

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

STUDY OF THE PHYSICAL-MECHANICAL BEHAVIOR OF A MODIFIED ASPHALT MIXTURE WITH NYLON WASTE AND FLYING ASH

Juan Camilo Castillo Rojas

Estudiante de Ingeniería Civil, juan.castillor@usantotomas.edu.co

Jessica María Ramírez Cuello

Magister en Ingeniería Civil, docente, jessicaramirezcc@usantotomas.edu.co

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

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

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

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

As a result, the modification with fly ash improves the stability of the mixture and reduces the percentage of voids. Regarding nylon, unfavorable data were generated due to the size of the fibers used.

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

1. INTRODUCCIÓN

A nivel nacional, el diseño, implementación y construcción de pavimentos flexibles es la alternativa más económica de pavimentación, sin embargo, estas obras han sufrido inconvenientes y fallas que han generado una disminución considerable en su efectividad y durabilidad, obligando a realizar más mantenimientos, lo que restringe su uso y genera incomodidad en los usuarios que las transitan estas vías [1]

Por esto, el comportamiento que experimentan las mezclas asfálticas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente, se ha intentado modificar a lo largo del tiempo, con la adición de polímeros u otros materiales. Generalmente, las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez y la resistencia bajo carga monotónica, el ahuellamiento, la fatiga y el envejecimiento, así como disminuir la susceptibilidad térmica y aumentar la vida útil del pavimento o espesores más delgados de capas asfálticas de lo que normalmente se requiere.[2]

La producción de ceniza volantes a nivel nacional e internacional provenientes principalmente de las termoeléctricas, en su mayoría terminan enterradas en vertederos generando graves afectaciones a los acuíferos subterráneos y al medio ambiente, así mismo, las fibras sintéticas como el nylon que son altamente resistentes a la degradación del entorno y actualmente es catalogado como desecho no reciclable por lo que va a dar directamente a los rellenos sanitarios. Por esto, las cenizas volantes se han implementado en diversas obras de ingeniería civil, principalmente como adición al concreto y estabilización de capas granulares, pero no se ha profundizado su aplicación en mezclas asfálticas [1].

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

2. METODOLOGÍA

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

- Preliminares: revisión bibliográfica y definir porcentajes de modificación.
- Etapa I: Identificación de proveedores, obtención de materiales y caracterización de los materiales.
- Etapa II: Modificación de la mezcla asfáltica.
- Etapa III: Diseño de mezcla por el método Marshall.
- Etapa IV: Análisis y comparación de los resultados obtenidos.

Tabla 1 Relación de objetivos con las etapas metodológicas

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

2.1 Preliminares

Se hizo una recopilación y revisión de investigaciones en las cuales se usaron desechos o posibles materiales contaminantes para la modificación de las mezclas asfálticas. A continuación, en la Tabla 2 se presenta un

resumen de dicha recopilación en orden cronológico, la universidad donde se realizó la investigación, el material usado para la modificación y los resultados.

Tabla 2 Revisión bibliográfica

Revisión bibliográfica de investigaciones en las cuales se usaron desechos o posibles materiales contaminantes en la modificación de mezclas asfálticas				
Año	Nombre de la Investigación	Autores	Material modificante	Resultados
2011	Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza provenientes de locaciones petroleras	Guillermo Orozco & Juan Murillo	Ceniza volante	Con 15% de ceniza y 4.5% de asfalto se aumentó la estabilidad en un 22% con respecto a la mezcla sin ceniza.
2013	Determinación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo 2 utilizando ceniza como una proporción del agregado fino y como llenante	Luis Aguilar & Edward Ayala	Ceniza volante	Con 4.5% de asfalto y 30% de ceniza el aumento de la estabilidad con respecto a la mezcla sin ceniza es de más del 100%. El flujo de la mezcla en ambos casos casi no presenta variación.
2014	Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos	José Forigua Orjuela & Elkin Pedraza Díaz	Trozos de bolsas plásticas	Con 0.4% de desperdicios plásticos se obtiene una mejora significativa en las propiedades de la mezcla asfáltica.
2015	Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente Modificadas con Elastómero (caucho) y Tereftalato de Polietileno reciclados con Ligante Asfáltico AC-20	Patricio Romero, Hugo Bonifaz & Mary Revelo	Caucho y Tereftalato de Polietileno (PET)	Con un 7.5% de elastómero caucho la mezcla mostro una mejora en la estabilidad y para el caso del PET se recomienda solo en vías de tráfico liviano.
2016	Caracterización mecánica de una mezcla asfáltica modificada con fibras sintéticas	Juan Diego Vanegas Miranda	Fibras sintéticas de nylon y polipropileno	Con 0.15% de nylon se mejora en un 18% la relación esfuerzo deformación y la resistencia a la fatiga. Con 0.15% de fibra de polipropileno se mejora la relación esfuerzo – deformación en un 10%.
2017	Estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: caso de estudio universidades de Bogotá D.C.	Cristian mejía Umbarila & Cristian Sierra Hernández	Caucho, Polietileno, Polietileno de baja densidad y polipropileno	El caucho como modificador en la mezcla asfáltica mejora la resistencia y reduce el agrietamiento por fatiga, con el polietileno y polietileno de baja densidad se mejora la rigidez de la mezcla y con el uso del polipropileno se mejora la resistencia al ahuellamiento de la mezcla asfáltica.

