

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLAS  
ASFÁLTICAS CON AGREGADO PROCEDENTE DEL RIO SOGAMOSO Y  
MEJORADAS CON CEMENTO PORTLAND**

**RAFAEL JOSÉ BRITO MENDOZA  
DIEGO ARMANDO CORREDOR VARGAS**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2018**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLAS  
ASFÁLTICAS CON AGREGADO PROCEDENTE DEL RIO SOGAMOSO Y  
MEJORADAS CON CEMENTO PORTLAND**

**RAFAEL JOSE BRITO MENDOZA  
DIEGO ARMANDO CORREDOR VARGAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero  
Civil**

**Director del proyecto:  
Ing. Msc. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2018**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

**Jurado**

---

**Jurado**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto se lo queremos dedicar principalmente a Dios quien nos ha permitido seguir adelante bendiciéndonos, iluminándonos y guiándonos en cada decisión tomada para el bien de nuestras aspiraciones.

A nuestros padres por su apoyo incondicional durante nuestro proceso académico, quienes en los momentos de dificultad nos alentaron con su sabiduría para continuar y hacer posible el cumplimiento de esta meta.

Por último, a nuestros familiares, quienes siempre estuvieron pendientes de nuestro proceso de formación profesional, con sus consejos y palabras de ánimo nos impulsaron para alcanzar nuestros propósitos.

**RAFAEL JOSE BRITO MENDOZA  
DIEGO ARMANDO CORREDOR VARGAS**

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente agradecemos a Dios por darnos la vida, la salud y la fortaleza para no desfallecer ante los obstáculos presentados durante todo este camino, así mismo por permitirnos aprender y enriquecer nuestros conocimientos durante esta etapa de nuestras vidas.

A nuestros padres por brindarnos la educación, por inculcarnos los valores de la perseverancia, responsabilidad, respeto, compromiso y amor que fueron la base para nuestro crecimiento profesional y nuestras vidas.

A nuestro director de proyecto de grado el Ingeniero Julián André Galvis por sus conocimientos, dedicación y disposición empleada para garantizar el desarrollo del proyecto.

Al cuerpo de docentes de la facultad de Ingeniería Civil quienes por su labor y conocimientos contribuyeron con las bases necesarias para iniciar este amplio proceso de formación permitiéndonos analizar y resolver situaciones de la manera más eficiente y efectiva.

**RAFAEL JOSE BRITO MENDOZA  
DIEGO ARMANDO CORREDOR VARGAS**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>15</b>
<b>1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>17</b>
<b>2 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>18</b>
<b>3 ANTECEDENTES</b> .....	<b>19</b>
<b>4 OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
<b>5 ALCANCE DEL PROYECTO</b> .....	<b>22</b>
<b>6 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>23</b>
6.1 PAVIMENTOS.....	23
6.1.1 <i>Características que debe reunir un pavimento</i> .....	23
6.1.2 <i>Tipos De Un Pavimento [7]</i> .....	24
6.1.3 <i>Partes de un pavimento flexible [8]</i> .....	25
6.2 MATERIALES BITUMINOSOS.....	27
6.2.1 <i>Características de los materiales bituminosos</i> .....	27
6.2.2 <i>Tipos de materiales bituminosos [11]</i> .....	27
6.3 CEMENTO ASFÁLTICO.....	29
6.3.1 <i>Clasificación del cemento asfáltico</i> .....	30
6.3.2 <i>Propiedades del cemento asfáltico</i> .....	30
6.4 CEMENTO PORTLAND.....	31
6.4.1 <i>Tipos, usos y características del cemento portland [14]</i> .....	32
6.4.2 <i>Propiedades físicas y mecánicas del cemento portland</i> .....	32
6.5 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.....	34
6.5.1 <i>Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente</i> .....	34
6.6 POLVO MINERAL (FILLER).....	36
6.6.1 <i>Definición de polvo mineral (filler)</i> .....	36
6.6.2 <i>Características del polvo mineral (filler)</i> .....	36
6.7 ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO.....	37
6.7.1 <i>Granulometría</i> .....	37
6.7.2 <i>Alargamiento y aplanamiento</i> .....	38
6.7.3 <i>Caras fracturadas</i> .....	39
6.7.4 <i>Desgaste por medio de la máquina de los ángeles</i> .....	40
6.8 ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.....	42
6.8.1 <i>Penetración</i> .....	42

6.8.2	<i>Punto de inflamación y de combustión</i> .....	42
6.8.3	<i>Punto de ablandamiento</i> .....	43
6.8.4	<i>Determinación de la viscosidad</i> .....	44
6.8.5	<i>Ductilidad de los materiales asfálticos</i> .....	45
6.9	MÉTODO MARSHALL .....	45
6.10	MÓDULO DINÁMICO .....	47
<b>7</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>48</b>
7.1	BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	48
7.2	RECOLECCIÓN DE MATERIALES A UTILIZAR .....	48
7.3	ENSAYOS DE LABORATORIOS .....	50
7.3.1	<i>Caracterización del agregado</i> .....	50
7.3.2	<i>Caracterización del cemento asfáltico</i> .....	57
7.3.3	<i>Caracterización del cemento portland</i> .....	65
7.3.4	<i>Método Marshall</i> .....	65
7.3.5	<i>Módulo Dinámico</i> .....	83
<b>8</b>	<b>DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADO</b> .....	<b>86</b>
8.1	ENSAYOS DEL MÉTODO MARSHALL .....	86
8.1.1	<i>Determinación del peso específico "Bulk"</i> .....	86
8.1.2	<i>Ensayo de estabilidad y flujo</i> .....	87
8.1.3	<i>Análisis de densidad y vacíos</i> .....	90
8.2	MÓDULO DINÁMICO .....	94
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>101</b>
<b>10</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>104</b>

