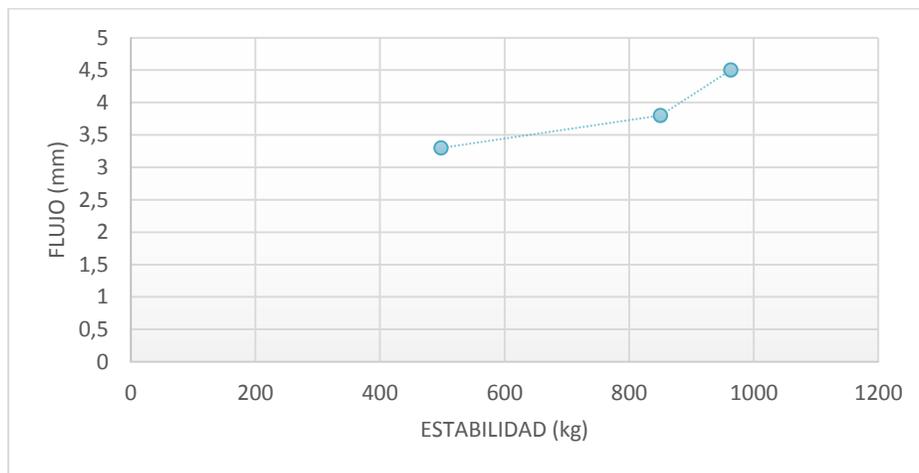
Tabla 9. Estabilidad y flujo

No. MUESTRA	ESTABILIDAD (kg)	FLUJO (mm)
1	963	4,5
2	850	3,8
3	498	3,3
4	1105	4,5
5	581	4,4
6	561	4,3

Fuente: Elaboración propia, 2021

En las figuras: figura 8, figura 9, figura 11, figura 12, figura 14 y figura 15 se observó el comportamiento estabilidad vs flujo de cada uno de los especímenes o briquetas estudiadas; cabe resaltar que los resultados aquí evaluados fueron los obtenidos a partir del desarrollo de las los ensayos con la mezcla asfáltica modificada con GCR y llenante mineral 10% de arena fina.

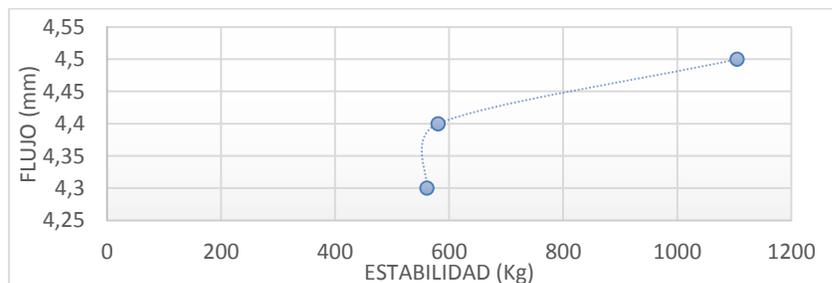
Figura 8. Briqueta No. 1, 2,3 con 2% (GCR) y 4% de asfalto



Fuente: Elaboración propia, 2021

Para las briquetas de 2% GCR y 4% de asfalto la gráfica 8 reflejó que la carga máxima que soporta son 963 kg con 4,5mm punto en el cual el espécimen tiende a fragmentarse.

Figura 9. Briqueta No. 4, 5,6, con 3% (GCR) y 5% de asfalto



Fuente: Elaboración propia, 2021

El comportamiento de las briquetas con 3% de GCR y 5 % de asfalto, obteniendo como resultado significativo una carga máxima de 1105 kg a 4,5 mm.

6.3. Resultados para la Mezcla Asfáltica Con GCR con Cal

La Tabla 10 muestra las briquetas con GCR con cal especificando su espesor, peso solo de la muestra, peso de la muestra saturada y peso de la muestra con agua. De igual manera las Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13 muestran los resultados para este tipo de mezcla.