Revisión bibliográfica de investigaciones en las cuales se usaron desechos o posibles materiales contaminantes en la modificación de mezclas asfálticas					
Año	Nombre de la Investigación	Autores	Material modificante	Resultados	
2019	Resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica en caliente con adición de un 10% por ceniza volantes de carbón mineral	Joan Gerardo Rosales Lecca	Ceniza volante	Para un porcentaje de asfalto del 5% y 10% de ceniza volante el aumento de la estabilidad en la mezcla asfáltica fue de un 11% y el flujo aumento un 18%.	
2020	Estudio del comportamiento fisico-mecánico de mezclas asfálticas modificadas con llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz	Omar Lizcano Garzón & Deyber Ramos Félix	Ceniza de la molienda de cascarilla de arroz	Con el uso de la ceniza procedente de la molienda de la cascarilla de arroz como modificador de la mezcla asfáltica se evidencia un aumento del 12% en la resistencia de la mezcla.	

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

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

- Contenido óptimo de asfalto: de acuerdo con las investigaciones revisadas este contenido optimo mayormente se encuentra entre 5% y 6% para un asfalto 60/70.
- Ceniza volante: de las investigaciones revisadas los porcentajes de ceniza volante con los que se obtenían los mejores resultados eran 10, 15% y 30%. A continuación, en la Tabla 3 se presentan las investigaciones revisadas para obtener dichos porcentajes de modificación.

Tabla 3 Cuadro comparativo de las investigaciones que usaron ceniza volante como modificante para la mezcla asfáltica

Nombre de la Investigación	Universidad y año	Autores	Resultados	
Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza provenientes de locaciones petroleras.	Universidad Pontificia Bolivariana 2011	Guillermo Orozco y Juan Murillo	Se modifica la mezcla asfáltica con porcentajes del 5%,10% y 15% de ceniza volante. Con 15% de ceniza y 4.5% de asfalto se aumentó la estabilidad en un 22% con respecto a la mezcla sin ceniza. El flujo de la mezcla en ambos casos casi no presenta variación.	
Determinación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo 2 utilizando ceniza como una	Universidad Pontificia Bolivariana 2013	Luis Aguilar y Edward Ayala	Se modifica la mezcla asfáltica con porcentajes del 30%, 50% y 70% de ceniza. Con 4.5% de asfalto y 30% de ceniza el aumento de la estabilidad con respecto a la mezcla sin ceniza es de más del 100%. El	

Nombre de la Investigación	Universidad y año	Autores	Resultados
proporción del agregado fino y como llenante. Resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica en caliente con adición de un 10% por ceniza volantes de carbón mineral.	Universidad San Pedro - Perú 2019	Joan Gerardo Rosales Lecca	flujo de la mezcla en ambos casos casi no presenta variación. Se modifica la mezcla asfáltica con 10% de ceniza, variando el porcentaje de asfalto. Para un porcentaje de asfalto del 5% y 10% de ceniza el aumento de la estabilidad fue de un 11% y el flujo aumento un 18%.

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

- Nylon: Para este caso el mejor resultado según la investigación revisada se obtuvo con un porcentaje de 0,15% del total de la masa de la mezcla. A continuación, en la Tabla 4 se presentan la comparación de los resultados obtenidos en la investigación revisada.