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Granulometría MDC-19.....	51
<b>Tabla 2.</b> Resultados: Ensayo de índice por fracción de partículas alargadas .....	53
<b>Tabla 3.</b> Resultados: Ensayo de índice por fracción de partículas aplanadas .....	53
<b>Tabla 4.</b> Resultados: Ensayo de porcentaje de caras fracturadas .....	54
<b>Tabla 5.</b> Resultados: Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángeles .....	56
<b>Tabla 6.</b> Resumen de resultados de la caracterización de los agregados .....	56
<b>Tabla 7.</b> Resultados: Ensayo de penetración.....	58
<b>Tabla 8.</b> Resultados: Ensayo de punto de inflamación y combustión .....	59
<b>Tabla 9.</b> Resultados: Ensayo de punto de ablandamiento .....	61
<b>Tabla 10.</b> Resultados: Ensayo de ductilidad .....	62
<b>Tabla 11.</b> Resultados: Ensayo de densidad.....	63
<b>Tabla 12.</b> Valores de la viscosidad del cemento asfáltico.....	63
<b>Tabla 13.</b> Resumen de resultados de la caracterización del cemento asfáltico ....	64
<b>Tabla 14.</b> Datos y Resultados: Ensayo de peso bulk (Briquetas convencionales)	71
<b>Tabla 15.</b> Dimensiones de las briquetas en cm (Briquetas convencionales) .....	73
<b>Tabla 16.</b> Resultados: Ensayo de estabilidad y flujo (Briquetas convencionales). 75	
<b>Tabla 17.</b> Resultados: Ensayo de análisis de densidad y vacíos (Briquetas convencionales) .....	77
<b>Tabla 18.</b> Resumen de resultados del método Marshall de las briquetas convencionales.....	78
<b>Tabla 19.</b> Frecuencias Y Ciclos .....	85
<b>Tabla 20.</b> Temperaturas.....	85
<b>Tabla 21.</b> Datos y Resultados: Ensayo de peso bulk (Briquetas mejoradas).....	86
<b>Tabla 22.</b> Dimensiones de las briquetas en cm (Briquetas mejoradas) .....	88
<b>Tabla 23.</b> Resultados: Ensayo de estabilidad y flujo (Briquetas mejoradas).....	88
<b>Tabla 24.</b> Resultados: Ensayo de análisis de densidad y vacíos (Briquetas mejoradas) .....	91

<b>Tabla 25.</b> Resumen de resultados del método Marshall de las briquetas mejoradas .....	92
<b>Tabla 26.</b> Resultados: Módulos Dinámicos.....	94

## LISTADO DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Partes de un pavimento flexible. ....	26
<b>Ilustración 2.</b> Tipos de materiales bituminosos .....	29
<b>Ilustración 3.</b> Esquema de una partícula fracturada con una cara fracturada .....	40
<b>Ilustración 4.</b> Máquina de los ángeles .....	41
<b>Ilustración 5.</b> Ubicación de la empresa AC Construcciones y Pavimentos SAS..	48
<b>Ilustración 6.</b> Agregado del río Sogamoso en empresa .....	49
<b>Ilustración 7.</b> Cemento Asfáltico 60/70 .....	49
<b>Ilustración 8.</b> Cemento Portland .....	50
<b>Ilustración 9.</b> Distribución granulométrica.....	51
<b>Ilustración 10.</b> Calibrador de espesores .....	52
<b>Ilustración 11.</b> Calibrador de longitudes .....	52
<b>Ilustración 12.</b> Verificación detallada para el criterio de caras fracturadas .....	54
<b>Ilustración 13.</b> Degradación del agregado durante el uso de la máquina de los ángeles.....	55
<b>Ilustración 14.</b> Uso del tamiz No. 12 .....	55
<b>Ilustración 15.</b> Ensayo: Penetración .....	58
<b>Ilustración 16.</b> Ensayo: Punto de inflamación y combustión.....	59
<b>Ilustración 17.</b> Ensayo: Punto de ablandamiento.....	60
<b>Ilustración 18.</b> Ensayo: Ductilidad.....	61
<b>Ilustración 19.</b> Resultado final del ensayo de ductilidad .....	62
<b>Ilustración 20.</b> Conjunto de tamices.....	65
<b>Ilustración 21.</b> Peso de las cantidades de cada porción del agregado .....	66
<b>Ilustración 22.</b> Materiales puestos a calentar.....	67
<b>Ilustración 23.</b> Vertimiento del asfalto al agregado .....	67
<b>Ilustración 24.</b> Mezcla homogénea del cemento asfáltico y el agregado .....	68
<b>Ilustración 25.</b> Preparación de la mezcla asfáltica para la compactación .....	68
<b>Ilustración 26.</b> Uso de la máquina de compactación automática .....	69
<b>Ilustración 27.</b> Uso del martillo de compactación Marshall .....	70