Tabla 10. Briquetas GCR y Cal

No. MUESTRA	% GCR	% ASFALTO	ESPESOR BRIQUETA (mm)	PESO MUESTRA SOLA (AIRE)	PESO MUESTRA SATURADA	PESO MUESTRA EN EL AGUA
1	2	4	60 mm	1135 gr	1145 gr	656,8 gr
2	2	4	60 mm	1045 gr	1050 gr	604,2 gr
3	2	4	60 mm	1155 gr	1160 gr	663,6 gr
4	3	5	65 mm	1190 gr	1195 gr	684,5 gr
5	3	5	60 mm	1155 gr	1160 gr	670,2 gr
6	3	5	65 mm	1205 gr	1215 gr	697 gr

Fuente: Elaboración propia, 2021

Se calcula la gravedad específica Bulk.

$$GRAVEDAD\ ESPECIFICA\ BULK = (A / (B - C))$$

A: Masa del espécimen seco.

B: Masa del espécimen saturado.

C: Masa del espécimen sumergido en el agua.

Tabla 11. Gravedad específica Briquetas con GCR y Cal

No. Muestra.	Gravedad Especifica Bulk
1	2,325 gr
2	2,344 gr
3	2,327 gr
4	2,331 gr
5	2,358 gr
6	2,326 gr

Fuente: Elaboración propia, 2021

Luego se calculó la densidad del espécimen, mediante la siguiente ecuación

$$DENSIDAD= Gravedad\ especifica\ Bulk\ x\ 997.0.$$

Tabla 12. Densidad del espécimen Briquetas con GCR y cal

No. Muestra.	Densidad del espécimen
1	2318
2	2336
3	2320
4	2324
5	2350
6	2319

Fuente: Elaboración propia, 2021

Con la siguiente ecuación se determinó el porcentaje de agua absorbida

$$PORCENTAJE\ DE\ AGUA\ ABSORBIDA= (B-A) / (B-C) \times 100$$

Tabla 13. Agua absorbida Briquetas con GCR y Cal

No. Muestra	% agua absorbida
1	2,0
2	1,1
3	1,0
4	1,0
5	1,0
6	1,9

Fuente: Elaboración propia, 2021

NOTA. Se debe tener en cuenta que el porcentaje de absorción no debe superar más del 2% ya que si esto ocurre es necesario determinar la gravedad específica con las normas INV E 734-13 o INV E 802-13.

6.3.1. Resultados del ensayo de flujo y estabilidad para briquetas con GCR y Cal.

La Figura 10 y Tabla 14 muestran los resultados de los ensayos de estabilidad y flujo para las briquetas con GCR y cal