Tabla 4 Cuadro comparativo de los resultados obtenidos en la investigación revisada sobre el uso de nylon como modificante en mezclas asfálticas

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

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

2.2 Etapa I

2.2.1 Identificación de proveedores y obtención de los materiales

Agregado Pétreo.

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

Figura 1 Recolección de material pétreo

Nota: Fotografía tomada por

Asfalto 60/70

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

Figura 2 Tanques de asfalto empresa ECOBRAS S.A

Nota: Fotografía tomada por Autor.

Material Modificante

Nylon.

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

Figura 3 Nylon usado para la modificación de la mezcla

Nota: Fotografía tomada por Autor.

Ceniza.

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

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

2.2.2 Caracterización de los materiales obtenidos**Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E-213.**

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

Figura 4 Granulometría de los agregados



Nota: Fotografía tomada por Autor

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

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

Penetración de los materiales bituminosos INV E-706.

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

Figura 5 Ensayo de penetración de material bituminoso



Nota: Fotografía tomada por

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

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

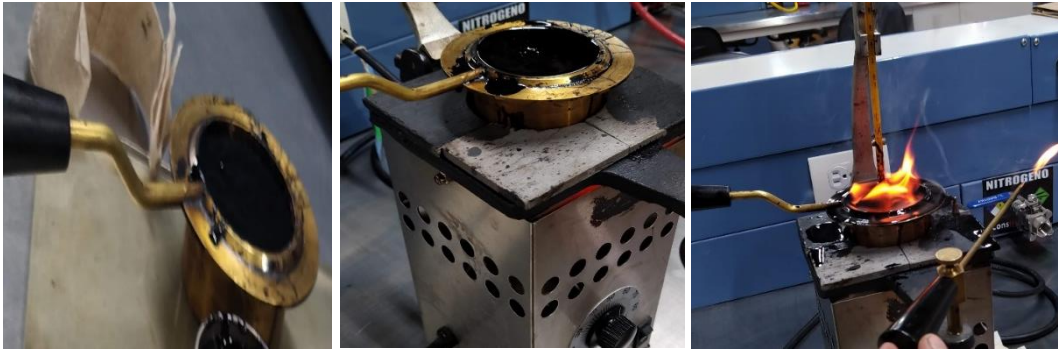
Figura 6 Ensayo de densidad del material bituminoso



Nota: Fotografía tomada por Autor.

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

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

Figura 7 Ensayo Punto de inflamación y combustión

Nota: Fotografía tomada por

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

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

Figura 8 Ensayo de punto de ablandamiento (método anillo y bola)

Nota: Fotografía tomada por Autor.

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

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

Figura 9 Viscosidad del asfalto mediante el viscosímetro rotacional



Nota: Fotografía tomada por Autor.

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

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

Para el ensayo se elaboraron 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto para un total de 9 briquetas. Los porcentajes de asfalto utilizados fueron 5%, 5.5% y 6% con los cuales se determinó la cantidad de agregados que debían contener las briquetas según el porcentaje de asfalto a trabajar. En la se puede evidenciar la distribución de material para cada porcentaje de asfalto, dicha distribución se obtuvo de acuerdo a las franjas granulométricas expuestas en el artículo 450 de la normativa INVIAS [19].

Tabla 5 se puede evidenciar la distribución de material para cada porcentaje de asfalto, dicha distribución se obtuvo de acuerdo a las franjas granulométricas expuestas en el artículo 450 de la normativa INVIAS [19].

Tabla 5 Distribución de material granular para cada porcentaje de asfalto

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

Nota: Distribución de material granular de acuerdo al porcentaje retenido en cada tamiz (valores en gramos). Por autor

