

COMPARACION DE LOS BENEFICIOS DE UN DISEÑO DE MEZCLA (60-70 y 80-100) CON ADITIVO DE HUMEDAD DEL 1% RESPECTO A UNA MEZCLA DE ASFALTO ESTÁNDAR (60-70 y 80-100), EN CÚCUTA NORTE DE SANTANDER

**JOHAN JHILBERTO HERNANDEZ AGUILAR**

**COD. 1050552747**

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

**EDGAR PEREZ FLOREZ**

**INGENIERO CIVIL**

Codirector

**PEDRO JOSE HERNANDEZ**

**INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, AMBIENTAL Y QUÍMICA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PAMPLONA**

**2019**

## **Dedicatoria**

Primero que todo a Dios, por permitirme estudiar en esta gran universidad como lo es la Universidad de Pamplona, y poder formarme como ingeniero civil.

También agradecer a mis padres Helena Aguilar Reyes y Euclides Hernández Gómez por apoyarme en todo este proceso de formación durante toda mi carrera, sin perder las esperanzas de que llegara a terminar este ciclo en mi vida a pesar de la dificultad que todo este proceso conlleva.

Agradecerle también a mi abuelita Juana Agudelo Gómez que a pesar de que ya no está con nosotros influyó mucho en mí y mi formación como ingeniero civil.

También a mis hermanos Juan Sebastián Hernández Aguilar y Angie Yulitza Hernández Aguilar por brindarme apoyo en mi carrera.

**MIL GRACIAS FAMILIA**

## **Agradecimientos**

agradecer a mis padres Helena Aguilar Reyes y Euclides Hernández Gómez por apoyarme en todo este proceso de formación durante toda mi carrera.

Al ingeniero civil Edgar Pérez Flórez por haber aceptado ser el tutor de este proyecto y colaborarme en todo lo necesario para que este fuera una realidad.

Al ingeniero Pedro José Hernández por colaborarme como codirector de este proyecto asesorándome en todos y cada uno de los ensayos que componen el diseño de las mezclas asfálticas, y guiarme para el buen desarrollo del diseño de mezcla asfáltica, y por a ver sacado tiempo de su trabajo para ayudarme a seguir adelante con este proyecto, por enseñarme todo lo que es practica sobre diseño de mezclas asfálticas.

A la trituradora la Roca y el laboratorio de pavimento Copavicol por darme la oportunidad de usar sus instalaciones para llevar a cabo este proyecto.

## Tabla de contenido

1	Introducción .....	1
2	Objetivos.....	2
	2.1    Objetivo general.....	2
	2.2    Objetivos específicos .....	2
3	Marco referencial.....	3
	3.1    Descripción de la zona de estudio.....	3
	3.1.1    Localización geográfica donde se realizarán los ensayos .....	4
	3.2    Marco teórico.....	4
	3.2.1    Pavimentos flexibles.....	4
	3.2.2    Funciones de las capas de un pavimento flexible.....	5
	3.2.2.1    Subbase granular.....	5
	3.2.2.1.1    Función económica.....	5
	3.2.2.1.2    Capa de transición .....	5
	3.2.2.1.3    Disminución de las deformaciones.....	5
	3.2.2.1.4    Resistencia .....	5
	3.2.2.1.5    Drenaje.....	5
	3.2.2.2    Base granular .....	6
	3.2.2.2.1    Resistencia.....	6
	3.2.2.2.2    Función económica.....	6
	3.2.2.3    Carpeta.....	6
	3.2.2.3.1    Superficie de rodamiento.....	6
	3.2.2.3.2    Impermeabilidad.....	6
	3.2.2.3.3    Resistencia .....	6
	3.2.3    Mezcla asfáltica en caliente.....	7
	3.2.4    Marco histórico.....	8
	3.2.5    Marco legal .....	9
	3.2.6    Estado del arte .....	12
4	Metodología.....	14
	4.1    Fases de la investigación.....	14
	4.1.1    Fase 1.....	14
	4.1.1.1    Tipo de investigación.....	14
	4.1.1.2    Especificaciones para el diseño de la mezcla Marshall.....	16
	4.1.1.3    Separación de los materiales.....	17
	4.1.2    Fase 2.....	18

4.1.2.1	Ensayos de laboratorio para los agregados .....	18
4.1.2.2	Granulometría.....	18
4.1.2.3	Desgaste en la máquina de los ángeles .....	20
4.1.2.4	Porcentaje de caras fracturadas.....	20
4.1.2.5	Índice de alargamiento y aplanamiento .....	21
4.1.2.6	Determinación de la solidez de los agregados usando sulfatos de sodio o sulfatos de magnesio .....	22
4.1.2.7	Equivalente de arena.....	23
4.1.2.8	Preparación de los especímenes (briquetas) para realizar el ensayo Marshall	23
4.1.2.9	Determinación del peso específico .....	24
4.1.2.10	Determinación de la estabilidad y el flujo .....	25
4.1.3	Fase 3.....	25
4.1.3.1	Análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio.....	25
4.1.3.2	Análisis granulométrico.....	25
4.1.3.3	Desgaste en la máquina de los ángeles .....	28
4.1.3.4	Peso específico .....	29
4.1.3.5	Cálculo del diseño Marshall para la mezcla 60-70 normalizada .....	32
4.1.3.5.1	Nomenclatura tabla 42.....	62
4.1.3.5.2	Calculo diseño Marshall para mezcla 80-100 normal .....	63
4.1.3.5.3	Nomenclatura tabla 44.....	68
4.1.3.6	Porcentaje óptimo de asfalto mezcla 60-70 normalizada .....	69
4.1.3.7	Porcentaje óptimo de asfalto mezcla 60-70 normal.....	69
4.1.3.8	Porcentaje óptimo de asfalto mezcla 80-100 normal.....	69
4.1.3.9	Comparación de curvas entre la mezcla 60-70 normalizada, mezcla 60-70 normal y la mezcla 80-100 normal .....	70
5	Beneficios que aporta un diseño de mezcla mejorada con aditivo mejorador de adherencia de humedad del 1%.....	73
6	Análisis de la relación costo-calidad de las diferentes mezclas asfálticas.....	75
7	Evaluar el impacto de la investigación a nivel socio-económico. ....	76
8	Conclusiones .....	77
9	Recomendaciones .....	79
10	Bibliografía .....	80

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b>	Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas. ....	7
<b>Tabla 2</b>	Materiales bituminosos para el riego de imprimación.....	11
<b>Tabla 3</b>	Materiales bituminosos para riego de liga. ....	11
<b>Tabla 4</b>	Requisitos de los agregados para lechadas asfálticas. ....	12
<b>Tabla 5</b>	Criterio de diseño mezcla Marshall. ....	16
<b>Tabla 6</b>	Mínimo porcentaje de vacíos de agregado.....	17
<b>Tabla 7</b>	Agregado grueso TMN 3/4" .....	19
<b>Tabla 8</b>	Agregado grueso TMN 3/4" serie tamices que indica la norma .....	19
<b>Tabla 9</b>	Ensayo equivalente de arena.....	23
<b>Tabla 10</b>	Agregado grueso TMN 3/4" .....	26
<b>Tabla 11</b>	Agregado grueso TMN 3/4" serie tamices que indica la norma .....	27
<b>Tabla 12</b>	Resumen de las granulometrías .....	27
<b>Tabla 13</b>	Promedio del peso específico mezcla 60-70 normalizada .....	30
<b>Tabla 14</b>	Promedio del peso específico mezcla 80-100 normal .....	30
<b>Tabla 15</b>	Valores de estabilidad y flujo mezcla 60-70 normalizada. ....	32
<b>Tabla 16</b>	Diseño Marshall para mezcla 60-70 normalizada.....	61
<b>Tabla 17</b>	Diseño Marshall para mezcla 60-70 normal .....	63
<b>Tabla 18</b>	Valores de estabilidad y flujo mezcla 80-100 normal .....	63
<b>Tabla 19</b>	Diseño Marshall para mezcla 80-100 normal .....	67
<b>Tabla 20</b>	% de asfaltos óptimos mezcla 60-70 normalizada.....	69
<b>Tabla 21</b>	% de asfaltos óptimos mezcla 60-70 normal .....	69
<b>Tabla 22</b>	% de asfalto óptimo mezcla 80-100 normal .....	70

### Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Ubicación del municipio de Cúcuta norte de Santander .....	3
<b>Figura 2</b> Ubicación de la trituradora Copavicol.....	4
<b>Figura 3</b> Curvas granulométricas.....	28
<b>Figura 4</b> Curva de peso específico mezcla 60-70 normalizada .....	31
<b>Figura 5</b> Curva de peso específico mezcla 80-100 normal.....	31
<b>Figura 6</b> peso unitario vs % de asfalto.....	70
<b>Figura 7</b> %de vacíos en agregados vs % de asfalto .....	71
<b>Figura 8</b> estabilidad vs % de asfalto .....	71
<b>Figura 9</b> % total de vacíos con aire vs % de asfalto .....	72
<b>Figura 10</b> flujo vs % de asfalto .....	72

## **Resumen**

En el presente trabajo de requisito de grado se realizó con base en estudios de laboratorio la comparación de las propiedades mecánicas entre una mezcla asfáltica convencional (60-70 y 80-100) y una mezcla asfáltica mejorada (60-70 y 80-100) con un aditivo de adherencia de humedad al 1%, para comparar las capacidades y resultados de cada una de ellas al momento de estar culminadas por medio de ensayos de laboratorios.

Se emplea el método Marshall y se realizan las comparaciones con el objetivo de determinar si el aditivo otorga algunas capacidades de resistencia a la mezcla, para que en un futuro se pueda proponer a los diseños de mezclas asfálticas con esta clase de mejoradores para obtener una mayor vida útil del pavimento.

Se abarca brevemente la descripción y origen de los agregados pétreos y del material bituminoso usado en esta investigación, así también se describe todos los ensayos realizados para comprobar por medio de los resultados si los materiales utilizados cumplen o no con las especificaciones necesarias para mezclas asfálticas.

Finalmente se exponen e interpretan los resultados obtenidos, y de la misma forma se realizan recomendaciones sobre cómo mejorar el proceso de modificación de la mezcla original para futuras investigaciones.

## **Abstract**

In this grade requirement work, the comparison of the mechanical properties between a conventional asphalt mixture (60-70 and 80-100) and an improved asphalt mixture (60-70 and 80-100) with an adhesion additive of Humidity at 1%, to compare the capacities and results of each one of them at the time of being culminated by means of laboratory tests.

The Marshall method is used and the tests are made in order to determine if the additive grants some resistance to the mixture, so that in the future it can be proposed to the designs of asphalt mixtures with this class of breeders for To obtain a greater shelf life of the pavement.

The description and origin of the stone aggregates and the bituminous material used in this research are briefly covered, as well as all the tests carried out to verify by means of the results if the materials used meet or not with the Specifications required for asphalt mixtures.

inally, the results obtained are exposed and interpreted, and in the same way recommendations are made on how to improve the process of modification of the original mixture for future research.