Figura 10. Ensayos de estabilidad y flujo



Fuente: Ingeolab, 2020

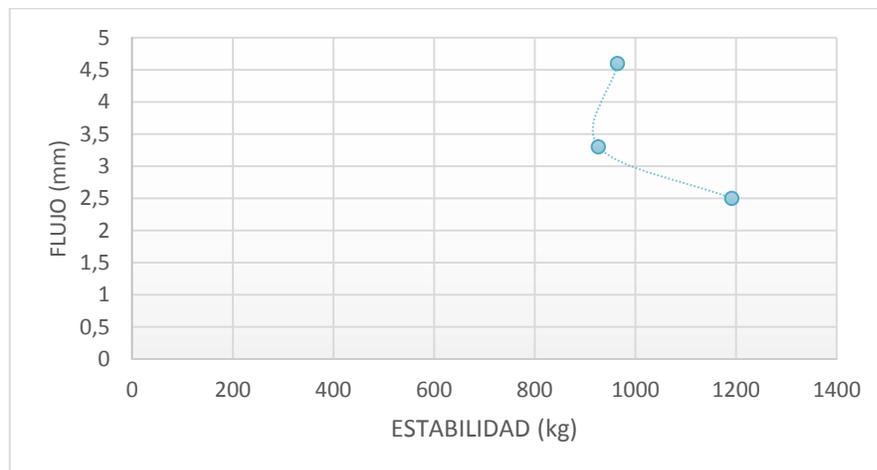
Tabla 14. Estabilidad y Flujo

No. MUESTRA	ESTABILIDAD (kg)	FLUJO (mm)
1	1192	2,5
2	927	3,3
3	965	4,6
4	855	3,8
5	884	3,0
6	939	3,3

Fuente: Elaboración propia, 2021

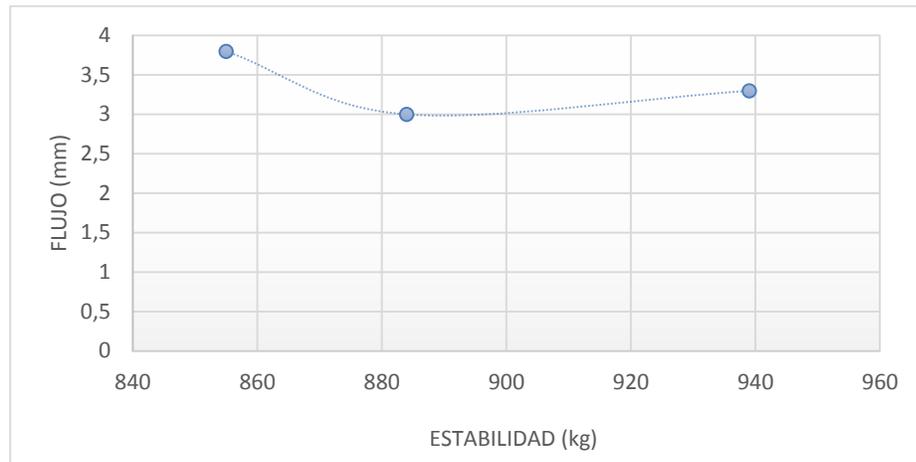
A continuación, se observó el comportamiento estabilidad flujo de cada uno de los especímenes Figura 11 y Figura 12.

Figura 11. Briquetas No. 1, 2,3 con 2% (GCR) y 4% de asfalto.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 12. Briquetas No. 4, 5,6 con 3% (GCR) y 5% de asfalto.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Una vez representados los resultados de estabilidad y flujo obtenidos de las briquetas con 2% de GCR y 4% de asfalto, se determinó que existe una estabilidad que va de la mano con el flujo máximo de 1192 kg a 2,5 mm. Por otra parte, las briquetas con 3% de GCR y 5% de asfalto soportaron una carga máxima de 939 kg a un flujo de 3,3 mm. Cabe resaltar que los porcentajes de asfalto y polímeros (GCR, cal y PP) fueron tomados de acuerdo a la experiencia del laboratorio contratado.

6.4. Resultados para la Mezcla Asfáltica con Polipropileno (PP)

De la misma manera que con los ensayos anteriores se describieron los resultados de los ensayos entre la mezcla asfáltica y polipropileno PP, como lo muestra la tabla 15, de igual forma la Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 muestran los resultados obtenidos para el tipo de mezcla estudiada en esta parte del documento.

Tabla 15. briquetas con polipropileno

No. Muestra	% PP	% Asfalto	Espesor Briqueta (mm)	Peso Muestra Sola (Aire)	Peso Muestra SSS	Peso Muestra En El Agua
1	2	4	60	1070 gr	1075 gr	607,9 gr
2	2	4	60	1005 gr	1010 gr	568,3 gr
3	2	4	65	1215 gr	1220 gr	602,4 gr
4	3	5	64	1140 gr	1145 gr	690,7 gr
5	3	5	60	1125 gr	1130 gr	646,9 gr
6	3	5	60	1090 gr	1095 gr	619,7 gr

Fuente: Elaboración propia, 2021

Se calcula la gravedad específica Bulk.

$$GRAVEDAD ESPECIFICA BULK = (A/(B-C))$$

A: Masa del espécimen seco.

B: Masa del espécimen saturado.

C: Masa del espécimen sumergido en el agua.