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

Figura 10 Ensayo Marshall para determinar contenido óptimo de asfalto

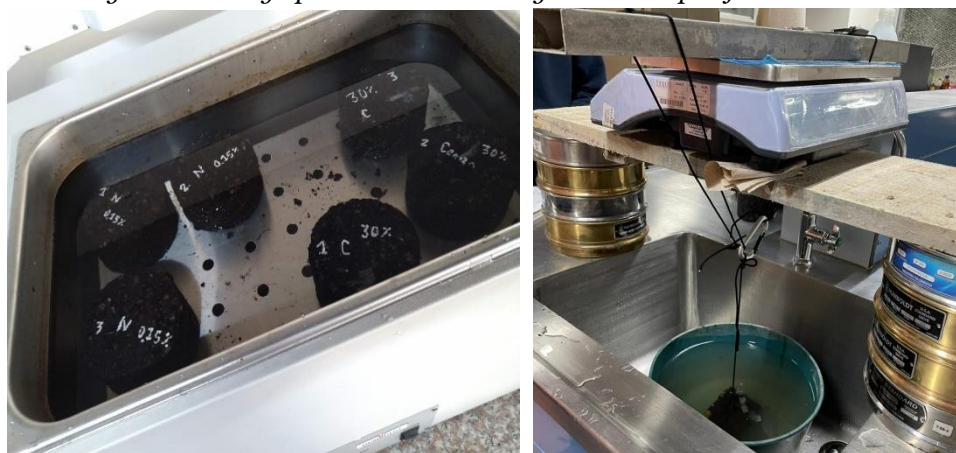


Nota: Fotografía tomada por Autor.

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

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

Figura 11 Ensayo para determinar la gravedad específica de Bulk



Nota: Fotografía tomada por Autor.

2.3 Etapa II

2.3.1 Modificación de la mezcla asfáltica

Una vez determinado el contenido óptimo de asfalto se procede a realizar briquetas de control con dicho contenido de asfalto. Se elaboraron en total 12 briquetas, 3 de control, 3 briquetas con 0,15% de nylon, 3 briquetas reemplazando un 30% del filler con ceniza y 3 briquetas combinando ambos modificantes es decir con 0,15% de nylon y 30% de ceniza. En la Tabla 6 se presenta la cantidad de material granular y asfalto que debe contener cada briqueta según cada caso de modificación.

Tabla 6 Distribución de agregados según cada caso de modificación

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

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

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

Figura 12 Marshall para mezcla asfáltica modificada



Nota: Fotografía tomada por Autor.

2.4 Etapa III

2.4.1 Obtención del contenido óptimo de asfalto

Para obtener los valores que se presentan en la Tabla 7, se realizan varios análisis a los resultados obtenidos en la caracterización de las briquetas y los datos arrojados por la máquina usada para fallar las briquetas "Master Loader". Se selecciona el valor máximo del peso específico y estabilidad, mientras que para los parámetros de fluidez y porcentaje de vacíos se seleccionan los datos intermedios, una vez obtenidos estos datos se promedian y se determina que el contenido óptimo de asfalto para este caso es de 5,3%.

Tabla 7 Determinación del contenido óptimo de asfalto

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

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

2.5 Etapa IV

2.5.1 Resultados

2.5.1.1 Caracterización materiales

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

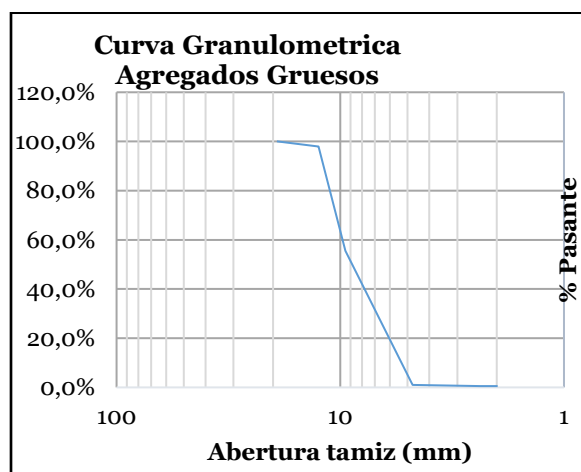
Tabla 8 Caracterización del asfalto

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

Nota: Elaborada por Autor

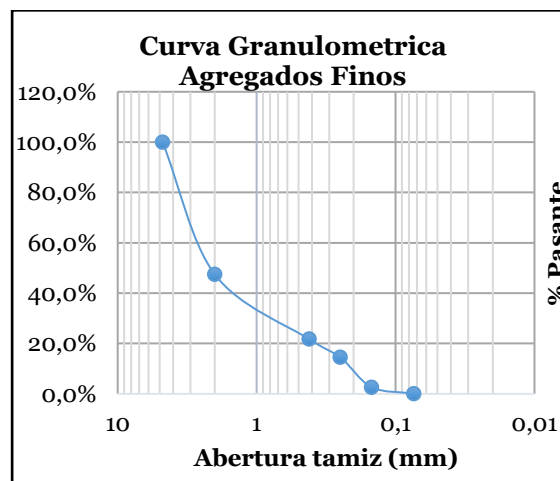
Se realizó la caracterización de los agregados finos y gruesos de acuerdo con la normativa Invias, específicamente los ensayos INV E-213 y INV E- 218 obteniendo los resultados que se me muestran a continuación.