<b>Ilustración 28.</b> Ensayo: Determinación del peso específico “bulk” (convencionales) .....	71
<b>Ilustración 29.</b> Dimensionamiento de las briquetas convencionales.....	72
<b>Ilustración 30.</b> Briquetas en baño María (Briquetas convencionales).....	73
<b>Ilustración 31.</b> Ensayo: Estabilidad y flujo (Briquetas convencionales) .....	74
<b>Ilustración 32.</b> Rompimiento de las briquetas convencionales .....	76
<b>Ilustración 33.</b> Ensayo: Análisis de densidad y vacíos (Briquetas convencionales) .....	76
<b>Ilustración 34.</b> Briquetas mejoradas con cemento portland .....	82
<b>Ilustración 35.</b> Proceso de elaboración de briquetas en el compactador giratorio	83
<b>Ilustración 36.</b> Pines instalados .....	84
<b>Ilustración 37.</b> Briqueta con sensores instalados.....	84

## LISTADO DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Densidad vs. Porcentaje cemento asfáltico (briquetas convencionales) .....	80
<b>Gráfica 2.</b> Estabilidad vs. Porcentaje cemento asfáltico (briquetas convencionales) .....	81
<b>Gráfica 3.</b> Porcentaje de vacíos vs. Porcentaje cemento asfáltico (briquetas convencionales) .....	81
<b>Gráfica 4.</b> Densidad vs. Porcentaje cemento portland (briquetas mejoradas) .....	87
<b>Gráfica 5.</b> Estabilidad vs. Porcentaje cemento portland (briquetas mejoradas)....	89
<b>Gráfica 6.</b> Flujo vs. Porcentaje cemento portland (briquetas mejoradas) .....	90
<b>Gráfica 7.</b> Porcentaje de vacíos vs. Porcentaje cemento portland (briquetas mejoradas) .....	91
<b>Gráfica 8.</b> Módulos dinámicos para briquetas de 0 % de cemento portland .....	95
<b>Gráfica 9.</b> Módulos dinámicos para briquetas de 25 % de cemento portland .....	95
<b>Gráfica 10.</b> Módulos dinámicos para briquetas de 50 % de cemento portland .....	96
<b>Gráfica 11.</b> Módulos dinámicos para briquetas de 75 % de cemento portland .....	97
<b>Gráfica 12.</b> Módulos dinámicos para briquetas de 100 % de cemento portland ...	97
<b>Gráfica 13.</b> Módulos dinámicos vs. Frecuencias a 21,1°C .....	98
<b>Gráfica 14.</b> Módulos dinámicos vs. Frecuencias a 37,8°C .....	99
<b>Gráfica 15.</b> Módulos dinámicos vs. Frecuencias a 54,4°C .....	99

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON AGREGADO PROCEDENTE DEL RIO SOGAMOSO Y MEJORADAS CON CEMENTO PORTLAND

**AUTOR(ES):** RAFAEL JOSE BRITO MENDOZA  
DIEGO ARMANDO CORREDOR VARGAS

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Ing.Msc. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

### RESUMEN

El objetivo de este proyecto es analizar el comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfáltica con agregado procedente del río Sogamoso (Santander) y mejorada con cemento portland, iniciando con la caracterización de los materiales a utilizar (Agregados, Cemento Asfáltico y Cemento Portland). Para cumplir con el objetivo, se realizaron los ensayos Marshall y el ensayo de modulo dinámico de mezclas asfálticas. Para desarrollar los ensayos, se elaboraron briquetas convencionales con cinco (5) diferentes porcentajes de cemento asfáltico (4%,4.5%,5%,5.5% y 6%) a las cuales se le realizaron los ensayos correspondientes para determinar el porcentaje óptimo. Luego de obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, se procedió a elaborar las briquetas mejoradas modificando el filler con cemento Portland en proporciones diferentes (0%, 25%, 50%, 75% y 100%), a las cuales se les realizó el método Marshall para conocer su comportamiento mecánico, donde se obtuvo resultados de estabilidad y flujo, densidad Bulk y densidad de vacíos. Para conocer el comportamiento dinámico se elaboraron nuevas briquetas con las dimensiones aptas para evaluar su módulo dinámico en la maquina DTS-30 (30 KN DYNAMIC TESTING SYSTEM) bajo los parámetros de la norma AASHTO TP 62-03 del 2005 ensayándolas a tres (3) temperaturas (21.1°, 37.8° y 54.4°) y seis (6) frecuencias (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz y 0.1 Hz) obteniendo como resultados que entre menor es la temperatura en un pavimento el módulo dinámico será mayor.