## 1 Introducción

Este trabajo de grado abarca el análisis y comparación de dos tipos de mezclas asfálticas una de ellas convencional y la otra aplicándole un aditivo “mejorador de adherencia de humedad al 1%” para verificar la viabilidad que tiene esta mezcla con respecto a la convencional.

Haciendo uso de los diferentes ensayos como granulometría, desgaste en la máquina de los ángeles, porcentaje de caras fracturadas, solidez de los agregados usando sulfatos, desgaste de arena entre otros ensayos para el respectivo análisis de las condiciones que presentan las mezclas y obtener un resultado sobre cuál de estas mezclas se comporta mucho mejor en los diferentes climas de Colombia.

La producción de concreto asfáltico en el país se ha incrementado en los últimos años ya que el estado colombiano a entendido que el desarrollo de un país es directamente proporcional a la cantidad y calidad de vías que permiten el fácil acceso de una región a otra.

El uso de diseño de mezclas asfálticas tiene como objetivo lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio.

Las mezclas asfálticas deben brindar un mayor grado de confianza en su utilización, debe satisfacer las necesidades de los usuarios y garantizar una mayor vida útil de servicio, por esta razón se debe recurrir a la producción de asfaltos modificados en la producción de las mezclas cuyos agentes modificadores cambian el proceso reológico de las mismas y de esta manera mejorar sus características.

Para ello se llevará a cabo los diferentes ensayos de laboratorios para determinar el tipo de agregado, el tipo y cantidad de asfalto de acuerdo al clima y las cargas impuestas por el tránsito, resistentes a los agentes de interperismo que estarán presente en su vida útil de servicio.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Comparar los beneficios de un diseño de mezcla (60-70 y 80-100) con aditivo “mejorador de adherencia de humedad al 1%”, respecto a una mezcla de asfalto estándar (60-70 y 80-100) en Cúcuta Norte de Santander.

### 2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los agregados pétreos de los ríos pamplonita.
- Interpretar los diferentes ensayos correspondientes a los diseños de las mezclas asfálticas.
- Identificar los beneficios de la mezcla con mejorador de adherencia de humedad del 1%.
- Analizar la relación costo – calidad de las diferentes mezclas.
- Evaluar el impacto de la investigación a nivel socio-económico.

### 3 Marco referencial

#### 3.1 Descripción de la zona de estudio

El centro de investigación se encuentra ubicado en la trituradora la Roca, en el laboratorio Copavicol (construcciones y pavimentos viales de Colombia S.A.S), anillo vial oriental 200 m. Adelante, puente García Herrera; Cúcuta Norte de Santander, (**Ver figura 2**). (Hernández. J, 2019)

Cúcuta, oficialmente San José de Cúcuta, es un municipio colombiano, capital del departamento de Norte de Santander. Se encuentra situado en el nororiente del país, sobre la Cordillera Oriental de los Andes. (**Ver figura 1**). (Hernández. J, 2019)



**Figura 1** Ubicación del municipio de Cúcuta norte de Santander

**Fuente.** (Google Earth, 2019)

### 3.1.1 Localización geográfica donde se realizarán los ensayos



**Figura 2** Ubicación de la trituradora Copavicol

**Fuente.** (Google Earth, 2019)

## 3.2 Marco teórico

### 3.2.1 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles están formados por una capa bituminosa “carpeta asfáltica” apoyada sobre dos capas no rígidas la base y la subbase. (Fonseca, 2002)

Los pavimentos también se les debe tener en cuenta algunas características como la resistencia a las cargas del tránsito, a las condiciones climáticas, presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de vehículos, tener larga vida útil, tener condiciones adecuadas de drenaje. (Hernández. J, 2019)

## **3.2.2 Funciones de las capas de un pavimento flexible**

### **3.2.2.1 Subbase granular**

#### *3.2.2.1.1 Función económica*

Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, pueden ser construidos con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior. (Fonseca, 2002)

#### *3.2.2.1.2 Capa de transición*

La subbase bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y como otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad. (Fonseca, 2002)

#### *3.2.2.1.3 Disminución de las deformaciones*

Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo de dichas deformaciones que se reflejan en la superficie de rodamiento. (Fonseca, 2002)

#### *3.2.2.1.4 Resistencia*

La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidos a un nivel adecuado de la subrasante. (Fonseca, 2002)

#### *3.2.2.1.5 Drenaje*

En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o de las bermas, así como impedir la ascensión capilar. (Fonseca, 2002)

### **3.2.2.2 Base granular**

#### *3.2.2.2.1 Resistencia*

La función principal de la subbase granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito de una intensidad apropiada. (Fonseca, 2002)

#### *3.2.2.2.2 Función económica*

Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función económica análoga a la que tiene la subbase respecto a la base. (Fonseca, 2002)

### **3.2.2.3 Carpeta**

#### *3.2.2.3.1 Superficie de rodamiento*

La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito. (Fonseca, 2002)

#### *3.2.2.3.2 Impermeabilidad*

Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento. (Fonseca, 2002)

#### *3.2.2.3.3 Resistencia*

Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento. (Fonseca, 2002)

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales, y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de la estructura. (upcommons.upc.edu, 2017)

La **Tabla 1** muestra las propiedades funcionales que comprenden las mezclas asfálticas.

**Tabla 1**

*Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas.*

---

<b>Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas</b>
<b>Seguridad</b>
resistencia al deslizamiento
regularidad transversal
visibilidad (marcas viales)
<b>Comodidad</b>
regularidad longitudinal
regularidad transversal
visibilidad
ruido
<b>Durabilidad</b>
capacidad soporte
resistencia a la desintegración superficial
<b>Medio ambiente</b>
ruido
capacidad de ser reciclado

---

**Fuente.** (upcommons.upc.edu, 2017)

### 3.2.3 Mezcla asfáltica en caliente

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de la estructura. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos, aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en volumen de agregados pétreos. (upcommons.upc.edu, 2017)

### 3.2.4 Marco histórico

Se estima que para el año 3000 A.C. en el imperio Hitita (en la península de Anatolia) se empezaron a construir los primeros caminos en suelo firme, también se encuentran algunos antecedentes que los egipcios también construyeron caminos alrededor de las pirámides. (Arkiplus, 2019)

También se dice que las órdenes religiosas que florecen en Europa Edad Media fomentan la construcción de caminos para los peregrinajes, en poblados de Francia, Italia y España. A mediados del siglo XVIII se desarrolla el uso de la cal en países como Inglaterra, a través del trabajo de hombres como el ingeniero John Smeaton. Constructor del Faro de Eddystone, Smeaton fue uno de los responsables del cambio vial en la ciudad británica. (Arkiplus, 2019)

Durante el siglo XIX, Inglaterra fue pionera en implementar leyes de pavimentación, con la creación del Comisionado de Pavimentación, dependiente del Parlamento del Reino Unido. La Europa del siglo XIX se caracteriza por un desarrollo en la construcción de caminos pavimentados. En pueblos como Tressaget (en Francia) se observaron los primeros caminos realizados a base de piedras de gran tamaño. (Arkiplus, 2019)

Pero los grandes avances en la materia se dan en los Estados Unidos, a través de la fabricación de nuevas capas asfálticas, que permiten una mayor flexibilidad en el desplazamiento de los autos. El uso de los pavimentos rígidos se dio en Estados Unidos, debido a la necesidad del país del Norte de caminos y rutas transitables para el transporte masivo. El crecimiento demográfico experimentado durante el siglo XIX procuraba nuevas vías de transporte. (Arkiplus, 2019)

El fin del siglo XX encuentra nuevas técnicas en el desarrollo de nuevas carreteras, que mejoran la adherencia y la capacidad de drenaje ante situaciones climáticas adversas. (Arkiplus, 2019)

El asfalto es sin duda uno de los materiales más antiguos utilizados por el hombre, Excavaciones arqueológicas revelan de su empleo en épocas anteriores a nuestra era. En Mesopotamia, Asia, el asfalto era usado como aglutinante en trabajos de albañilería y construcción de estrados. También, los reservorios de agua de los baños sagrados eran impermeabilizados con asfalto. (Arkiplus, 2019)

### 3.2.5 Marco legal

Este proyecto se basa en la utilización de la norma y especificaciones INVIAS 2013, (Invías, 2013), para el procedimiento y parámetros que se deben tener en cuenta para la realización del diseño de una mezcla asfáltica. (Invías, 2013)

En el artículo 410 del capítulo 4 de la respectiva norma, indica el tipo de material bituminoso que se debe utilizar para la realización de la mezcla asfáltica, (**Ver anexo 1**). También nos dice el tipo de vehículo para transporte y el tipo de almacenaje, el recibimiento del producto, el manejo ambiental. (Invías, 2013)

El artículo 411 del capítulo 4 de la respectiva norma, indica el tipo de material bituminoso que se debe utilizar para la realización de la mezcla asfáltica, tanto también nos dice el tipo de vehículo para transporte y el tipo de almacenaje, el recibimiento del producto, el manejo ambiental, (**Ver anexo 2**). (Hernández. J, 2019)

Y haciendo uso de los siguientes artículos estipulados en la norma y especificaciones del Invias 2013. (Hernández. J, 2019)

#### Capítulo 4

- Artículo 416 - suministro de asfalto líquido para riegos de imprimación (**Ver tabla 4**)

Esta especificación se refiere al suministro en el sitio, del asfalto líquido a utilizar en la elaboración de riegos de imprimación, de acuerdo con lo establecido en el Artículo 420, “Imprimación” (Invías, 2013)

- Artículo 420 - riego de imprimación

Consiste en el suministro, transporte, eventual calentamiento y aplicación uniforme de una emulsión asfáltica o un asfalto líquido sobre una superficie granular terminada, previamente a la extensión de una capa asfáltica o un tratamiento bituminoso. El riego también se podrá aplicar a bermas construidas en material granular y a sus taludes. El trabajo incluye también, eventualmente, el suministro y la aplicación de un agregado fino para la protección de la superficie imprimada. (Invías, 2013)

- Artículo 421 – riego de liga

consiste en el suministro, transporte, eventual calentamiento y aplicación uniforme de un ligante asfáltico sobre losas de concreto o sobre una capa bituminosa, previamente a la extensión de otra capa bituminosa, que no sea un tratamiento superficial, un sello de arena-asfalto o una lechada asfáltica. (Invías, 2013)

- Artículo 422 – riego de curado

consiste en el suministro, transporte, eventual calentamiento y aplicación uniforme de un ligante bituminoso sobre una capa tratada con un conglomerante hidráulico, con el fin de brindar impermeabilidad a toda su superficie. El trabajo incluye también, eventualmente, el suministro y la aplicación de un agregado fino para la protección de la superficie con el riego. (Invías, 2013)

- Artículo 433 – lechada asfáltica (**Ver anexo 2**)

consiste en la elaboración de una mezcla de agregados pétreos, agua, emulsión asfáltica de rotura lenta, convencional o modificada con polímeros, llenante mineral y, eventualmente,

aditivos, sobre la superficie de una vía, de acuerdo con esta especificación y de conformidad con los alineamientos, cotas y secciones indicados en los planos o determinados por el Interventor. (Invías, 2013)