Tabla 16. Gravedad específica Briquetas con PP

No. Muestra.	Gravedad Especifica Bulk
1	2,291 gr
2	2,275 gr
3	1,967 gr
4	2,509 gr
5	2,329 gr
6	2,293 gr

Fuente: Elaboración propia, 2021

$$DENSIDAD= Gravedad\ especifica\ bulk\ x\ 997.0.$$

Tabla 17. Densidad del espécimen briquetas con PP

No. Muestra.	Densidad del espécimen
1	2284
2	2268
3	1961
4	2502
5	2322
6	2286

Fuente: Elaboración propia, 2021

$$PORCENTAJE\ DE\ AGUA\ ABSORBIDA= (B-A)/(B-C)\ X100$$

Tabla 18. Porcentaje de agua absorbida

No. Muestra	% agua absorbida
1	1,1
2	1,1
3	0,8
4	1,1
5	1,0
6	1,1

Fuente: Elaboración propia, 2021

NOTA. Se debe tener en cuenta que el porcentaje de absorción no debe superar más de 2% ya que si esto ocurre es necesario determinar la gravedad específica con las normas INV E 734-13 o INV E 802-13.

6.4.1. Resultados del ensayo de flujo y estabilidad para Mezcla Asfáltica con Polipropileno (PP)

Las Figura 13, Figura 14, Figura 15 se evidencias los resultados de los ensayos realizado para las mezclas asfálticas con PP

Figura 13. Ensayo de estabilidad y flujo



Fuente: Ingeolab, 2020

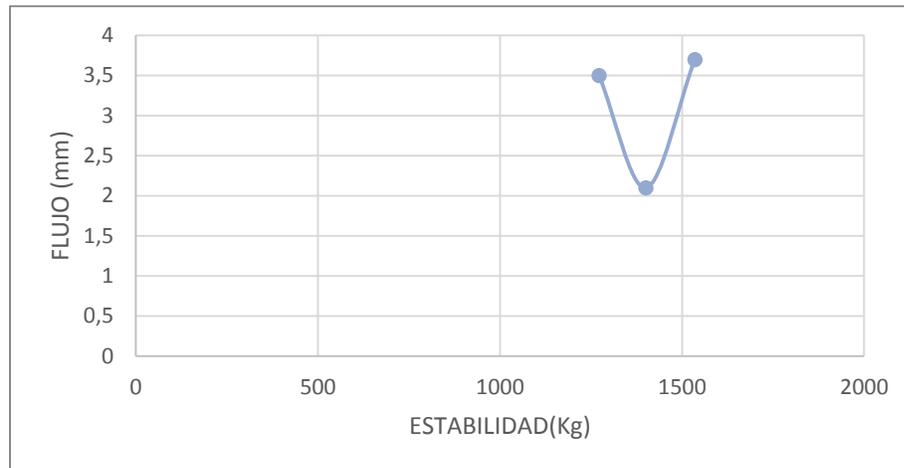
En las siguientes tablas (Tabla 19 y Tabla 20) se puede observar el comportamiento estabilidad flujo de cada uno de los especímenes.