### PALABRAS CLAVE:

Mezclas Asfálticas, Cemento Portland, Modulo Dinámico, Filler, Pavimento.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** ANALYSIS THE MECHANICAL AND DYNAMIC BEHAVIOR OF ASPHALT MIXTURES WITH AGGREGATE FROM THE SOGAMOSO RIVER IMPROVED WITH PORTLAND CEMENT

**AUTHOR(S):** RAFAEL JOSE BRITO MENDOZA  
DIEGO ARMANDO CORREDOR VARGAS

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Ing.Msc. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

### ABSTRACT

The objective of this project is to analyze the mechanical and dynamic behavior of asphalt mixtures with aggregate from the Sogamoso River (Santander) improved with Portland cement, starting with the description of the materials to be used (Aggregates, Asphalt Cement and Portland Cement). To accomplish the objective, the Marshall tests and the dynamic module test of asphalt mixtures were carried out. To develop the trials, conventional briquettes were elaborated with five (5) different percentages of asphalt cement (4%, 4.5%, 5%, 5.5% and 6%) to which the corresponding tests were carried out to determine the optimum percentage. After obtaining the optimum percentage of asphalt cement, we proceeded to elaborate the upgraded briquettes by modifying the filler with Portland cement in different proportions (0%, 25%, 50%, 75% and 100%), to which the Marshall method was applied to know its mechanical behavior, and the results of stability and flow, density Bulk and density of voids were obtained. In order to know the dynamic behavior, new briquettes with the suitable dimensions were developed to evaluate its dynamic module in the DTS-30 machine (30 KN DYNAMIC TESTING SYSTEM) under the parameters of the AASHTO TP 62-03 of 2005, testing them to three (3) temperatures (21.1 °, 37.8 ° and 54.4 °) and six (6) frequencies (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz and 0.1 Hz) obtaining as a result that the lower the temperature in a pavement the higher the dynamic module will be.

### KEYWORDS:

Asphalt Mixtures, Portland Cement, Dynamic Module, Filler, Pavement.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de mezclas asfálticas para la construcción de las redes viales, no ha sufrido una evolución significativa, que permita la elaboración de vías más duraderas, propensas a resistir los factores que influyen en estas, por ejemplo; la numerosa cantidad de cargas por parte de los vehículos comerciales y las condiciones ambientales tales como lluvias y las diferentes temperaturas a las que están expuestas. La búsqueda de soluciones se ha ido incrementando a través del tiempo, con ideas de sumar materiales a las mezclas asfálticas, esto con el fin de beneficiar sus propiedades de resistencia. Con respecto a lo anterior, en este proyecto de grado se comparará el comportamiento mecánico y dinámico entre una mezcla asfáltica convencional, y una mejorada con cemento portland.

Se realizó un diseño de mezcla típica, como la Mezcla Densa en Caliente tipo 19 (MDC-19) establecida en la Especificación 450 de la norma INVIAS 2013. De igual manera se utilizará un asfalto 60/70, el cual es obtenido de la Refinería de Ecopetrol y suministrado por la empresa Multinsa S.A. ubicada en la Carrera 19a #73-65, Barrio La Libertad, Barrancabermeja, Santander y los agregados pétreos provenientes del río Sogamoso (Santander), suministrados por la empresa AC Construcciones y Pavimentos SAS, ubicada en la vía Barrancabermeja La Lizama Km 12.

Para cumplir con el objetivo de este proyecto, se realizaron ensayos de caracterización de los agregados y caracterización del cemento asfáltico. Esto con el fin de establecer las propiedades de cada uno de los materiales a utilizar para la mezcla, puesto que las características de los agregados deben ser las apropiadas para que al final la calidad de esta no se vea afectada. De igual forma, se efectuó la caracterización de cemento portland.

Posteriormente a la caracterización de los materiales, se procedió a elaborar unas briquetas con diferentes porcentajes de cemento asfáltico (4%,4.5%,5%,5.5% y

6%), para luego de realizados los ensayos encontrar el porcentaje optimo a utilizar. Obtenido el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, se variarán los porcentajes del filler (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) con cemento Portland para el mejoramiento de la mezcla y proceder a realizar los ensayos correspondientes para analizar el comportamiento mecánico.

Una vez culminados los ensayos del comportamiento mecánico, se realizaron las briquetas correspondientes al módulo dinámico en el compactador giratorio para ser evaluadas empleando el marco de carga DTS-30 (30 KN Dynamic Testing System) y comprobar la variación de dicho módulo.

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia presenta un atraso en infraestructura vial, existen deficiencias o carencias en puentes, viaductos, túneles, taludes y carreteras que le restan productividad y competitividad a la hora de enfrentar un mercado abierto a los grandes conglomerados. Colombia no podrá actualizarse sin un sistema vial de alta calidad.

Entonces: ¿por qué la infraestructura está atrasada en nuestro país? Como respuesta a este interrogante se relacionan dos factores: las restricciones económicas, debido a la mala estructuración del gasto público acompañado de una inadecuada tributación, ya que sólo hasta hace poco tiempo se le ha dado relevancia a este tema en la agenda pública. Es muy importante resaltar, que los problemas son en primera instancia cualitativos en referencia a la ineffectividad de las inversiones y la imposibilidad de crear nuevos esquemas que permitan la movilización de los recursos y a su vez superen la limitación económica. Y es que siempre hay un elemento que genere algún problema, que, para este caso, será un diseño inadecuado, incluso podría llegar a desviar el correcto cumplimiento de los objetivos [1].