Figura 13 Curva granulométrica para agregado grueso



Nota: Suministrada por empresa PASOLIN SAS.

Figura 14 Curva granulométrica para agregado fino

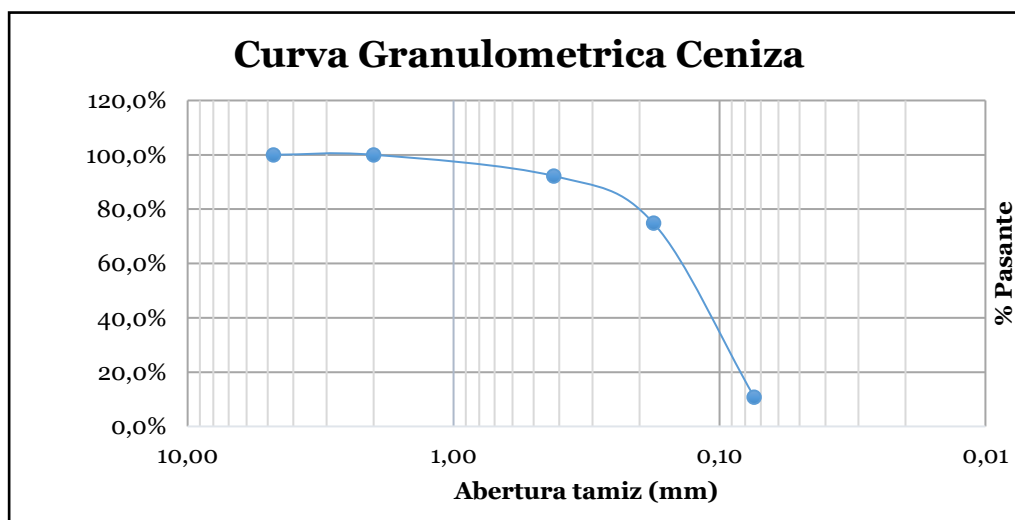


Nota: Elaborada por autor.

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

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

Figura 14 Granulometría de la ceniza



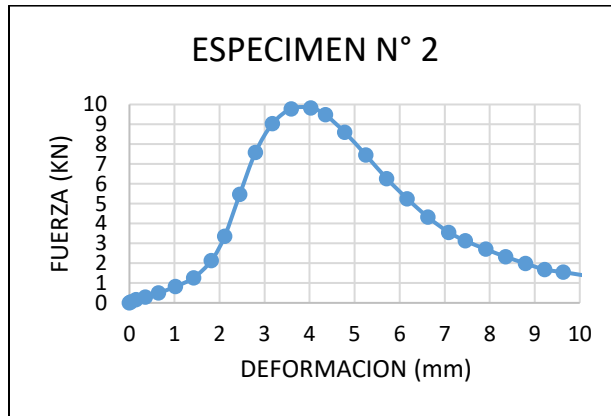
Nota: Elaborada por Autor.

1.1.1.1 Ensayo Marshall con la mezcla asfáltica modificada

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

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

Figura 15 Estabilidad vs Flujo del espécimen N° 2 de control



Nota: Elaborada por Autor.

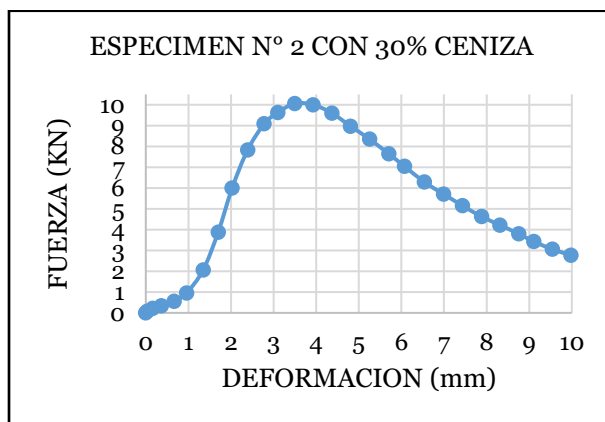
Tabla 9 Datos de las briquetas de control

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

Nota: Elaborada Por autor.