- Artículo 450 – gradación de los agregados

consiste en la elaboración, transporte, colocación y compactación, de una o más capas de mezcla asfáltica de gradación continua, preparada y colocada en caliente (concreto asfáltico), de acuerdo con esta especificación y de conformidad con los alineamientos, cotas, secciones y espesores indicados en los planos o determinados por el Interventor. (Invías, 2013)

**Tabla 2**  
*Materiales bituminosos para el riego de imprimación*

tipo de material	denominación	requisitos
emulsión asfáltica	emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta tipo CRL-0	artículo 411
asfalto liquido	emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta tipo CRL-1 asfalto liquido MC-30	artículo 416

**Fuente.** (Invías, 2013)

**Tabla 3**  
*Materiales bituminosos para riego de liga.*

tipo de material	denominación	requisitos
emulsión asfáltica	CRR - 1 o CRR - 2	artículo 411
emulsión asfáltica modificada con polímeros	CRR - 1 m o CRR - 2m	artículo 415

**Fuente.** (Invías, 2013)



Modificados con Polímeros esta técnica consiste en la adición de un producto llamado polímero de tipo elastómero a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características reológicas, es decir su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito vehicular. Además, la preparación del mismo se realiza en frío, sin contaminar el ambiente como ocurre con los asfaltos convencionales. (agenciacyta, 2010)

en la facultad no sólo se logró el desarrollo de tecnología de pavimentos de última generación, sino que incluso se obtuvieron innovaciones de carácter internacional en la materia, como es la técnica de reciclado en frío in-situ tipo CIR (cold-in place-reciclan), sin la adición de ligante, cuando en el mundo el reciclado se realiza con la adición de ligante para la rehabilitación de pavimentos tradicionales en situación de deterioro, en que a mayor deterioro mayor será la conveniencia de la utilizar éstas mezclas recicladas. (agenciacyta, 2010)

En Madrid España, se está desarrollando una nueva alternativa de betunes elaster, permite hacer mezclas asfálticas con mayor cohesión, es decir, no se disgregan ni rompen con facilidad, mayor elasticidad para evitar su temprana deformación y más resistentes a temperaturas extremas. "El objetivo principal de estos betunes es mantener la carretera en perfecto estado, incrementando la seguridad vial y evitando los desgastes que garanticen la calidad en la conducción. (tube, 2015)

## 4 Metodología

### 4.1 Fases de la investigación

Esta investigación consta de 3 fases, cada una de estas fases cumple con los requisitos para llevar a cabo la realización de los objetivos propuestos, las fases son las siguientes.

- Tipo de investigación y Realización de la caracterización de los agregados que proporciona el río Pamplonita para la investigación.
- Obtener los datos de laboratorio (ensayos respectivos) necesarios para la realización del diseño de la mezcla.
- Analizar los resultados que se obtengan del diseño de la mezcla asfáltica y apoyándose en los datos para concluir si es viable la investigación.

#### 4.1.1 Fase 1

##### 4.1.1.1 Tipo de investigación

La investigación para la ejecución del proyecto es de tipo aplicada, donde se lleva a cabo las teorías bibliográficas y prácticas de laboratorios para el desarrollo apropiado del diseño de la mezcla asfáltica. (Hernández. J, 2019)

La **investigación aplicada** es el tipo de investigación en la cual el problema está establecido y es conocido por el investigador, por lo que utiliza la investigación para dar respuesta a preguntas específicas. (Hernández. J, 2019)

En este tipo de investigación el énfasis del estudio está en la resolución práctica de problemas. Se centra específicamente en cómo se pueden llevar a la práctica las teorías generales. Su motivación va hacia la resolución de los problemas que se plantean en un momento dado. (lifeder, 2018)

La investigación aplicada guarda una muy estrecha relación con la investigación básica, dado que depende de los descubrimientos de esta última y se enriquece de dichos descubrimientos. (lifeder, 2018)

Esta investigación también es conocida como empírica, dado que busca la aplicación del conocimiento adquirido con la idea de consolidar el saber para resolver una situación. (lifeder, 2018)

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”), o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5”). El método está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Gómez López, 2004)

Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. Se emplea en especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro. (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Gómez López, 2004)

Estos se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto- agregado. (ASTM D1559) Los dos aspectos principales del método Marshall de diseño de mezclas, son la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N o en libras que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100”) que ocurre en el espécimen

entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad. (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Gómez López, 2004)

#### 4.1.1.2 Especificaciones para el diseño de la mezcla Marshall

Por lo general se empieza con un contenido de asfalto del 4% teniendo en cuenta que las características de esta mezcla con este contenido de cemento asfáltico deben de ser evaluadas. (Hernández. J, 2019)

En esta investigación se está trabajando el contenido de asfalto variado (4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5%) para determinar un contenido de asfalto óptimo para una mezcla 60-70 y 80-100, normalizada y con mejorante de adherencia de humedad del 1%. (Hernández. J, 2019)

En el método Marshall se deben tener en cuenta las características para la elaboración de los especímenes basado al tipo de tráfico, (Tráfico ligero, Tráfico medio, Tráfico pesado), (Ver tabla 5). (Hernández. J, 2019)

**Tabla 5**  
*Criterio de diseño mezcla Marshall.*

método Marshall criterio de mezcla	tráfico ligero carpeta y base		tráfico medio carpeta y base		tráfico pesado carpeta y base	
	min	Max	min	Max	min	Max
compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
estabilidad, (N)	3336		5338		8006	
flujo, (0,25 mm) (0,01 in)	8	18	8	16	8	14
porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
porcentaje de vacíos en los agregados minerales	VER TABLA 8					
porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

**Fuente.** (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Gómez López, 2004)

La **Tabla 6** muestra los tamaños máximos nominales para la serie de tamices y el mínimo porcentaje de vacíos que debe tener la muestra.

**Tabla 6**

*Mínimo porcentaje de vacíos de agregado*

máxima tamaño de partícula nominal		porcentaje mínimo porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3	4	5
1,18	No. 16	21,5	22,5	23,5
2,36	No. 8	19	20	21
4,75	No. 4	16	17	18
9,5	3/8	14	15	16
12,5	1/2	13	14	15
19	3/4	12	13	14
25	1	11	12	13
37,5	1 1/2	10	11	12

**Fuente.** (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Gómez López, 2004)

#### **4.1.1.3 Separación de los materiales**

La caracterización de los materiales (agregados) utilizados en el diseño de la mezcla asfáltica densa en caliente MDC, son agregados obtenidos del río Pamplonita y haciendo tres selecciones de ese agregado según tamaño máximo nominal 3/4", 1/2" y pasa tamiz número 4 (arenas) teniendo en cuenta que el agregado grueso tengo al menos dos caras fracturadas. (Hernández. J, 2019)

Para cada una de esas caracterizaciones se determinó cierto porcentaje en peso para cada material que conforman el diseño para los especímenes.

- Agregado grueso pasa 3/4" y retiene 1/2" se pesan 10800 gramos
- Agregado grueso pasa 1/2" y retiene tamiz No. 4 se pesan 13800 gramos
- Agregado fino pasa tamiz No. 4 se pesan 35400 gramos

A cada espécimen se compone de 1200 gramos incluido el cemento asfáltico, así se determinará con los respectivos ensayos correspondientes para el diseño Marshall.

## 4.1.2 Fase 2

### 4.1.2.1 *Ensayos de laboratorio para los agregados*

Los ensayos que se presentan a continuación son los respectivos para determinar las propiedades mecánicas de los agregados extraídos del río pamplonita los cuales se emplearon para la realización de los especímenes (briquetas) para al final determinar la estabilidad y flujo que arroja el ensayo Marshall.

- Granulometría
- Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de los ángeles (Abrasión de los agregados)
- Equivalente de arena
- Porcentajes de caras fracturadas
- Índice de alargamiento y aplanamiento
  - Determinación de la solidez de los agregados usando sulfatos de sodio o sulfato de magnesio

### 4.1.2.2 *Granulometría.*

El ensayo granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de los agregados utilizados para la mezcla, para ello se utiliza una serie granulométrica que indica la norma, (**Ver anexo 3**). (unicauca, 2017)

En la **Tabla 7** se muestra la serie de tamices usada para una mayor distribución de las partículas en el ensayo, y los pesos retenidos obtenidos en cada tamiz de la serie.

**Tabla 7**  
Agregado grueso TMN 3/4"

<b>tamiz</b>	<b>abertura (mm)</b>	<b>**peso (gr)</b>	<b>9968 peso retenido</b>
3/4	19		-
1/2	12,5		6768,3
3/8	9,5		2661,5
No. 4	4,75		328,9
8	2,36		17,2
10	1,18		27
16	0,25		4,5
30	0,6		9,9
40	0,425		3,7
50	0,3		10,1
80	0,18		25,2
100	0,15		9,9
200	0,075		26,4
p. 200			99,7

**\*\*Nota:** El peso que se muestra en la parte superior de la tabla indica la muestra total que se utilizó para el ensayo granulométrico.

La **Tabla 8** muestra la serie de tamices usada como indica la norma y especificaciones Invias 2013 Art. 450 y los pesos retenidos obtenidos en cada tamiz de la serie.

**Tabla 8**  
Agregado grueso TMN 3/4" serie tamices que indica la norma

<b>tamiz</b>	<b>abertura (mm)</b>	<b>**peso (gr)</b>	<b>9968 peso retenido</b>
3/4	19		-
1/2	12,5		6768,3
3/8	9,5		2661,5
No. 4	4,75		328,9
10	1,18		27
40	0,425		3,7
80	0,18		25,2
200	0,075		26,4
p. 200			99,7

**\*\*Nota:** El peso que se muestra en la parte superior de la tabla indica la muestra total que se utilizó para el ensayo granulométrico.

De forma similar se obtuvieron los datos del laboratorio de granulometría para los agregados de TMN 1/2" y TMN 3/8" se muestran respectivamente en la sección de anexos (**Ver anexo 4, 5,**

6, 7) indicando que son dos tablas de obtención de datos para cada uno de los TMN, una con la serie estándar y la otra con la serie que especifica la norma.

#### ***4.1.2.3 Desgaste en la máquina de los ángeles***

En los agregados gruesos una de las propiedades físicas más importantes en el diseño de mezclas es la resistencia al desgaste o abrasión.

Los agregados deben tener una resistencia al desgaste durante la preparación, colocación, compactación y en la vida útil del pavimento ya que debe garantizar la movilidad a los vehículos ya sea de tránsito ligero, medio, pesado.

El objeto de este ensayo es determinar la resistencia al desgaste con una muestra representativa haciendo uso de la máquina de los ángeles.

En el **Anexo 8** se observan los datos obtenidos para realizar el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles teniendo en cuenta la gradación **B** como se muestra en el **Anexo 9** para los agregados que proporciona el río Pamplonita.

#### ***4.1.2.4 Porcentaje de caras fracturadas***

El propósito es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura para agregados usados en capas superficiales de pavimento.