No se trata de hacer altas inversiones en obras, es hacerlas con proyección desde el comienzo, esto quiere decir que los diseños se deben proyectar a largo plazo y lógicamente los pavimentos proyectados en nuestras vías deben ser durables y que correspondan a la demanda actual de los pavimentos construidos en esas vías deben ser durables y que respondan a las necesidades actuales y futuros de la economía. Es probable que nuestros pavimentos construidos estén requiriendo de mantenimientos rutinarios costosos y de mantenimientos periódicos antes de lo programado, lo cual debe preocupar no solo al contratista porque en la mayoría de los casos tienen ellos que responder con pólizas de estabilidad pero luego del tiempo previsto, el estado tendrá que velar por los mantenimientos necesarios para ofrecer al usuario una muy buena estructura vial que cumpla con condiciones funcionales y estructurales de funcionalidad.

## 2 JUSTIFICACIÓN

El asfalto es considerado el material más empleado para la fabricación de redes viales en el mundo por sus propiedades y composición. En Colombia, más del 70 % de las vías nacionales, y un 35 % de las vías capitalinas están constituidas por pavimentos asfálticos [2]. Los pavimentos asfálticos convencionales sufren fisuras y deformaciones debido a factores como cambios climáticos, aumento de presiones y cargas, etc.

En el año 2012, de acuerdo con los registros del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de los 8.313 km de la red pavimentada a su cargo, más del 52.4 % se encuentra en mal estado. Teniendo en cuenta lo anterior, se espera en este proyecto de grado analizar el comportamiento mecánico y dinámico de la mezcla óptima con agregados pertenecientes del río Sogamoso y mejorada con cemento portland; estudiando la composición de los materiales del mismo para mejoras en resistencia y durabilidad, proporcionando así capas más estables y duraderas, generando de esta manera bajos costos de mantenimiento.

En Colombia, se han realizado múltiples estudios adicionando diferentes polímeros a la mezcla asfáltica, sin embargo, a pesar de que los trabajos hasta hoy conocidos han llegado a mejorar algunas de las características como aumento en la viscosidad, incrementos en parámetros empíricos, como penetración y punto de ablandamiento en el asfalto, resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) y/o resistencia a la fatiga en asfaltos o mezclas asfálticas, no se han logrado avances significativos que puedan ser aplicados a mayor escala.

### 3 ANTECEDENTES

En primer lugar se tiene que, en Julio de 2009 fue presentado en la Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia), el artículo **Influencia de las características del relleno mineral en la resistencia de una mezcla asfáltica** por Reyes, Oscar Javier y Rincón, Jhon Fredy para la revista EIA, esta investigación se relaciona con el proyecto debido a que el objetivo principal era determinar el efecto en la resistencia a tracción indirecta de reemplazar el relleno mineral por cemento, cal y ceniza volante con diferentes porcentajes. El estudio inició con la caracterización de los materiales (agregados, asfaltos, cal, cemento y ceniza volante), seguido de la determinación del porcentaje óptimo de asfalto mediante el método Marshall. Además, seleccionaron para el estudio la granulometría MD10 y el asfalto con penetración 60/70, así mismo sustituyeron el relleno mineral en porcentajes de 0, 25, 50, 75 y 100.

Dichos investigadores encontraron que existe un incremento en la resistencia del 58% al reemplazar el 100% de relleno mineral por cal, del 22% al sustituir el 50% de relleno por ceniza volante y el 5% al reemplazar el 75% por cemento. Con respecto a la deformación de las probetas, para todos los porcentajes de sustitución de cal y cemento, la mezcla soporta mayor deformación para la carga máxima, mientras para el reemplazo de ceniza volante, sólo al 100% de reemplazo aumenta la deformación con la carga máxima [3].

Para este proyecto de grado, la información encontrada en el trabajo anteriormente mencionado, contribuyó principalmente para conocer las proporciones del relleno mineral a sustituir en las mezclas asfálticas. Además, del posible comportamiento que tendría una mezcla asfáltica mejorada con cemento portland evaluando su resistencia y su deformación.

En un segundo estudio encontrado, fue el elaborado por Neme Ardila, Linna Marcela; Reyes Ortiz, Oscar Javier y Camacho Tauta, Javier Fernando (2013) denominado: **Comportamiento de mezclas asfálticas cerradas mediante la aplicación del ensayo fénix**, aquí se encontró que “ Para el desarrollo del estudio, se fabricaron muestras de mezclas asfálticas con granulometrías cerradas md-10, md-12, md20 del IDU y mdc-2 del INVIAS, utilizando asfalto de diferente penetración 60/70 y 80/100, agregados vírgenes y de recuperación (RAP), asfálticas de las minas de Boyacá, reemplazo de filler por cemento y cal en diferentes porcentajes (100%, 75%, 50% y 0%) y muestras compactadas con diferentes niveles de energía en el compactador giratorio (100, 200 y 300 giros)” [4].

Esta investigación sirvió como apoyo en este trabajo de grado para confirmar los diferentes porcentajes de filler que debían ser reemplazados por el cemento portland para la elaboración de las mezclas asfálticas modificadas, esto con el fin de obtener diferentes resultados que puedan ser comparados entre sí.