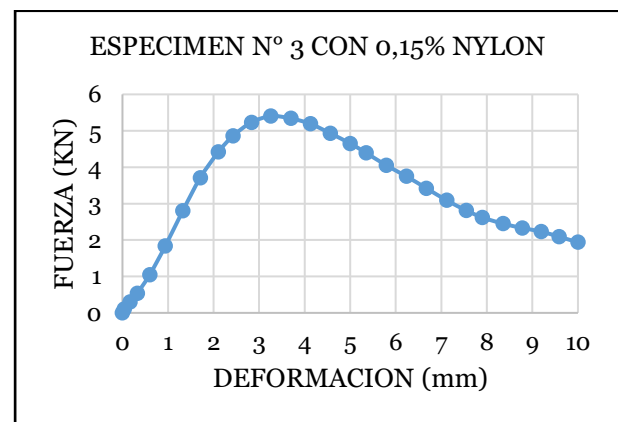
A continuación, se presentan las gráficas fuerza vs deformación de los especímenes modificados que mejor se comportaron, además se presenta una tabla en donde se resumen los datos obtenidos de las propiedades de las briquetas modificadas y de control mediante el ensayo Marshall.

Figura 16 Estabilidad vs flujo del espécimen 2 con 30% ceniza



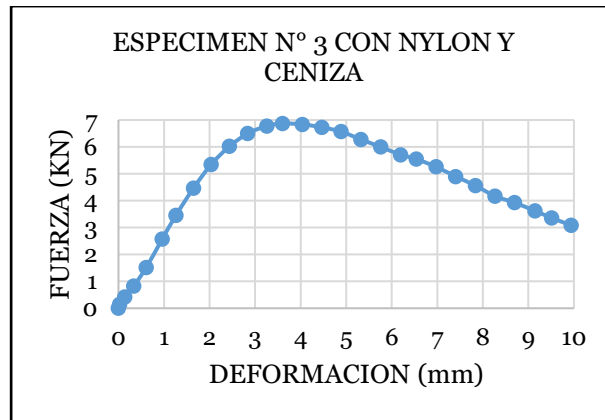
Nota: Elaborada por Autor

Figura 17 Estabilidad vs flujo del espécimen 3 con 0,15% nylon



Nota: Elaborada por Autor

Figura 18 Estabilidad vs flujo del espécimen 3 con ceniza + nylon



Nota: Elaborada por Autor

Tabla 10 Resumen de las propiedades obtenidas de las briquetas modificadas

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

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

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

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

1.1.1.2 Diseño del pavimento mediante la metodología Shell

Para el diseño se debe tener en cuenta la temperatura media anual ponderada (TMAP °C) junto con un factor de ponderación, los datos de la temperatura se obtuvieron gracias a la herramienta CLIMA del software TOPO 3 para lo cual se tuvieron en cuenta 3 estaciones climáticas de la ciudad de Villavicencio (APTO VANGUARDIA, UNILLANOS Y LIBERTAD LA).

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

Tabla 11 Datos iniciales para el diseño

Datos		
CBR	5,0	%
Mr	5,0,E+07	N/m2
N8,2	1,0,E+06	
TMAP	26,05	° C
FP	2,11	° C
Asfalto	5,3	%
Agregados	93,09	%

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

Tabla 12 Diseño metodología Shell

Datos del Diseño		
w-MAAT	25,7	° C
T800	5,2,E+01	° C
IP	-1,2,E+00	
Tmix	35,70	° C
ΔT	16,30	° C
Rigidez del asfalto (Sb)	2,0,E+06	N/m2
Rigidez de la mezcla (Smix)	1,0,E+09	N/m2
ϵ fat	1,9,E-04	