Las especificaciones difieren en el número de caras fracturadas requeridas en una partícula fracturada, y también difieren en cual criterio utilizar, si el porcentaje en peso o el porcentaje por conteo de partículas. Si la especificación no lo define con claridad, utilice el criterio de al menos una cara fracturada.

En el **Anexo 10**, están los datos tomados en el laboratorio para la realización de los cálculos utilizando las ecuaciones que se muestran a continuación y también se muestra el resultado de % de caras fracturadas.

$$C = \left(\frac{B}{A}\right) * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$E = C * D \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\% \text{ DE CARAS FRACTURADAS} = \frac{\sum E}{\sum D} \quad (\text{Ecuación 3})$$

#### 4.1.2.5 Índice de alargamiento y aplanamiento

El ensayo de índice de aplanamiento consiste en dos operaciones sucesivas de tamizado. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones  $d_i/D_i$ . Cada una de las fracciones granulométricas  $d_i/D_i$  se criba a continuación empleando para ello tamices de barras paralelas y separadas  $3/5[(d_i+D_i)/2]$ , las partículas que pasen son consideradas planas. Cuando no se disponga de tamices de barras paralelas se pueden utilizar el calibrador tradicional de espesor, para separar las partículas planas, (**Ver Anexo 11**).

El ensayo de índice de alargamiento consiste en dos operaciones sucesivas. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones  $d_i/D_i$ . Cada fracción se analiza utilizando el calibrador de alargamiento, para separar las partículas largas, (**Ver Anexo 12**).

En el **Anexo 11**, se observan los resultados obtenidos en el laboratorio, para llegar a calcular en este caso el índice de aplanamiento, y se utilizaron las ecuaciones 4 y 5.

$$\% \text{ RET. CAL. POR } \% \text{ RET. GRA. ORIGI} = \% \text{ RET. GRAD. INICIAL} * \% \text{ RET. CALI.} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\text{INDICE DE APLANAMIENTO} = \frac{\sum \% \text{ RET. CALIBRADOR POR } \% \text{ RET. RET. INICIAL}}{\sum \% \text{ RETENIDA GRAD. INICIAL}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde.

% ret. Cal. Por % ret. Gra. Origi = porcentaje retenido calibrador por porcentaje retenido gradación original.

% ret. Grad. Inicial \* % ret. Cali. = porcentaje retenido gradación inicial \* porcentaje retenido calibrador.

En el **Anexo 12**, se observan los resultados obtenidos en el laboratorio, para llegar a calcular en este caso el índice de alargamiento y haciendo uso de las ecuaciones 6, 7.

$$\% \text{RET. CAL. POR } \% \text{RET. GRA. ORIGI} = \% \text{RET. GRAD. INICIAL} * \% \text{RET. CALI.} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\text{INDICE DE APLANAMIENTO} = \frac{\sum \% \text{RET. CALIBRADOR POR } \% \text{RET. RET. INICIAL}}{\sum \% \text{RETENIDA GRAD. INICIAL}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde.

% ret. Cal. Por % ret. Gra. Origi = porcentaje retenido calibrador por porcentaje retenido gradación original.

% ret. Grad. Inicial \* % ret. Cali. = porcentaje retenido gradación inicial \* porcentaje retenido calibrador.

#### ***4.1.2.6 Determinación de la solidez de los agregados usando sulfatos de sodio o sulfatos de magnesio***

Mediante este método se puede obtener una información útil para juzgar la calidad de los agregados que han de estar sometidos a la acción de los agentes atmosféricos, sobre todo cuando no se dispone de datos sobre el comportamiento de los materiales que se van a emplear, en las condiciones climatológicas de la obra. Se llama la atención sobre el hecho que los resultados que se obtienen varían según la sal que se emplee y que hay que tener cuidado al fijar los límites en las especificaciones en que se incluya este ensayo.

En el **Anexo 13**, se observan los datos obtenidos en el laboratorio para realizar el cálculo de la solidez de los agregados.

#### 4.1.2.7 *Equivalente de arena*

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz de 4,75 mm (N.º 4), (**Ver tabla 22**).

**Tabla 9**

*Ensayo equivalente de arena*

<b>pruebas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>probeta no.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
a. lectura de arena	79	79	78	
b. lectura de arcilla	148	146	148	<b>promedio</b>
c. equivalente de arena	53,4	54,1	52,7	53,4

#### 4.1.2.8 *Preparación de los especímenes (briquetas) para realizar el ensayo Marshall*

En este paso se indica el procedimiento que se ejecutó en el laboratorio Copavicol de la Trituradora la Roca en Cúcuta Norte de Santander.

La realización de los especímenes (briquetas) consiste en la separación de los agregados utilizados como se indica anteriormente, teniendo en cuenta la granulometría y demás ensayos propuestos en el proyecto.

Para las briquetas se utilizaron 1200 gramos de muestra incluido el porcentaje de asfalto que para esta investigación se optó por tener en cuenta cinco porcentajes de asfalto 4.5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5%. Y se deben realizar 3 especímenes (briquetas) por cada porcentaje de asfalto y en secuencia de 0.5 por ciento de asfalto para obtener en las diferentes curvas del ensayo Marshall con el porcentaje óptimo de asfalto.

Los respectivos valores de dosificación para la fabricación de los especímenes (briquetas) se pueden observar en la sección de anexos como. **“Dosificación de muestra para la fabricación de los especímenes para realizar el ensayo Marshall”**

Lo siguiente es preparar la mezcla en caliente con temperatura de 140° a 150° y agregarla al molde de compactación Y se procede a dar 75 golpes por cada cara de la briqueta con el martillo de compactación.

#### **4.1.2.9 Determinación del peso específico**

En este ensayo se procede a calcular el peso específico de cada espécimen (briqueta) para este caso 30 briquetas, 3 para cada porcentaje de asfalto.

Después de tener las briquetas terminadas y reposadas 24 horas, se procede hacer la limpieza de las mismas para evitar desprendimientos de materiales sueltos que me puedan afectar en el peso de las briquetas.

- Se toman los pesos de los especímenes (briquetas) seco al aire con balanza con discrepancia de 0.1 gramos.
- Después se toman los pesos de las briquetas sumergidos durando 2 minutos a este se pesó se conoce como peso aire superficialmente seco saturado (AIRE SSS).
- El siguiente peso es el peso sumergido superficialmente seco saturado (AGUA SSS).

$$PESO ESPECIFICO = \frac{PESO SECO AIRE}{(PESO AIRE SSS - PESO AGUA SSS)} \quad (\text{Ecuación 8})$$

- Con la ecuación 8 se calculan los pesos específicos de cada una de las briquetas teniendo en cuenta que el diseño tiene 3 por cada porcentaje de asfalto y luego sacar el promedio para obtener la curva de peso específico.

Los respectivos pesos que se obtienen para hacer el cálculo del peso específico para cada espécimen son “Peso seco al aire, Peso aire sss, Peso agua sss” para las respectivas mezclas se muestran en los anexos 14, 15, 16, 17, 18, 19.

#### ***4.1.2.10 Determinación de la estabilidad y el flujo***

La estabilidad y flujo son los valores que se determinan usando la maquina Marshall, siendo la estabilidad la resistencia que tiene la mezcla y el flujo medida de elasticidad de la mezcla.

- Se toman los especímenes y se organizan según el contenido de asfalto, luego se prepara el baño maría a 60° C (más o menos 1°C).
- Se agregan los especímenes uno a uno teniendo en cuenta un intervalo de tiempo prudente entre las mismas, cada espécimen debe durar 30 minutos en el baño maría manteniéndose la temperatura anterior constante.
- Luego de que cumpla 30 minutos el espécimen se toma con un pañuelo y se seca superficialmente y se pasan al anillo Marshall.
- Luego se debe poner en marcha la maquina Marshall y esperar que suceda la falla del espécimen, y anotar el valor de estabilidad y flujo proporcionado por los medidores.

#### **4.1.3 Fase 3**

##### ***4.1.3.1 Análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio***

A continuación, se hace un análisis de los resultados obtenidos en los respectivos ensayos mencionados anteriormente.

##### ***4.1.3.2 Análisis granulométrico***

Análisis de los resultados obtenidos en la granulometría, en la sección de anexos se encuentran los resultados obtenidos en el laboratorio (en las Tablas 10, 11 y Anexos 4, 5, 6, 7) basados en esos datos se calculó el porcentaje que pasa para cada agregado y su respectiva curva comparándola con las curvas granulométricas que exige la norma ya que esta se debe encontrar dentro de las dos curvas estándar que se encuentra en la norma. **(mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico) art-450).**

Los porcentajes que pasa por la serie de tamices que indica la norma para el cálculo de la curva granulométrica que debe coincidir dentro de estas dos curvas. (**Ver anexo 20**).

La **Tabla 10** muestra la serie de tamices usada para una mayor distribución de las partículas en el ensayo, el porcentaje retenido y el porcentaje que pasa, teniendo en cuenta los datos de la **Tabla 7** en cada tamiz de la serie.

**Tabla 10**  
*Agregado grueso TMN 3/4"*

tamiz	**peso (gr)	9868,3 % retenido	% pasa
3/4		-	100
1/2		67,9	32,1
3/8		26,7	5,4
no. 4		3,3	2,1
8		0,2	1,9
10		0,0	1,9
16		0,0	1,9
30		0,1	1,8
40		0,0	1,8
50		0,1	1,7
80		0,3	1,4
100		0,1	1,3
200		0,3	1,0
p. 200		1,0	

\*\*Nota: El peso que se muestra en la parte superior de la tabla indica la muestra total que se utilizó para el ensayo granulométrico.

La **Tabla 11** muestra la serie de tamices usada para una mayor distribución de las partículas en el ensayo, el porcentaje retenido y el porcentaje que pasa, teniendo en cuenta los datos de la **Tabla 8** en cada tamiz de la serie.

**Tabla 11**

*Agregado grueso TMN 3/4" serie tamices que indica la norma*

tamiz	**peso (gr)	9868,3 % retenido	% pasa
3/4		-	100
1/2		67,9	32,1
3/8		26,7	5,4
no. 4		3,3	2,1
10		0,2	1,9
40		0,2	1,7
80		0,3	1,4
200		0,4	1,0
p. 200		1,0	

**\*\*Nota:** El peso que se muestra en la parte superior de la tabla indica la muestra total que se utilizó para el ensayo granulométrico.

De forma similar se obtuvieron los cálculos para la granulometría de los agregados de TMN 1/2" y TMN 3/8" que se muestran respectivamente en la sección de anexos (**Ver anexo 21, 22, 23, 24**) indicando que son dos tablas de obtención de datos para cada uno de los TMN, una con la serie estándar y la otra con la serie que especifica la norma.