Para lograr definir el comportamiento del material bajo esfuerzos dinámicos, se han realizado ensayos de módulo dinámico que varían de acuerdo a la frecuencia y temperatura a la que son aplicadas las cargas, simulando así el paso de vehículos sobre el pavimento. En Colombia se hace difícil evaluar el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas, ya que son ensayos poco usuales debido a los altos costos e información limitada, lo cual retrasa el desarrollo del proyecto.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Analizar el comportamiento dinámico y mecánico de mezclas asfálticas tipo MDC-19 elaboradas con agregado procedente del río Sogamoso y mejoradas con cemento portland.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar las briquetas convencionales y mejoradas para ensayos de resistencia y comportamiento.
- Analizar las propiedades físicas que puede aportar el diseño de una mezcla asfáltica con agregado del río Sogamoso y mejorada con cemento portland.
- Comparar los resultados encontrados en los ensayos hechos a las briquetas de una mezcla asfáltica convencional con agregados del río Sogamoso y otras mejoradas con cemento portland.

## 5 ALCANCE DEL PROYECTO

En este proyecto por medio de la caracterización del agregado empleado, el cual es proveniente del río Sogamoso, la caracterización del cemento asfáltico y el cemento Portland, y luego de realizar los ensayos correspondientes establecidos por las normas INVIAS y AASHTO correspondientemente se busca analizar el comportamiento mecánico por medio de los ensayos de determinación del peso específico bulk, el ensayo de estabilidad y flujo y el análisis de densidad de vacíos, así mismo analizar el comportamiento dinámico de mezclas asfálticas mejoradas con cemento portland mediante la DTS-30 la cual simula el paso de vehículos a diferentes temperaturas y frecuencias los cuales son comparados con los resultados obtenidos en los ensayos hechos a mezclas asfálticas convencionales .

Se demostrara si las propiedades y las características del agregado empleado, el cemento portland y el cemento asfáltico cumplen con las normas correspondientes a dichos ensayo y además comprobar si son aptos o no para la construcción de carpetas asfálticas, esto se hará mediante la realización de briquetas con agregado del río Sogamoso, y variando el porcentaje de cemento asfáltico, se encontrara el porcentaje optimo a utilizar, para luego modificarlas con cemento portland a las cuales se les realizaran los ensayos de módulos dinámicos.

## 6 MARCO TEÓRICO

### 6.1 PAVIMENTOS

Los pavimentos para carreteras y vías urbanas son estructuras viales compuestas por varias capas, es decir, están conformados por un conjunto de capas relativamente horizontales compuestas por materiales seleccionados. Estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas generadas por el tránsito y por las condiciones ambientales.

Así mismo, deben diseñarse con el fin de ofrecer un paso cómodo, seguro y confortable para el vehículo que se movilice sobre su superficie en determinado periodo de tiempo. Las cargas dinámicas de los vehículos que transitan sobre estas estructuras producen en las capas esfuerzos cíclicos y deformaciones verticales, horizontales y de corte. El pavimento se soporta sobre una subrasante natural o sobre una plataforma, que puede ser la subrasante mejorada, estabilizada, o un terraplén [5].

#### 6.1.1 Características que debe reunir un pavimento

Las características fundamentales que un pavimento debe reunir para cumplir un funcionamiento adecuado son:

- Ser resistente a la acción de las cargas transmitidas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes ambientales.
- Presentar una estructura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, para así, ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe ser cómodo para el usuario presentando una superficie homogénea, tanto transversal como longitudinal.
- Debe ser duradero.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.

- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y confusiones, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito. [6]

## 6.1.2 Tipos De Un Pavimento [7]

### 6.1.2.1 Pavimentos Flexibles

- **Flexible:** Es un pavimento que se encuentra constituido por una capa de rodadura consistente compuesta por una mezcla de materiales asfálticos y granulares, la cual se construye sobre una capa de base granular y una capa de subbase.
- **Semi-rígidos:** Si la capa que normalmente es de tipo granular se reemplaza por una de un material estabilizado se denomina pavimento semi-rígido.

### 6.1.2.2 Pavimentos Rígidos

- **Concreto simple con juntas:** Es un pavimento en el que las juntas se utilizan para controlar las grietas previsibles, este pavimento no contiene acero de refuerzo, pero puede llevar varillas lisas en las juntas transversales y varillas corrugadas en las juntas longitudinales, su espaciamiento entre juntas oscila entre 4.5m y 7.5m
- **Concreto reforzado con juntas:** La longitud de las losas es entre 7.5m y 15m por esta razón necesitan acero de refuerzo y normalmente la cantidad de acero utilizado es de 0.1% y 0.2% en relación al concreto.
- **Concreto con refuerzo continuo:** Este pavimento no utiliza juntas transversales de contracción y contiene cuantías de acero generalmente entre un 0.5% y 0.8% del área transversal de pavimento.

- **Concreto con refuerzo estructural:** En estos pavimentos el acero asume las tensiones de tracción y compresión de manera que se puede llegar a reducir el espesor de las losas, se utiliza en pisos industriales donde las losas deben resistir cargas de mayor magnitud y las dimensiones de las losas son similares a las de los pavimentos en concreto simple y el acero no debe atravesar la junta transversal para evitar la aparición de fisuras.

### **6.1.2.3 Pavimentos Articulados**

Estos son pavimentos cuya capa de rodadura es un conjunto de bloques pequeños que se ensamblan de manera que logren formar una superficie continua, los cuales se apoyan en una capa de arena la cual se encuentra apoyada sobre una capa de base granular o estabilizada y sobre una capa de subbase, el nombre de estos pavimentos articulados está condicionado por el material que se va a usar para su fabricación como adoquines de concreto o de arcilla.