Tabla 19. Resultados Estabilidad Vs Flujo

No. MUESTRA	ESTABILIDAD (kg)	FLUJO (mm)
1	1535	3,7
2	1401	2,1
3	1272	3,5
4	2470	2,7
5	2313	2,2
6	2367	2,1

Fuente: Elaboración propia, 202

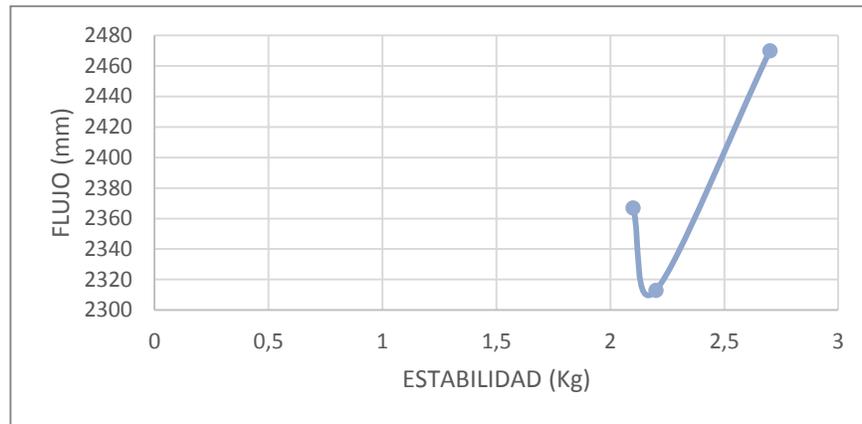
Figura 14. Briquetas No. 1, 2,3 con 2% de polipropileno y 4% de asfalto.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Como se puede observar el punto de máxima carga para las briquetas con 2% de pp y 4% de asfalto sería 1535 kg a 3,7 mm, encontrando valores elevados como 1401 kg a 2,1 mm y 1272 kg a 3,5 mm. Por su parte los resultados determinan que en las tres briquetas estudiadas con 2% de pp y 4% de asfalto la máxima carga que soportó previo a la deformación alcanzó una estabilidad flujo de 2470 kg a 2,7mm, las otras dos alcanzaron resultados muy cercanos a 2,1 mm y 2,22mm a 2367 kg y 2313 kg respectivamente.

Figura 15. Briquetas No. 4, 5,6, con 2% de polipropileno y 4% de asfalto.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Posterior a lo anterior, se analizaron los resultados que fueron expuestos; En los ensayos ejecutados se pudo observar que las briquetas elaboradas con grano de GRC tienden a recuperar siempre su forma inicial, teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas (flexibilidad y recuperación), al ser sometidas a la manipulación por las cargas a las que se someten. De igual manera se evidencia que las briquetas elaboradas con PP tienen una propiedad de resistencia a la fragmentación en los especímenes por ende pierden su forma y tienden a fisurarse (1272kg/mm a 2528 kg/mm) en este rango actúa su deformación total. Una vez ejecutados los ensayos a las briquetas con PP a 160°C, se observan derretir con facilidad, perdiendo su forma y textura, su color sigue siendo el mismo (Rojo), una vez se enfría endurece y pierde mucho porcentaje de rigidez y durabilidad (tendiendo a fisurarse y encontrar la falla), finalmente sobre el polipropileno es conveniente referenciar que este material al ser dejado en reposo fuera del horno el tiempo para su manejo es muy corto, se seca muy rápido y cambia de estado.

En relación al GCR y los ensayos en el laboratorio a 160°C, a esta temperatura el GCR se pueden considerar dos opciones, en asfalto o en emulsión asfáltica, debido al comportamiento

homogéneo, lo que lo hace conveniente a la modelación de las briquetas. Lo anterior se presenta debido a que el GRC al calentarse disminuye su volumen ostensiblemente formando una mezcla homogénea, de forma tal que en el ensayo realizado fue posible combinar asfalto y GRC para las briquetas; la estabilidad y flujo de dichas briquetas es apta de acuerdo a la norma INV-13, la cual estipula que deben estar entre 200kg/mm y 400kg/mm, no obstante las briquetas con PP reflejaron estabilidad y flujo muy altas; en la siguiente tabla se observan los resultados por cada uno de los ensayos.

Tabla 20. Estabilidad Flujo de las Briquetas

BRIQUETAS GCR	BRIQUETAS GCR SIN CAL	BRIQUETAS PP	%
297 kg/mm	208 kg/mm		GCR 6%
265 kg/mm	160 kg/mm		GCR 8%
		477 kg/mm	PP 6%
		1080 kg/mm	PP 8%

Fuente: Elaboración propia, 2021

7. Conclusiones

En los ensayos ejecutados se pudo observar que las briquetas elaboradas con GRC tendieron a recuperar siempre su forma inicial, teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas, como son la flexibilidad y la recuperación, al ser sometidas a la manipulación por las cargas a las que se someten. De igual manera se evidenció que las briquetas elaboradas con PP tienen una propiedad de resistencia a la fragmentación en los especímenes por ende perdieron su forma, con una deformación de un rango que iba desde 1272 kg/mm a 2528 kg/mm,

En cuanto al uso de los materiales poliméricos en la pavimentación, se pudo afirmar que, a nivel local, la ciudad sigue creciendo a un ritmo acelerado, y las últimas administraciones públicas han ido mejorando en la mejora de la malla vial. Por este motivo el asfalto es y seguirá siendo muy empleado. En el mismo sentido, la producción deliberada de polímeros que con su uso son desechados y teniendo en cuenta que en proporciones de 6% y 8% de estos polímeros reciclados garantizaron un comportamiento aceptable ante la norma INV-13.