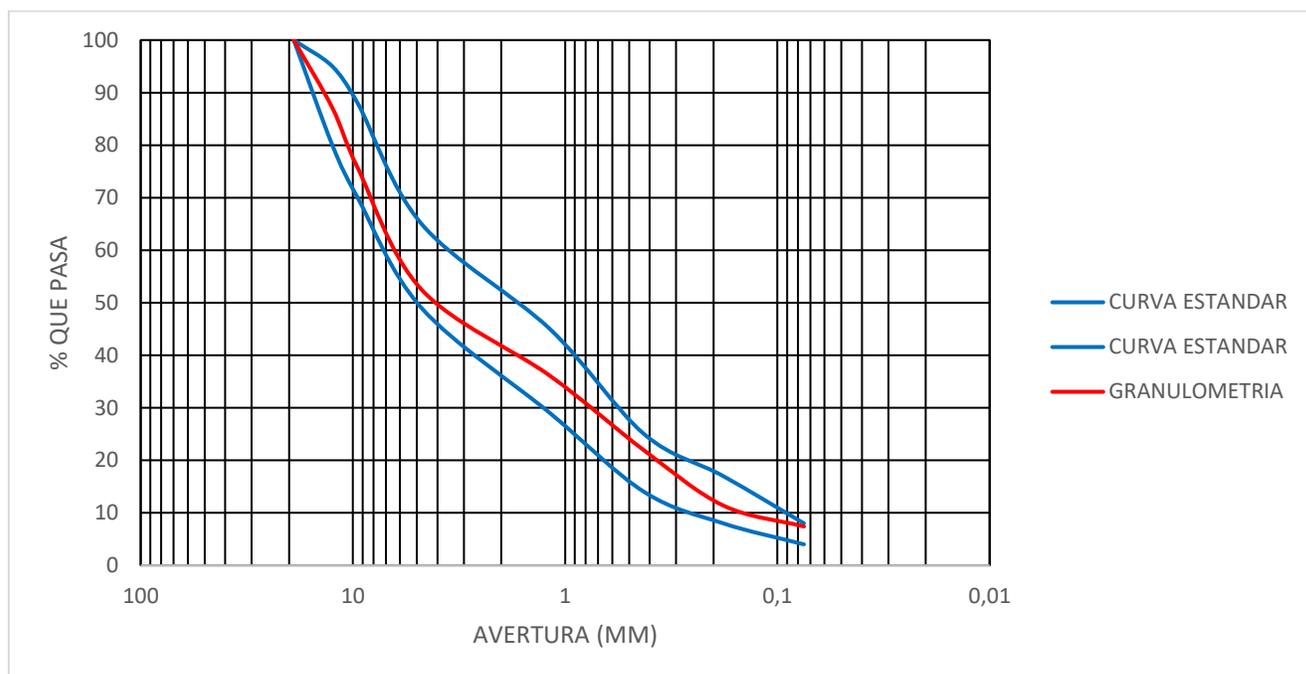
**Tabla 12**

*Resumen de las granulometrías*

tamiz	% a utilizar	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	4	8	10	40	80	200
norma inv. 450-13 mdc=19		-	100	80-95	70-88	-	49-65	-	27-45	14-25	8-17	4-8
triturado tmn 3/4" m=1a		-	100	32,1	5,4	-	2,1	-	1,9	1,7	1,4	1
triturado tmn 1/2" m=2a		-	100	96,8	68,1	-	8,9	-	6,7	4,9	3,3	2
triturado tmn 3/8" m=3a		-	-	-	100	-	84,8	-	58,1	34,8	17,5	11,4
triturado tmn 3/4" m=1a	<b>18</b>	-	18	5,8	1	-	0,4	-	0,3	0,3	0,3	0,2
triturado tmn 1/2" m=2a	<b>23</b>	-	23	22,3	15,7	-	2,1	-	1,5	1,1	0,8	0,5
triturado tmn 3/8" m=3a	<b>59</b>	-	59	59	59	-	50	-	34,3	20,5	10,3	6,7
$\Sigma$	<b>100</b>	-	<b>100</b>	<b>87,1</b>	<b>75,7</b>		<b>52,5</b>		<b>36,1</b>	<b>21,9</b>	<b>11,4</b>	<b>7,4</b>

El total de esta granulometría se multiplica por los porcentajes 18, 23, 59 y así obteniendo los porcentajes que pasa para poder dibujar la curva granulométrica.

Ya teniendo estos datos, se muestra ahora la curva granulométrica dentro de las curvas que proporciona la norma para que se dé el cumplimiento de las gradaciones de los agregados utilizados para las mezclas.



**Figura 3** Curvas granulométricas.

#### **4.1.3.3** *Desgaste en la máquina de los ángeles*

En el **Anexo 25**, se realiza el cálculo de los datos proporcionados por el **Anexo 8** que son los obtenidos en el laboratorio para el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles, aquí lo que se hace es calcular el porcentaje de desgaste de los materiales utilizados para la realización de la mezcla.

Los ensayos siguientes se mostraron los resultados en la metodología, que son porcentajes de cara fracturadas **Anexo 10**, índice de alargamiento y aplanamiento **Anexo 11** y **Anexo 12**, determinación de la solidez de los agregados usando sulfatos **Anexo 13** y el equivalente de arena que se muestra en la **Tabla 9**.

#### **4.1.3.4** *Peso específico*

A continuación, se analiza los resultados de los pesos específicos de todos los especímenes que se realizaron en el laboratorio, teniendo en cuenta que los pesos en el **AIRE**, **ARIE SSS**, **AGUA SSS**, se muestran en los anexos, en el caso de la mezcla 60-70 normalizada los peso están en los **Anexos 14, 15, 16** y para la mezcla 80-100 normal se muestran en los **Anexos 17, 18, 19**.

Los cálculos de los pesos específicos se obtuvieron mediante la ecuación.

$$PESO ESPECIFICO = \frac{PESO SECO AIRE}{(PESO AIRE SSS - PESO AGUA SSS)} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En el **Anexo 26**, se muestran los pesos específicos calculados para cada uno de los porcentajes de asfalto, teniendo en cuenta que se hacen 3 especímenes por porcentaje.

En la **Anexo 27**, se muestran los pesos específicos calculados para cada uno de los porcentajes de asfalto, teniendo en cuenta que se hacen 3 especímenes por porcentaje.

Ya teniendo los pesos específicos de las dos mezclas que se están investigando, se toman un promedio para realizar la gráfica de peso específico y ver el comportamiento de la cantidad de asfalto en las diferentes mezclas.

En la **Tabla 13**, se observan los promedios de los pesos específicos mencionados en la **Anexo 26** para la mezcla 60-70 normalizada.

**Tabla 13***Promedio del peso específico mezcla 60-70 normalizada*

<b>mezcla 60-70 normalizada</b>	
4,5 %	2,279
5 %	2,303
5,5 %	2,322
6 %	2,298
6,5 %	2,283

En la **Tabla 14**, se observan los promedios del peso específico mencionados en la **Anexo 27** para la mezcla 80-100 normal.

**Tabla 14***Promedio del peso específico mezcla 80-100 normal*

<b>mezcla 80-100 no normalizada</b>	
4,5 %	2,290
5 %	2,329
5,5 %	2,348
6 %	2,304
6,5 %	2,339

Con los promedios de los pesos específicos para cada espécimen se procedió a graficar dichos datos para así obtener las respectivas curvas y ver los pesos específicos por cada porcentaje de asfalto como se muestra en la Figura 4 y 5.



**Figura 4** Curva de peso específico mezcla 60-70 normalizada



**Figura 5** Curva de peso específico mezcla 80-100 normal

#### 4.1.3.5 Cálculo del diseño Marshall para la mezcla 60-70 normalizada

Por último, se hace el diseño Marshall teniendo ya los resultados de todos los ensayos anteriores y también los datos que arroja la maquina Marshall para la estabilidad y el flujo.

La **Tabla 15**, se pueden observar los valores de estabilidad y flujo para la mezcla 60-70 normalizada.

**Tabla 15**

*Valores de estabilidad y flujo mezcla 60-70 normalizada.*

porcentajes	briqueta	estabilidad	flujo
	1	330	13
4,5%	2	225	14
	3	210	12
	4	360	14
5,0%	5	400	14
	6	250	12
	7	311	13
5,5%	8	388	14
	9	307	14
	10	256	14
6,0%	11	375	14
	12	318	15
	13	243	15,5
6,5%	14	228	16
	15	222	15

**Nota.** Los valores dados de estabilidad están dados en libras y los valores de flujo están dados en 1/100 pulgadas, el valor de estabilidad se debe multiplicar al momento de hacer el diseño por una constante k, **Kanillo de carga 6 mil libras = 9.1768 libras por división.**

**\*\*La Tabla 16 se optó por colocarla horizontal debido a que el formato es muy grande\*\***

**Tabla 16**  
*Diseño Marshall para mezcla 60-70 normalizada*

mezcla No a	% de asfalto b	peso gramos espesor c	peso gramos		volumen cc f	peso específico		volumen % total			% de vacíos		peso unitario lb/pie^3 o	estabilidad		flujo 0,01'' r	
			en aire d	en agua e		actual g	teórico h	asfalto i	agregados j	vacíos k	agregados l	mezcla total m		llenos n	medida p		corregido q
1		64	1167,4	1169,1	659,6	2,291								<b>3028</b>	2992	13	
2	4,5	63,9	1180,6	1185,1	666	2,274								<b>2065</b>	2044	14	
3		63,9	1188,8	1192,3	668,9	2,271								<b>1927</b>	1908	12	
promedio						<b>2,279</b>	<b>2,441</b>	<b>10,11</b>	<b>83,26</b>	<b>6,63</b>	<b>16,74</b>	<b>6,63</b>	<b>60,42</b>	<b>142,21</b>		<b>2315</b>	<b>13,0</b>
4		63,8	1176,6	1178,2	668,2	2,307								<b>3304</b>	3281	14	
5	5	63,7	1186,1	1186,5	675,8	2,322								<b>3671</b>	3652	14	
6		63,7	1198,5	1201,8	676,1	2,280								<b>2294</b>	2283	12	
promedio						<b>2,303</b>	<b>2,423</b>	<b>11,36</b>	<b>83,70</b>	<b>4,94</b>	<b>16,30</b>	<b>4,94</b>	<b>69,68</b>	<b>143,71</b>		<b>3072</b>	<b>13,3</b>
7		63,5	1200,6	1201,1	683,5	2,320								<b>2854</b>	2854	13	
8	5,5	63,4	1199,1	1199,4	681,8	2,317								<b>3561</b>	3571	14	
9		63,4	1190,7	1191,3	680,5	2,331								<b>2817</b>	2826	14	
promedio						<b>2,322</b>	<b>2,405</b>	<b>12,60</b>	<b>83,96</b>	<b>3,44</b>	<b>16,04</b>	<b>3,44</b>	<b>78,53</b>	<b>144,92</b>		<b>3084</b>	<b>13,7</b>
10		63,7	1191,1	1191,6	671	2,288								<b>2349</b>	2338	14	
11	6	63,7	1202,1	1202,6	683	2,314								<b>3441</b>	3424	14	
12		63,6	1180	1185	670	2,291								<b>2918</b>	2912	15	
promedio						<b>2,298</b>	<b>2,388</b>	<b>13,60</b>	<b>82,62</b>	<b>3,78</b>	<b>17,38</b>	<b>3,78</b>	<b>78,23</b>	<b>143,37</b>		<b>2891</b>	<b>14,3</b>
13		63,8	1184,8	1185	667	2,287								<b>2230</b>	2214	15,5	
14	6,5	63,8	1190,7	1191,1	670	2,285								<b>2092</b>	2078	16	
15		63,8	1189,8	1190,8	668	2,276								<b>2037</b>	2023	15	
promedio						<b>2,283</b>	<b>2,371</b>	<b>14,63</b>	<b>81,65</b>	<b>3,72</b>	<b>18,35</b>	<b>3,72</b>	<b>79,74</b>	<b>142,44</b>		<b>2105</b>	<b>15,5</b>