Código final de la mezcla **S1 F2 50**

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

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

Tabla 13 Distribución de la estructura del pavimento

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

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

Figura 19 Estructura del pavimento

Carpeta Rodadura Modulo Rigidez mezcla = $1,0 \times 10^9$ N/m2 Espesor = 12 cm
Base Granular Modulo = $8,0 \times 10^8$ N/m2 Espesor = 15 cm
Subbase Granular Modulo = $4,0 \times 10^8$ N/m2 Espesor = 25 cm
Subrasante Mr = $5,0 \times 10^7$ N/m2

Nota: Elaborada por Autor

1.1.2 Ventajas y desventajas

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

Tabla 14 Comparación Mezcla convencional Vs Mezcla modificada

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

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

3. CONCLUSIONES

- Se evidencio que los agregados provenientes de la planta de asfalto PASOLIN SAS cumplen con lo establecido en el art 450 de la norma INVIAS, de esta forma se garantiza que la mezcla no vaya a presentar problemas de durabilidad o degradación relacionados con los agregados.

- Se llevó a cabo la identificación y visita a las principales empresas encargadas del proceso de reciclaje ubicadas en el barrio industrial de Villavicencio, con el fin de obtener información sobre el uso y disposición que se le da al nylon. De acuerdo con la información obtenida, dicho material no es reciclable y por tanto los recicladores no lo recogen ya que no obtendrán ningún beneficio por este, solo una empresa cuenta con una bodega de material NO RECICLABLE, pero al momento de la visita a la EMPRESA RECUPERADORA DE PLÁSTICO S.A el contenido de dicha bodega ya había sido llevado al relleno sanitario y por tal motivo no fue posible obtener desechos de nylon.
- Se seleccionaron los porcentajes de modificación para la mezcla asfáltica tomando como base las investigaciones que utilizaron los mismos materiales de modificación propuestos, quedando de la siguiente manera: para la ceniza volante se eligió reemplazar el 30 % del filler y para el nylon el 0.15% del total de la mezcla asfáltica. Esta elección se hizo analizando los resultados que se obtenían en las investigaciones revisadas.
- Mediante el uso de la metodología Marshall se determinó que el contenido óptimo de asfalto es de 5.3%, con este valor se realizaron briquetas de control que obtuvieron valores de estabilidad de 8.15 Kn y 3.58 mm de fluidez por lo que se garantiza el cumplimiento de los requisitos mínimos establecidos en la norma.
- Según lo establecido por el art 450 de la norma INVIAS para un tránsito NT2 los valores de estabilidad deben ser mínimo de 7.5 Kn y el flujo debe estar entre 2 y 4 mm, por lo que la mezcla modificada que cumple con estos requisitos es la mezcla que contiene 30% de ceniza volante que presenta un valor de 8.79 Kn para estabilidad y 3.25 mm de fluidez. Evidenciando un aumento en la estabilidad y garantizando su resistencia al ahuellamiento, ondulaciones y demás cambios que afecten la vida del pavimento.
- De acuerdo con los resultados de la mezcla modificada solo con nylon y la modificada con nylon + ceniza volante, cumplen con los requisitos mínimos de flujo, pero no presentan la estabilidad mínima que exige la norma INVIAS. Esto se debe a que las fibras de nylon que se utilizaron en la modificación presentaban cierto desgaste que pudo haber afectado su resistencia.
- El diseño de la estructura de pavimento mediante el uso de la metodología Shell para una mezcla convencional presentan mínimas variaciones con el diseño para la mezcla modificada, varían muy poco los módulos de rigidez de la mezcla, la deformación del asfalto por fatiga y los espesores de la estructura del pavimento se mantienen iguales. Sin embargo, mediante el uso de la mezcla modificada se estaría reduciendo el impacto ambiental de las cenizas volantes y el nylon.

- Finalmente, con los resultados obtenidos en esta investigación se demuestra que es posible utilizar materiales contaminantes como materia prima en la elaboración de mezclas asfálticas para mejorar sus propiedades, haciéndolas más resistentes a las cargas ejercidas por el tránsito y contribuyendo a la reducción del impacto ambiental.