De acuerdo a lo arrojado en la investigación, para las briquetas de 2% GCR y 4% de asfalto reflejó que la carga máxima que soporta son 963 kg con 4,5 mm punto en el cual el espécimen tiende a fragmentarse, identificando comportamientos en las briquetas con 3% de GCR y 5 % de asfalto, obteniendo resultados significativos de una carga máxima que iba desde 1105 kg a 4,5 mm. Una vez representados los resultados de estabilidad y flujo obtenidos de las briquetas con 2% de GCR y 4% de asfalto, se determinó que existe una estabilidad que va de la mano con el flujo máximo de 1192 kg a 2,5 mm. Por otra parte, las briquetas con 3% de GCR y 5% de asfalto soportaron una carga máxima de 939 kg a un flujo de 3,3 mm.

Se evidencia que el GCR y el PP en las proporciones utilizadas 6% y 8% contribuyen al asfalto permitiéndole cumplir con las norma INV-13, lo que permite afirmar que este es una reutilización aplicable y aceptable. De acuerdo a lo anterior se sugiere articular las normas del INVIAS para incentivar y promover el uso de este tipo de residuos en los procesos de pavimentación, contribuyendo con el medio ambiente y generando alternativas de producción limpia.

Adicionalmente se pudo observar como en la ciudad no se realiza un aprovechamiento efectivo de los residuos poliméricos, según cifras del PGIRS llegan cerca de 32 toneladas al mes al relleno sanitario; si esto se relaciona con el 6% y 8% que puede ser aprovechable en este tipo de asfaltos modificados, se tiene que se esta desaprovechando una excelente oportunidad de negocio amigable con el medio ambiente.

Una vez culminada la investigación se puede concluir que se abarcó un tema con mucha información al respecto, pero poco estudio y profundización en el mismo; el cual propone una excelente alternativa, amigable con el medio ambiente y la cual al ser evaluada económica y financieramente, puede resolver los problemas de ambientales que causa el corto ciclo de vida útil de los productos poliméricos y adicionalmente brindaría una solución a los atrasos en la malla vial existente en la mayoría de las ciudades del país.

8. Referencias

- Alcaldía de Neiva. (2013). Reformulación del plan de gestión integral de residuos sólidos. Neiva.
- Altadill Colominas, R. e. (2009). Reciclaje de residuos industriales. *KuxulKab 23(46)*, 25-27.
- Anderson, K. e. (2008). Evaluation of long-term pavement performance and noise characteristics of open-graded friction courses. *Post Construction and Performance Report, Experimental Feature WA*.
- Aristizabal Martelo, H. L. (18 de 11 de 2015). Transformación de algunos polímeros comunes; Reciclaje y reutilización de chicles. Neiva, Huila, Colombia: Corporación Universitaria Minuto de Dios UNIMINUTO.
- Artículo.414. (2012). Suministro de cemento asfáltico modificado con polímeros-INVIAS.
- Bahia, H. &. (1994). Effect of crumb rubber modifiers CRM on performance-related properties of asphalt binders. *J. Assoc. Asph. Paving Technol.* 63, 414-449.
- Ballou, R. H. (1993). *Logística empresarial: transportes*. Sao Paulo: Atlas: administração de materiais e distribuição física.
- Cerda, H. (2000). *Los elementos de la investigación*. Colombia: Editorial Magisterio.
- Choubane, B. e. (1999). Evaluación de rendimiento de diez años de mezclas de superficie de asfalto y caucho. *Journal of the Transportation Research Board Vol. 1681 Núm 1*, 10-18.
- Cooper, S. J. (2007). Evaluation of field projects using crumb rubber modified asphaltic concrete. . *Report No. FHWA/LA.04/393, LTRC. Louisiana: Louisiana State University*.
- De Saja Saez, J. e. (2015). *Materiales. Estructura, propiedades y aplicaciones*. Mexico: Paraninfo.