#### 4.1.3.5.1 Nomenclatura tabla 42

El valor de **c**, es medido en el laboratorio es el espesor con el que sale el espécimen después de terminar su compactación, y los valores de **d, e, f, g** son los que se muestran en los cálculos de peso específico.

$$H = \frac{100}{\frac{\% \text{ DE ASFALTO}}{Ps \text{ DEL ASFALTO}} + \frac{(100 - \% \text{ DE ASFALTO})}{Ps \text{ DE LOS AGREGADOS}}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

peso específico del asfalto = 1.014 gr/cc

peso específico del agregado = 2.614 gr/cc

$$I = \frac{B * G}{Ps \text{ ASFALTO}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

peso específico del asfalto = 1.014 gr/cc

$$J = \frac{(100 - B) * G}{Ps \text{ AGREGADO}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

peso específico del agregado = 2.614 gr/cc

$$K = 100 - I - J \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$L = 100 - J \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$M = 100 - \left( \frac{100 * G}{H} \right) \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$N = \left( \frac{I}{I + M} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$O = 62.4 * G \quad (\text{Ecuación 17})$$

Las curvas correspondientes para obtener el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla 60-70 normalizada se encuentran en los anexos 28, 29, 30, 31, 32.

**Tabla 17**  
*Diseño Marshall para mezcla 60-70 normal*

% de asfalto	peso unit. Lb/pie <sup>3</sup>	% de vacíos en los agregados	Estabilidad	% de vacíos con aire	flujo	vacíos llenos de asfalto
4,5	139,5	17,5	1634	7,35	9,8	57,6
5	141,4	16,8	2203	5,26	11,4	68,2
5,5	142,4	16,6	2374	3,93	12,5	76,1
6	142,3	17,2	2118	3,61	13,38	79
6,5	141,8	17,9	1606	2,94	14,2	83,3

Las curvas correspondientes para obtener el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla 60-70 normal se encuentran en los anexos 33, 34, 35, 36, 37.

#### 4.1.3.5.2 *Calculo diseño Marshall para mezcla 80-100 normal*

**Tabla 18**  
*Valores de estabilidad y flujo mezcla 80-100 normal*

porcentajes	briqueta	estabilidad	flujo
	16	235	11
4,5%	17	262	10,5
	18	234	10,5
	19	275	12,5
	20	347	14
5,0%	21	306	14
	22	328	14
	23	301	15
5,5%	24	307	12
	25	341	16
	26	263	13
6,0%	27	266	15
	28	225	16
	29	237	15
6,5%	30	247	15

**Nota.** Los valores dados de estabilidad están dados en libras y los valores de flujo están dados en 1/100 pulgadas, el valor de estabilidad se debe multiplicar al momento de hacer el diseño por una constante k, **Kanillo de carga 6 mil libras = 9.1768 libras por división.**

**\*\*La tabla 19 se optó por colocarla horizontal debido a que el formato es muy grande\*\***

**Tabla 19**  
*Diseño Marshall para mezcla 80-100 normal*

mezcla No a	% de asfalto b	peso gramos			volumen cc f	peso específico		volumen % total				% de vacíos		peso unitario lb/pie <sup>3</sup> o	estabilidad		flujo 0,01" r
		espesor c	en aire d	en agua e		actual g	teórico h	asfalto i	agregados j	vacíos k	agregados l	mezcla total m	llenos n		medida p	corregido q	
1		64	1172	1175,1	655	2,253									<b>2157</b>	2131	11
2	4,5	63,9	1185	1195	670	2,257	2,254								<b>2404</b>	2380	10,5
3		63,9	1198	1200,1	668	2,251									<b>2147</b>	2126	10,5
promedio						<b>2,254</b>	<b>2,441</b>	<b>10,003</b>	<b>82,348</b>	<b>7,649</b>	<b>17,652</b>	<b>7,649</b>	<b>56,667</b>	<b>140,650</b>		<b>2212</b>	<b>10,7</b>
4		63,8	1175	1178	665	2,290									<b>2524</b>	2506	12,5
5	5	63,7	1185	1188	662	2,253									<b>3184</b>	3168	14
6		63,7	1193,3	1195,5	670	2,271									<b>2808</b>	2794	14
promedio						<b>2,271</b>	<b>2,423</b>	<b>11,200</b>	<b>82,548</b>	<b>6,252</b>	<b>17,452</b>	<b>6,252</b>	<b>64,175</b>	<b>141,733</b>		<b>2823</b>	<b>13,5</b>
7		63,5	1183	1190	675	2,297									<b>3010</b>	3010	14
8	5,5	63,4	1175	1180	673	2,318									<b>2762</b>	2771	15
9		63,4	1180	1189,5	671,5	2,278									<b>2817</b>	2826	12
promedio						<b>2,298</b>	<b>2,405</b>	<b>12,462</b>	<b>83,060</b>	<b>4,478</b>	<b>16,940</b>	<b>4,478</b>	<b>73,564</b>	<b>143,367</b>		<b>2869</b>	<b>13,7</b>
10		63,7	1180,1	1187	670	2,283									<b>3129</b>	3114	16
11	6	63,7	1180	1185,2	668	2,282									<b>2413</b>	2401	13
12		63,6	1200,5	1201	673	2,274									<b>2441</b>	2436	15
promedio						<b>2,279</b>	<b>2,388</b>	<b>13,487</b>	<b>81,963</b>	<b>4,551</b>	<b>18,037</b>	<b>4,551</b>	<b>74,771</b>	<b>142,226</b>		<b>2650</b>	<b>14,7</b>
13		63,8	1172	1180	665	2,276									<b>2065</b>	2050	16
14	6,5	63,8	1188	1198	668,3	2,243									<b>2175</b>	2160	15
15		63,8	1180	1185	665	2,269									<b>2267</b>	2251	15
promedio						<b>2,263</b>	<b>2,371</b>	<b>14,504</b>	<b>80,930</b>	<b>4,566</b>	<b>19,070</b>	<b>4,566</b>	<b>76,055</b>	<b>141,185</b>		<b>2154</b>	<b>15,3</b>

#### 4.1.3.5.3 Nomenclatura tabla 44

El valor de **c**, es medido en el laboratorio es el espesor con el que sale el espécimen después de terminar su compactación, y los valores de **d, e, f, g** son los que se muestran en los cálculos de peso específico.

$$H = \frac{100}{\frac{\% DE ASFALTO}{Ps DEL ASFALTO} + \frac{(100 - \% DE ASFALTO)}{Ps DE LOS AGREGADOS}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

peso específico del asfalto = 1.014 gr/cc

peso específico del agregado = 2.614 gr/cc

$$I = \frac{B * G}{Ps ASFALTO} \quad (\text{Ecuación 19})$$

peso específico del asfalto = 1.014 gr/cc

$$J = \frac{(100 - B) * G}{Ps.AGREGADO} \quad (\text{Ecuación 20})$$

peso específico del agregado = 2.614 gr/cc

$$K = 100 - I - J \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$L = 100 - J \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$M = 100 - \left( \frac{100 * G}{H} \right) \quad (\text{Ecuación 23})$$

$$N = \left( \frac{I}{I + M} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$O = 62.4 * G \quad (\text{Ecuación 25})$$

Las curvas correspondientes para obtener el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla 80-100 normal se encuentran en los anexos 38, 39, 40, 41, 42.

#### 4.1.3.6 *Porcentaje óptimo de asfalto mezcla 60-70 normalizada*

La **Tabla 20**, se observan los valores de porcentajes óptimos para las curvas de peso unitario, % de vacíos y estabilidad

**Tabla 20**  
*% de asfaltos óptimos mezcla 60-70 normalizada*

<b>porcentaje de asfalto óptimo</b>	
peso unitario	5,49
% de vacíos en agregados	5,4
estabilidad	5,2
% de asfalto óptimo	5,4

La **Tabla 21**, se observan los valores de porcentajes óptimos para las curvas de peso unitario, % de vacíos y estabilidad

#### 4.1.3.7 *Porcentaje óptimo de asfalto mezcla 60-70 normal*

**Tabla 21**  
*% de asfaltos óptimos mezcla 60-70 normal*

<b>porcentaje de asfalto óptimo</b>	
peso unitario	5,61
% de vacíos en agregados	5,4
estabilidad	5,46
% de asfalto óptimo	5,49

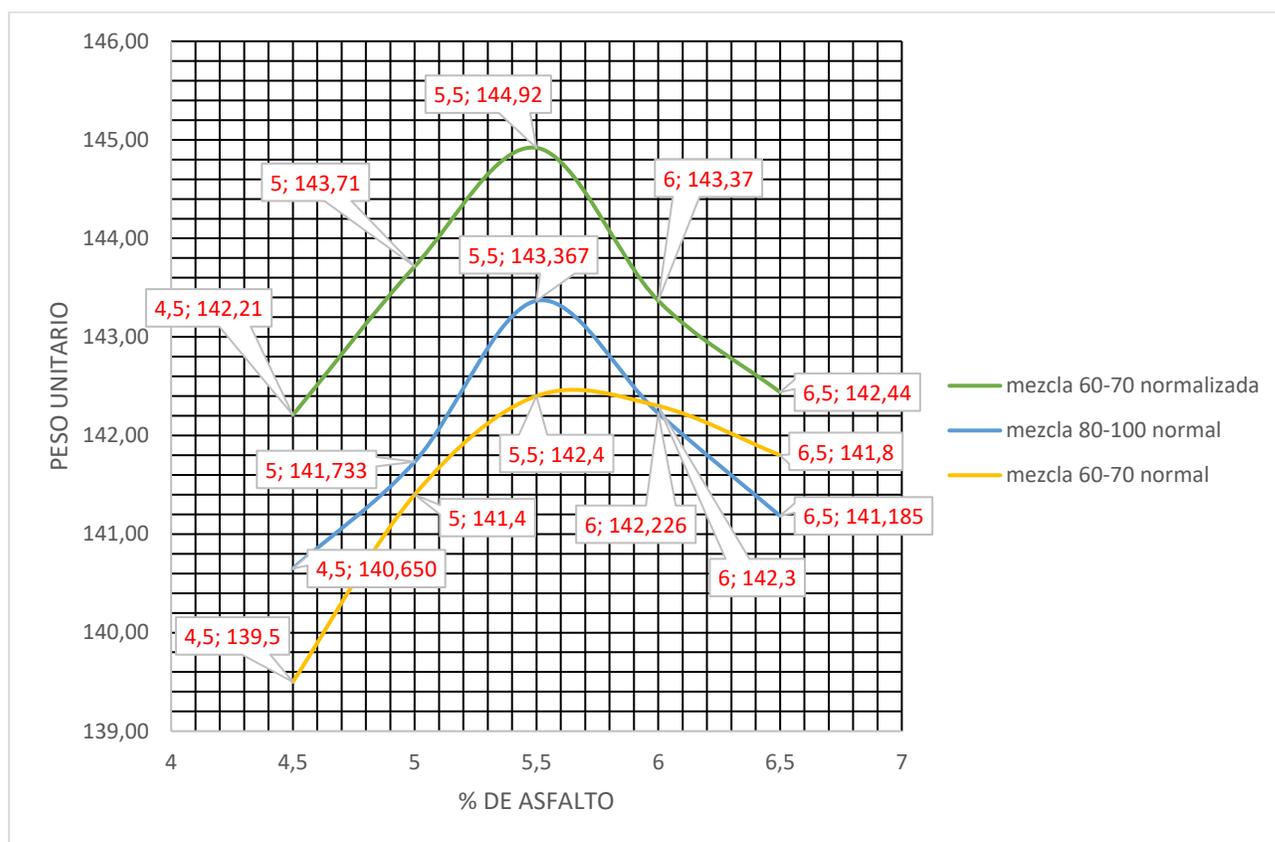
#### 4.1.3.8 *Porcentaje óptimo de asfalto mezcla 80-100 normal*