4. REFERENCIAS

- [1] E. J. Forigua and E. Pedraza, "Diseño de Mezclas Asfálticas Modificadas mediante la Adición de Desperdicios Plásticos," *Univ. Católica Colomb.*, p. 32, 2014.
- [2] C. MEJÍA and C. SIERRA, "ESTADO DEL ARTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS: CASO DE ESTUDIO UNIVERSIDADES DE BOGOTÁ D.C.," *Вестник Росздравнадзора*, vol. 4, pp. 9–15, 2017.
- [3] L. Aguilar and E. Ayala, "DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO 2 UTILIZANDO CENIZA COMO UNA PROPORCIÓN DEL AGREGADO FINO Y COMO LLENANTE," UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, 2015.
- [4] J. Cepeda, "ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS," UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - Ecuador, 2015.
- [5] R. Lecca and J. Gerardo, "Resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica en caliente con adición de un 10% por cenizas de carbón mineral.," UNIVERSIDAD SAN PEDRO, 2019.
- [6] O. F. Lizcano, G. Deyber, and A. R. Felix, "ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECANICO DE MEZCLAS ASFALTICAS MODIFICADAS CON LLENANTE MINERAL DE CENIZA DE LA CASCARILLA RESULTANTE DE LA MOLIENDA DEL ARROZ," 2020. Accessed: Sep. 02, 2020. [Online]. Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24575>.
- [7] Ministerio de Transporte, "Transportation in statistical figures," *Minist. Transp.*, p. 113, 2018, [Online]. Available: [https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Estudios BID/Transporte en Cifras - Estadísticas 2018 \(4\).pdf?ver=2019-11-19-142924-863×tamp=1574191787084](https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Estudios%20BID/Transporte%20en%20Cifras%20-%20Estadisticas%202018%20(4).pdf?ver=2019-11-19-142924-863×tamp=1574191787084).
- [8] M. Revelo, "Diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas con elastómero (caucho) y tereftalato de polietileno reciclados con ligante asfáltico AC-20," *Artículos académicos - Carrera Ing. Civ.*, no. 1, p. 195, 2015, doi: 10.1134/S1063783412020126.
- [9] O. Reyes Ortiz, J. Troncoso Rivera, and J. Camacho Tauta, "Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes," *Ing. y Univ.*, vol. 10, no. 1, p. 2, 2006.
- [10] E. Rodríguez, "Uso de polvo de caucho de llantas en pavimentos asfálticos," *Univ. Costa Rica*, vol. 7, no. 4, p. 7, 2016, [Online]. Available: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/50625112500/316/4.pdf?sequence=1>.
- [11] H. Alexánder, R. Quintana, E. R. Rincón, L. Ángel, and M. Anselmi, "MECHANICAL RESISTANCE OF HOT THICK MIXTURES MADE WITH ASPHALT MODIFIED WITH POLYVINYL CHLORIDE, POLYCLORURE (PVC) WASTES, HIGH DENSITY POLYETHYLENE (PEAD), AND POLYSTYRENE (PS) EVALUATED IN MARSHALL ASSAY," 2007. Accessed: Sep. 05, 2020. [Online]. Available: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/207>.
- [12] H. Rondón and F. Reyes, *Pavimentos Materiales, construcción y diseño*. 2015.
- [13] J. D. Vanegas Miranda and T. (Magíster en I. C.--U. de los Andes, "CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS SINTÉTICAS," Maestría en Ingeniería Civil, 2017. Accessed: Sep. 03, 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13873>.
- [14] Y. Cabezas, "Caracterización física de un ligante asfáltico 60/70 modificado con desechos de

- polietileno de alta densidad (D-PEAD),” *Fac. Ing. Civ. Tesis, Trab. Grado y Disert. Académicas Pregr. Ing. Civ.*, 2020.
- [15] Instituto Nacional de Vías - INVÍAS, “Norma - Pavimentos asfálticos,” *Especificaciones Gen. Construcción Carreteras*, pp. 1–440, 2013.
- [16] M. Y. Lara Pérez, “Cenizas De Biosólido De Ptar Como Llenante Mineral En La Elaboración De Mezclas Asfálticas Tipo Mdc-19,” pp. 1–79, 2016.
- [17] E. Vanegas and L. Segura, “EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON VIDRIO TEMPLADO MOLIDO POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA MARSHALL,” UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, 2021.
- [18] M. Shell, “Diseño de pavimentos asfálticos método shell 78,” pp. 1–13.
- [19] INVIAS, “Norma - Pavimentos asfálticos,” *Especificaciones Gen. Construcción Carreteras*, pp. 1–440, 2013.