Diario del Huila. (22 de diciembre de 2015). Relleno sanitario de Neiva colapsará en 5 años. Neiva, Huila, Colombia.

Dong, Y. &. (2011). Mix design and performance of crumb rubber modified asphalt SMA. *Geotechnical Special Publication, 212, ASCE, 78-86.*

Editorial Televisa S.A. (2015). ¡Pavimento a base de plástico reciclado! *Muy interesante, 35.*

Figuroa Infante, A. S. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Ingeniería e Investigación, vol. 27, núm. 3, 5-15.*

Hernandez Acosta, L. E. (2017). Mezclas Asfálticas: una alternativa para el tratamiento de residuos. *KuxulKab'23 (46), 23-28.*

Hsu, T. e. (2011). Performance evaluation of asphalt rubber in porous asphalt-concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering, 23(3), 342-349.*

Huang, L. &. (s.f.). Characterization of aging effect on rheological properties of asphalt filler systems. *asphalt filler systems.*

Huang, L. Z. (2007). Characterization of aging effect on rheological properties of asphalt filler systems. *International Journal of Pavement Engineering, 8 (3), 213-223.*

Huang, S. (2008). Rubber concentrations on rheology of aged asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering, 20(3), 221-229.*

Jang, B. (1992). *Composicion avanzada de polimeros.*

Jang, B. e. (1992). Comportamiento de impacto y pruebas de fatiga por impacto de compuestos poliméricos. *Ciencia y Tecnología de Composites Vol. 4, Núm. 2, 107-118.*

- Khodary, H. (2010). *Evaluation of Fatigue Resistance for Modified Asphalt Concrete Mixtures Based on Dissipated Energy Concept*. Darmstadt, Alemania: Universidad Técnica de Darmstadt, Alemania.
- Kumar, P. e. (2010). Comparative study of rheological behavior of modified binders for high-temperature areas. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(10), 978-984.
- La Nacion. (30 de Julio de 2015). Problemas de Neiva: Inseguridad, desempleo y malla vial. Neiva, Huila, Colombia.
- Lee, J. e. (2007). Laboratory study on the effects of compaction on the volumetric and rutting properties of CRM asphalt mixtures. . *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(12),, 1079-1089.
- Luque Ariza, H., & Rincón Solano, A. J. (2011). *Evaluacion de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad*.
- Martinez, R. E. (2003). EMPLEO DEL POLIMERO SBR EN LA FABRICACION DE MEZCLAS ASFAL TICAS PARA ZONAS DE ALTURA. *EMPLEO DEL POLIMERO SBR EN LA FABRICACION DE MEZCLAS ASFAL TICAS PARA ZONAS DE ALTURA*. LIMA, PERU.
- Morea, F. (2011 de septiembre de 2011). Mezclas asfálticas. *Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga*. La plata: universidad nacional de la plata.
- Oda, S. &. (2002). *Viabilidad Técnica de Usar Caucho de Neumático Como Material de Pavimentación Asfáltica*. Brasil: Universidad Estadual de Maringá.
- Odian, G. (1991). Principles of polymerization. 3rd ed. *Nova York: John Wiley & Sons Inc.*, 768 p.
- Odian, G. (1991). *Principios de polimerizacion*. New York: JOHN WILEY & SONS, INC.