La **Tabla 22**, se observan los valores de porcentajes óptimos para las curvas de peso unitario, % de vacíos y estabilidad

**Tabla 22**  
*% de asfalto óptimo mezcla 80-100 normal*

porcentaje de asfalto óptimo	
peso unitario	5,5
% de vacíos en agregados	5,43
estabilidad	5,28
% de asfalto óptimo	5,4

**4.1.3.9 Comparación de curvas entre la mezcla 60-70 normalizada, mezcla 60-70 normal y la mezcla 80-100 normal**



**Figura 6** peso unitario vs % de asfalto

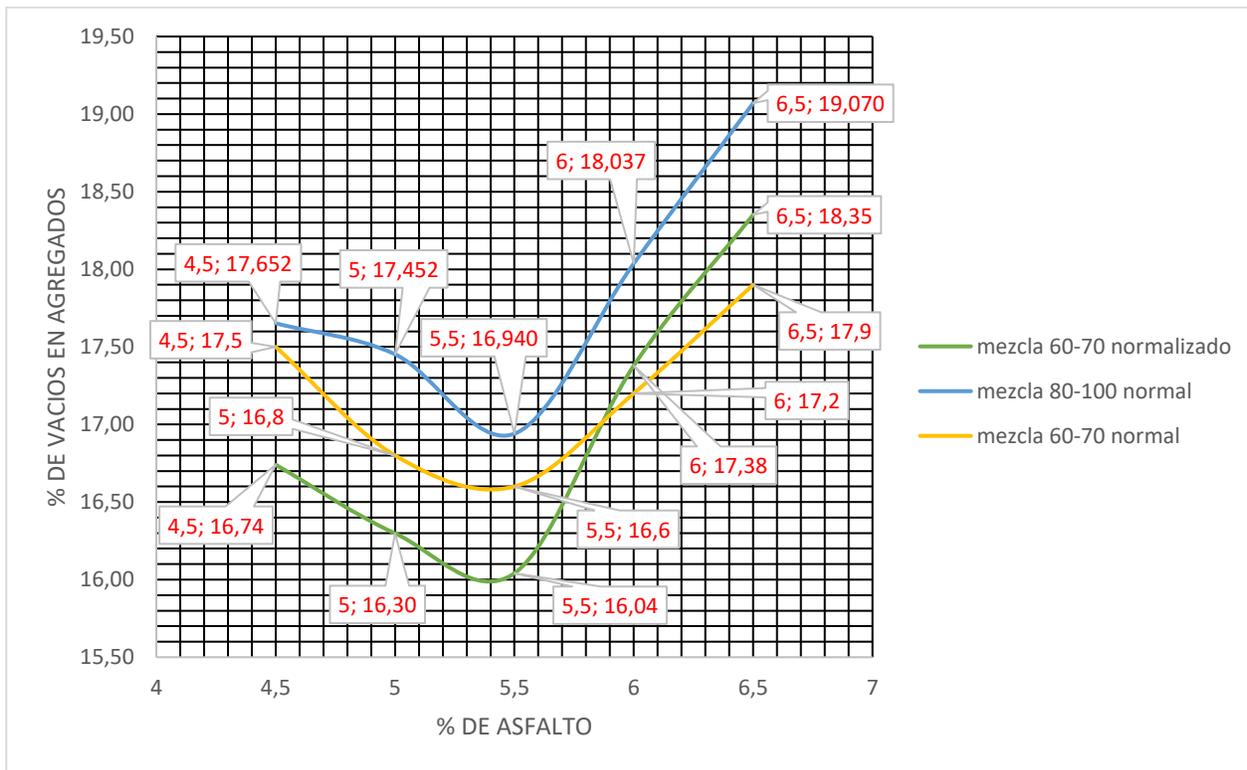


Figura 7 %de vacíos en agregados vs % de asfalto

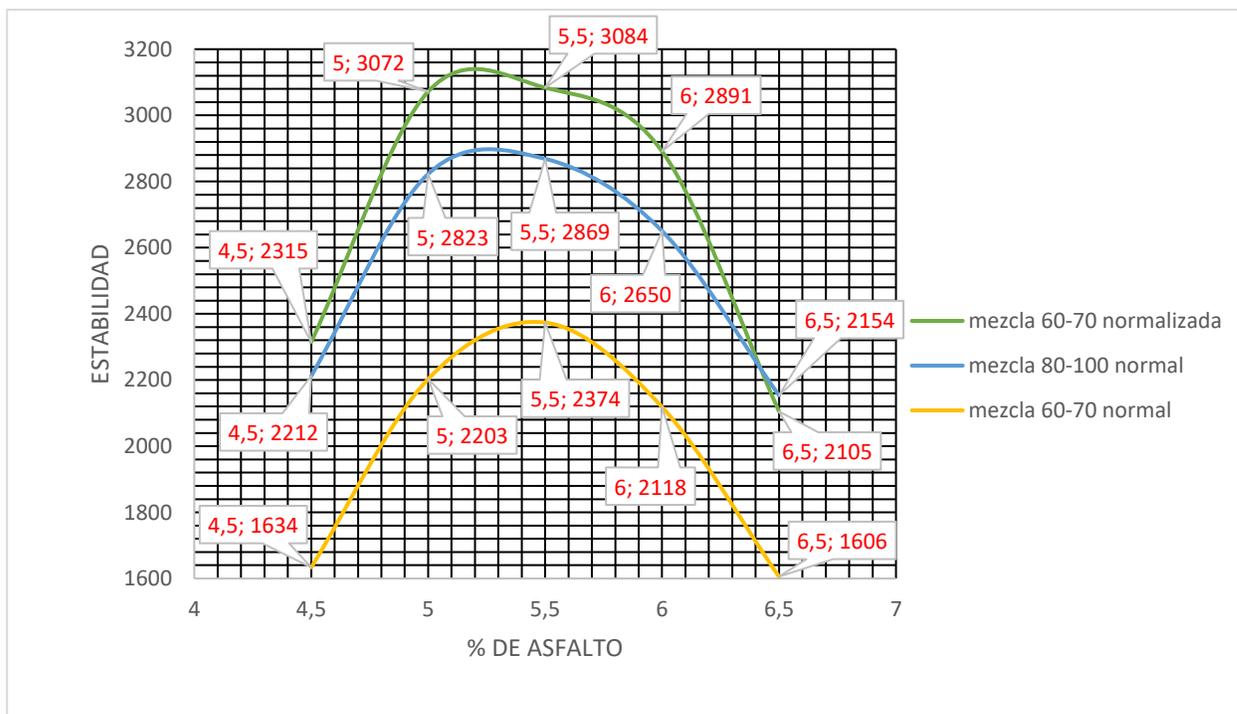
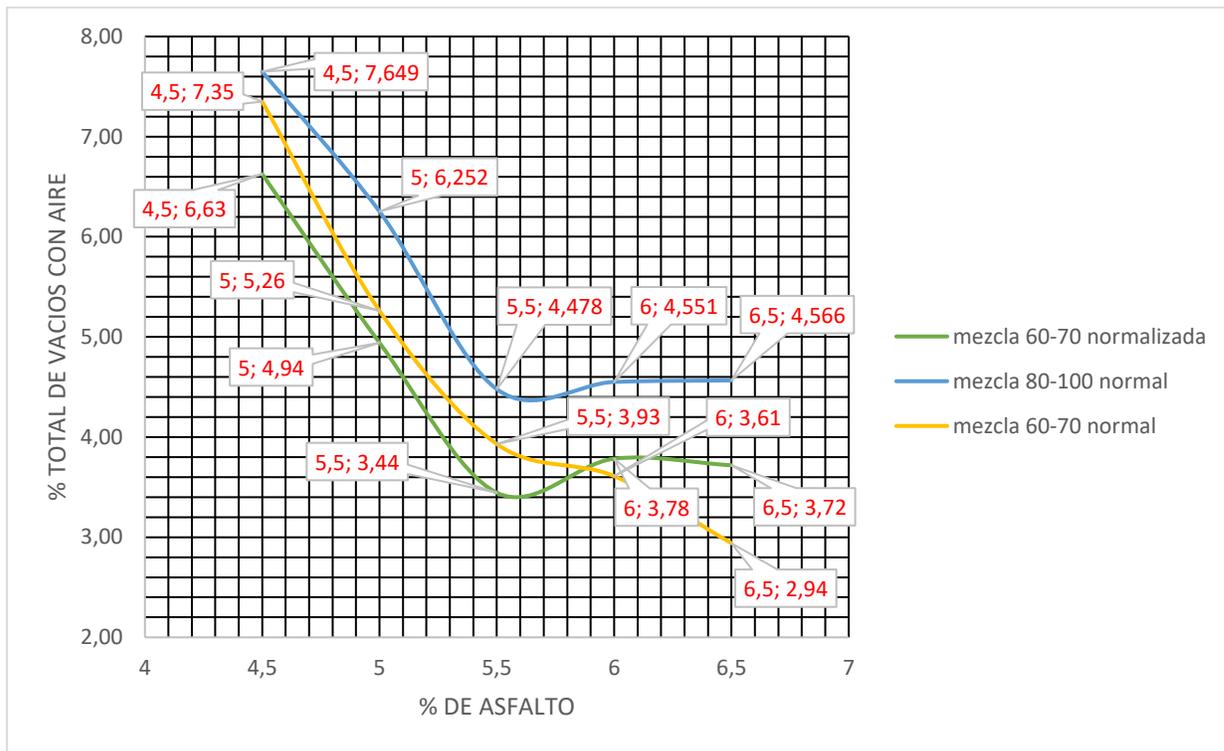
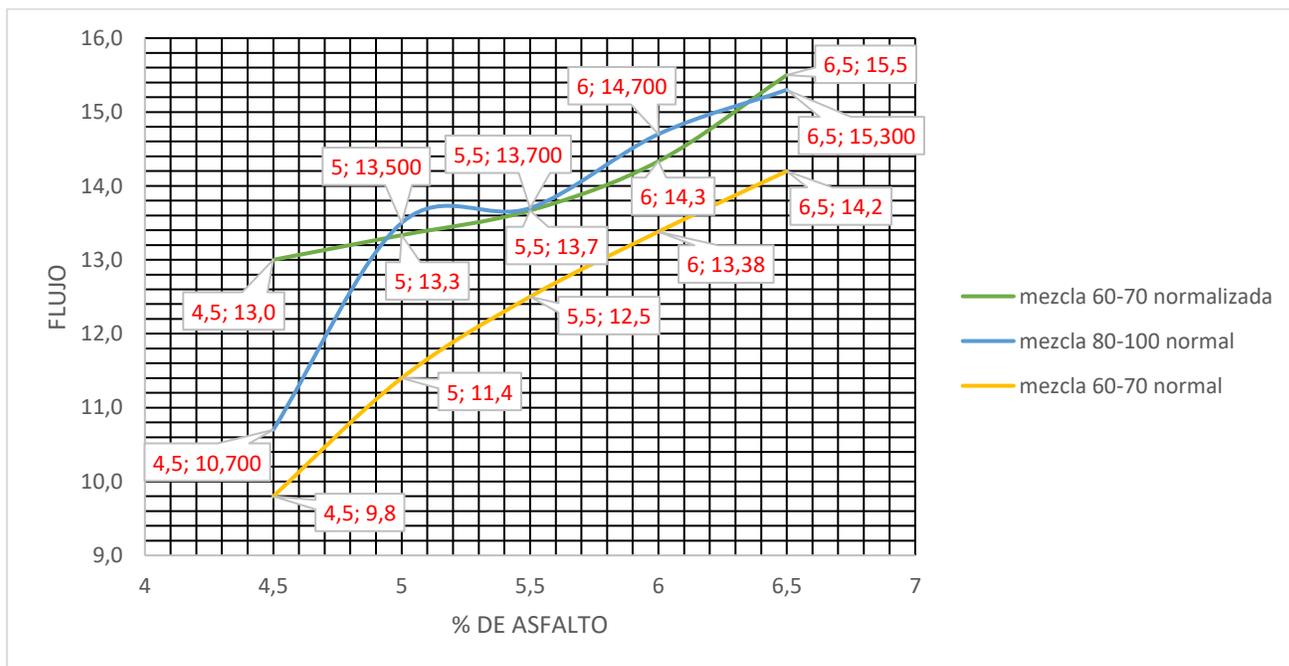