### **6.1.3 Partes de un pavimento flexible [8]**

Las estructuras de los pavimentos flexibles se caracterizan por estar conformados principalmente de una capa bituminosa, que se apoya de otras capas inferiores llamadas base y subbase; sin embargo, es posible prescindir de estas capas dependiendo de la calidad de la subrasante y de las necesidades de cada obra.

Las cargas son recibidas por encima de las capas, extendiéndose en ellas, y pasando estas cargas a la capa interior siguiente.

#### **Subbase Granular**

- **Capa de transición:** Esta capa impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y, por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen afectando su calidad.
- **Disminución de la deformación:** Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios externos de temperatura, pueden absorberse con la

capa subbase, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

- Resistencia: La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitirlos a un nivel adecuado a la subrasante.

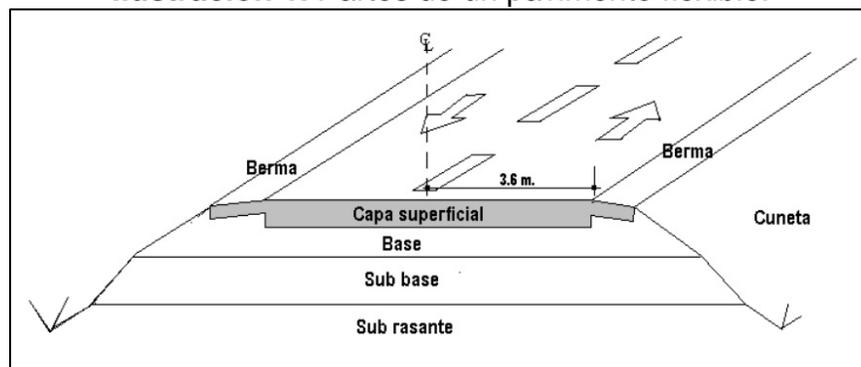
### Base Granular

- Resistencia: La función fundamental consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.

### Carpeta Asfáltica

- Superficie de rodadura: La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, y resistente a los efectos abrasivos del tránsito.
- Resistencia: Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.
- Impermeabilidad: La carpeta asfáltica debe en lo más posible impedir el paso del agua al interior del pavimento.

**Ilustración 1.** Partes de un pavimento flexible.



**Fuente:** Modulo 1. Introducción Al Diseño De Pavimentos. Fernando Sánchez Sabogal.

## 6.2 MATERIALES BITUMINOSOS

Los materiales bituminosos son sustancias con características como: color negro, solidas o viscosas, dúctiles que se ablandan por el calor. Comprenden a los crudos petrolíferos como también a los obtenidos por la destilación destructivas de las sustancias de origen carbonoso.

Los materiales bituminosos pueden dividirse en dos grandes grupos: betunes y alquitranes. Ambos presentan una serie de propiedades similares, pero también unas diferencias muy significativas; por ejemplo, los dos son termoplásticos y poseen una buena adhesividad con los áridos; sin embargo, los alquitranes poseen una viscosidad más vulnerable a las variaciones de temperatura que la de los betunes [9].

### 6.2.1 Características de los materiales bituminosos

Dentro de las características que tienen los materiales bituminosos podemos encontrar:

- Fácil disponibilidad y manejo para la puesta en obra.
- Buena adhesividad a los áridos con los que los vamos a unir.
- Buena cohesión entre las partículas, para que pueda soportar sin romperse a los esfuerzos sometidos.
- Envejecimiento lento, para que no pierda las características con el tiempo y que así resulte más rentable el material.
- Alta impermeabilidad [10].

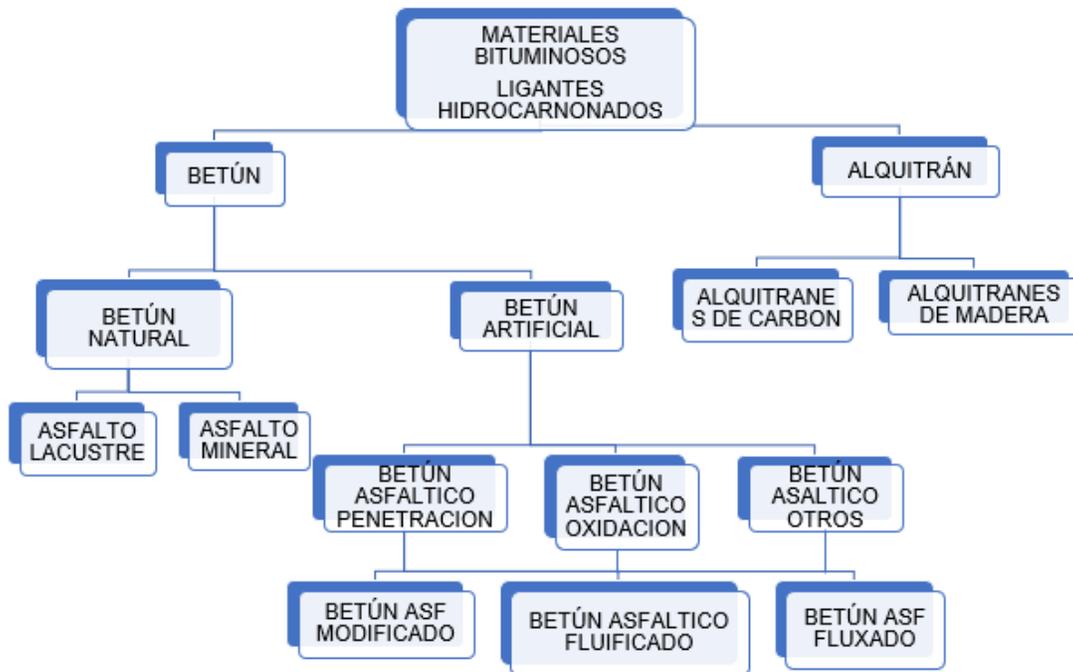
### 6.2.2 Tipos de materiales bituminosos [11]