- Ordoñez Cetina, K. S., & Parra Velandia, V. J. (2017). *Infraestructura de transporte vial : un factor de atraso para la competitividad de Colombia en la Alianza Pacífico*. Recuperado el 14 de junio de 2018, de Universidad de Lasalle: <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/21301>
- Othman, A. (2006). Fracture resistance of rubber-modified asphaltic mixtures exposed to high-temperature cyclic aging. *Journal of Elastomers and Plastics*, 38, 19-30.
- Peralta, J. e. (2010). Changes in rubber due to its interaction with bitumen when producing asphalt rubber. *Road Materials and Pavement Design*, 11(4), 1009-1031.
- Pérez, M. L. (2012). Estado del conocimiento de asfaltos modificados en Colombia y su influencia en la pavimentación. *Revista virtual de los programas de ingeniería*. 4(6), 89-105.
- Perez, M., & Lopez, J. (2012). ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE ASFALTOS MODIFICADOS EN COLOMBIA Y SU INFLUENCIA EN LA PAVIMENTACION. *REVISTA VIRTUAL DE LOS PROGRAMAS DE INGENIERÍA | UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA*, 89 - 105.
- Punith, V. e. (2011). Effects of moist aggregates on the performance of warm mix asphalt mixtures containing non-foaming additives. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(5), 1-11.
- Punith, V. S. (2012). Laboratory investigation of open-graded friction course mixtures containing polymers and cellulose fibers. *Journal of Transportation Engineering*, 138(1), 67-74.
- Putman, B. (2005). *Qualification of the effects of crumb rubber in CRM binder*. Ph.D. Disertación. Carolina del Sur, EE.UU. Carolina del Sur, EE.UU: Clemson University.
- Ramírez Jiménez, L. (2011). *PAVIMENTOS CON POLÍMEROS RECICLADOS*. ENVIGADO, ANTIOQUIA: ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA.
- Ramirez, L. (2011). *Pavimento con Polimeros*. Envigado: Escuela de Ingenieria de Antioquia.

- Reyes Lizcano, F. A., & Reyes Ortiz, O. J. (07 de 10 de 2010). *the national academies of sciences engineering medicine*. Recuperado el 03 de 12 de 2015, de transportation research board:
<http://trid.trb.org/view.aspx?id=964342>
- Ribeiro, A. y. (2011). Space, development and accessibility between Portugal and Spain: the last frontier. *Revista Portuguesa de Estudos Regionais, vol 27, 7-14.*
- Rodriguez Gallego, K. L. (2005). *Mejora de una mezcla asfaltica drenante con adición de caucho e icopor*. Bogota D.C.
- Rondón Quintana, H. A. (2008). Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en colombia. *Infraestructura Vial digital, Vol 10 NÚM. 19, 10-20.*
- Rondon Quintana, H. A. (2014). Resistencia mecánica de un asfalto de mezcla caliente químicamente modificado. *Tecnura Special Edition Doctorate Vol. 18.*
- Sanchez Gonzales, A. (2005). *Asfaltos modificados (Conceptualización, aplicación, control y pruebas*. Quintana Roo, Mexico: Secretaría de la contraloria Quintana Roo, (pág. 52).
- Vinueza Elizalde, C. (2014). *METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MICROPAVIMENTO DE BAJO COSTO PARA SUELO TIPO LIMO ORGÁNICO ARENOSO (OL)*. SANGOLQUÍ, ECUADOR: UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS.
- Wang, J. &. (2006). Influence of temperature and pressure on the dynamic properties of rubber-modified asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering, 18(1), 125-131.*
- Wang, L. e. (2009). Viscoelastic mechanical properties of crumb rubber modified asphalt mixture. En: ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation Systems Planning,. *Development, and Management, ASCE, 2153-2158.*

Xiao, F. &. (2009). HP-GPC Approach to evaluating laboratory prepared long-term aged rubberized asphalt binders. *GeoHunan International Conference 2009, Geotechnical Special Publication, 191*, 42-48.

Yepes, T. e. (2013). *INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE EN COLOMBIA: Executive Summary in English*. Colombia: Cuadernos de Fedesarrollo, Numero Cuarenta y Seis.

Yung V., Y. e. (2016). Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR). *Tecnura vol.20 no.50 Bogotá*, 106-118.