Figura 8 estabilidad vs % de asfalto



**Figura 9** % total de vacíos con aire vs % de asfalto



**Figura 10** flujo vs % de asfalto

## **5 Beneficios que aporta un diseño de mezcla mejorada con aditivo mejorador de adherencia de humedad del 1%**

Observando los resultados que se obtuvieron en esta investigación se puede decir que una mezcla con un mejorante puede conllevar a que se mejoren varias características de la mezcla, que en este caso la mezcla se preparó con un asfalto mejorado que contiene un aditivo de adherencia de humedad del 1% como se puede observar el peso específico (Ver anexo 26) de este asfalto se comporta de una manera uniforme con respecto a la mezcla normal (Ver anexo 27).

Se puede decir que esta mezcla conlleva a una mayor calidad comparándola con la mezcla normal como se observa en la figura 6 (peso unitario vs % de asfalto), figura 7 (% de vacíos en agregados vs % de asfalto), figura 8 (estabilidad vs % de asfalto) se evidencia que con un contenido de asfalto óptimo de 5,4% la mezcla 60-70 normalizada mejora mucho a comparación que la mezcla 60-70 normal, y aumenta la estabilidad en la mezcla y mantiene un porcentaje de asfalto considerado normal, además también puede mejorar características como las siguientes.

- Aumentar la rigidez a altas temperaturas de servicio mejorando la resistencia de las mezclas a la deformación permanente. (Fonseca, 2002)
- Mejorar la resistencia a fatiga de las mezclas. (Fonseca, 2002)
- Mejorar la adhesión de los agregados pétreos. (Fonseca, 2002)
- Reducir el endurecimiento en servicio, brindando una vida superior a la mezcla debido a la retención de sus ventajas iniciales. (Fonseca, 2002)
- Aumentar la viscosidad a bajas velocidades de corte, permitiendo mejores espesores de película en los agregados de las mezclas abiertas y reduciendo la exudación en tratamientos superficiales. (Fonseca, 2002)

- Reduce la rigidez en bajas temperaturas, previniendo las fisuraciones térmicas (Fonseca, 2002)
- Disminuir la susceptibilidad térmica en el rango de temperatura de servicio (Fonseca, 2002)

## **6 Análisis de la relación costo-calidad de las diferentes mezclas asfálticas.**

Como se puede observar en las diferentes graficas donde se hizo la respectiva comparación de las mezclas en estudio (Ver figura 6, 7, 8, 9,10) notamos que la calidad entre las tres mezcla varían, si se observan los anexos 43, 44, 45. Estos indican el precio por metro cubico de las mezclas, teniendo en cuenta que la mezcla mejorada va a brindar unas características mucho mejor, aporta un mayor rendimiento, se nota una mejor textura al momento de extenderla y también va a tener una mayor vida útil de servicio por ende el precio depende de la calidad de la mezcla ya que esta contiene un mejorante que va a elevar la calidad por consiguiente se ve un costo mayor a comparación de las otras dos mezclas, los precios mencionados ya son los establecidos por la empresa teniendo en cuenta el costo en materiales, mano de obra calificada. La mezcla 60-70 normal es una mezcla que va a tener comportamientos favorables en clima caliente por ser de baja penetración, pero es propensa a sufrir patologías tempranas teniendo en cuenta factores de compactación, mezclado por el cual esta mezcla es un poco más económica con relación a los precios que ofrece la empresa y va a contener una mayor cantidad de asfalto.

## **7 Evaluar el impacto de la investigación a nivel socio-económico.**

Los resultados obtenidos mostraron una mejoría en la resistencia (estabilidad) en la mezcla, tal como se puede observar en la figura 6, 7, 8, 9, 10. Donde el aumento de la estabilidad correspondiente a un porcentaje mayor, a comparación de la mezcla normal y también aumentando favorablemente en un porcentaje de flujo con respecto de las mezclas normales.

Esta mejora se refleja en una mayor durabilidad y comportamiento del pavimento para cualquiera de los climas; que en principio el costo que establece la empresa ver anexos 43, 44, 45 sería un poco más elevado teniendo en cuenta que al ser mejorada la mezcla, los precios de insumos aumentarían, pero analizándolo a largo plazo este costo económico de la (Quintana & Reyes Lizcano, 2012) mezcla se compensa aportando una mayor vida útil de servicio y favoreciendo unas características como se indican en el numeral 5 de este proyecto, y por otra parte también se vendría favorecidas las comunidades cercanas a la pavimentación del corredor vial, generando un impacto positivo en el progreso económico y social de la comunidad.

Este proyecto hace referencia a que las mezclas mejoradas conllevan que las vías nacionales puedan ofrecer una mayor durabilidad y resistencia a diferentes patologías que un pavimento normal sufre a edades tempranas.

## 8 Conclusiones

- Teniendo en cuenta los diseños que se hicieron en esta investigación y observando los datos se puede concluir que para un proyecto de pavimentación el diseño más favorable sería una mezcla normalizada 60-70 normalizada ya que su comportamiento en clima caliente y en clima frío van hacer mucho más conveniente que la mezcla 80-100 normal y la mezcla 60-70 normal.
- La mezcla 80-100 se realizó para observar el comportamiento de la misma en las diferentes curvas ya que es un asfalto de alta penetración.
- Observando los datos de los pesos específicos de las mezclas la que se ajusta mucho mejor a la norma y especificaciones INVIAS 2013 es la mezcla 60-70 normalizada que mantiene un comportamiento que se ajusta mucho mejor.
- La calidad entre la mezcla 60-70 normalizada, 80-100 normal y 60-70 normal no es de mayor envergadura, al momento de la fabricación de la mezcla por metro cúbico, es más favorable adquirir la mezcla 60-70 normalizada por su calidad.
- Tomando el resultado de porcentaje de asfalto óptimo de la mezcla 60-70 normalizada presenta unos valores favorables en el diseño, valores que están dentro de los rangos que exige la norma y por ende el porcentaje de asfalto óptimo de esta mezcla es de mejor calidad y que además presenta mejores características en el asfalto que con la comparada 60-70 normal.
- Observando el impacto socio-económico que genera la mezcla mejorada se concluye que este tipo de mezclas se puede proponer para proyectos de pavimentación que exija

una mayor durabilidad en la vida útil de servicio y generando un desarrollo social y económico a la comunidad.

## 9 Recomendaciones

- Cuando se va hacer ensayos de pavimentos se debe tener mucho cuidado al momento de tomar los pesos para realizar la mezcla de las briquetas por que al momento de hacer los cálculos los datos deben estar exactos.
- Mantener la temperatura ideal de los agregados (150 °C) y del asfalto (140°C – 150°C) por la curva reológica del asfalto ya que no se mantiene los parámetros que indica la norma sobre la temperatura se ve afectada las características optimas del asfalto.
- Al momento de hacer la compactación de las briquetas, se debe mantener una rata de compactación constante.

## 10 Bibliografía

- agenciacyta. (2010). *www.agenciacyta.org.ar*. Obtenido de <https://www.agenciacyta.org.ar/2010/06/mezclas-asfalticas-de-ultima-generacion/>
- Arkiplus. (2019). *Arkiplus*. Obtenido de Arkiplus: <https://www.arkiplus.com/historia-del-pavimento/>
- biblioteca.utb.edu.co*. (2018). Obtenido de <http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0039466.pdf>
- Fonseca, A. M. (2002). *Ingeniería de carreteras*. bogota D.C: Agora Editores.
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Gómez López, J. A. (2004). *Mezcla asfáltica*. Obtenido de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt255.pdf>
- Ideam. (2018). *www.ideam.gov.co*. Obtenido de [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co): <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>
- Invias. (2013). *Norma y especificaciones Invias 2013*. Bogota D.C.
- Invías. (2013). *Norma y especificaciones Invias 2013*. Bogota D.C.
- lifeder. (2018). *lifeder*. Obtenido de lifeder: <https://www.lifeder.com/investigacion-aplicada/>
- Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2012). *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. Bogota D.C: Ecoe Ediciones.
- tube, y. (2015). *www.youtube.com*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=33WmSZctcr4>
- Unicauca. (2017). *Análisis granulométrico*. Obtenido de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil>

unicauca. (2017). *Análisis granulométrico*. Obtenido de

[ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones\\_Normas\\_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-123-07.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-123-07.pdf)

upcommons.upc.edu. (2017). *upcommons*. Obtenido de

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14>

*you tube*. (2015). Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=33WmSZctcr4>