- **Betún:** Los hidrocarburos que conforman los betunes poseen un elevado peso molecular, el cual se muestra en forma de cuerpo viscoso más o menos elástico, el cual no es cristalino y es de color negro. También, pueden ser conocidos como betunes asfálticos, el cual es derivado de la destilación del petróleo. Es un

material que debe ser calentado a temperaturas altas para llegar a ser usado como líquido. El betún está compuesto especialmente por el carbono y el hidrógeno, constituido principalmente por asfáltenos, resinas y aceites. Estos elementos le proporcionan unas características de consistencia, aglutinación y ductilidad al producto y le confieren unas propiedades cementales a temperaturas ambientales normales.

- **Alquitrán:** Se define como alquitrán al compuesto que se obtiene de la destilación destructiva de algunos elementos orgánicos, es un residuo negro, de olor fuerte, es graso y pegajoso. Además, está mezclado por muchas sustancias químicas, las cuales pueden ser carcinogénicas o están clasificadas como residuos tóxicos. El alquitrán suele obtenerse del carbón, de los huesos, de la hulla, y de ciertas maderas resinosas. Ahora bien, el alquitrán de madera es fabricado al quemar o calentar parcialmente la madera. Su uso es muy variado debido a sus características, puede ser utilizado para conservar madera e impermeabilizar techos, también se utiliza con áridos autóctonos, convirtiéndolo en la mejor opción para la construcción de carreteras, esto debido a su adaptabilidad con casi todos los áridos. Existen alquitranes que son utilizados para fabricar los aislantes para aglomerados de carbón y tejados, estos alquitranes poseen un mayor punto de fusión y son llamados breas. Estos también son utilizados como combustible.

**Ilustración 2.** Tipos de materiales bituminosos



**Fuente:** Tomado y adaptado de: Universidad de La Coruña; Materiales Bituminosos, Pág. 13.

### 6.3 CEMENTO ASFÁLTICO

El asfalto es un material que se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales o puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo. Debido a que posee unas características muy específicas, lo hacen ideal para los trabajos de pavimentación, principalmente la cohesión y la adhesión con materiales granulares. Su consistencia es sólida y al calentarlo se ablanda volviéndose líquido, lo que le permite recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente. El asfalto cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Es más duro a bajas temperaturas y más blando a altas, por esto, se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente dependiendo del clima del sitio de colocación [12].

### **6.3.1 Clasificación del cemento asfáltico**

#### **6.3.1.1 Cementos Asfálticos (AC)**

Este tipo de son los más utilizados en pavimentación. Se pueden sub-clasificar bajo tres sistemas diferentes: viscosidad, antes y después de envejecimiento y penetración. Comúnmente se comercializan según sus grados o rangos de consistencia, con base en el ensayo de penetración, por ejemplo: AC 70-90, AC-60-80, AC 80-100. Los números indican la penetración en décimas de milímetro.

#### **6.3.1.2 Asfaltos Líquidos**

Los asfaltos líquidos son producidos diluyendo el cemento asfáltico en algún solvente del petróleo. Dependiendo de la rapidez con que se produce la evaporación del solvente (curado del asfalto) se agrupan en 3 clases: SC: Asfaltos rebajados de curado lento. MC: Asfaltos rebajados de curado medio. RC: Asfaltos rebajados de curado rápido. Esta denominación se suele acompañar de un número que indica el grado de viscosidad cinemática. Por ejemplo: RC-250, MC-70.

#### **6.3.1.3 Emulsiones Asfálticas**

Se componen de dos elementos: agua y cemento asfáltico. Se utilizan en tratamientos superficiales, riegos de adherencia, mezclas abiertas, estabilización de suelos y lechadas asfálticas.

### **6.3.2 Propiedades del cemento asfáltico**

Las propiedades físicas más importantes del cemento asfáltico, que son tenidas en cuenta en el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, son:

- **Durabilidad:** Indica qué tanto permanecen sus características cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

- **Adhesión y cohesión:** Adhesión, es la capacidad del cemento asfáltico para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión, es la capacidad del cemento asfáltico de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.
- **Susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento:** El endurecimiento del asfalto es causado por la combinación con el oxígeno (oxidación) o por volatilización. La oxidación y el endurecimiento más severo ocurren durante el mezclado, pues el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas.
- **Susceptibilidad a la temperatura:** Esta es una de las propiedades más importantes del asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

#### 6.4 CEMENTO PORTLAND

Es una mezcla compleja de caliza (u otros materiales con alto contenido de carbonato de calcio), sílice, hierro y arcilla, molidos y calcinados, que al mezclarse con agua reacciona de tal manera que fragua y se endurece. Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al enfriarse.

El ejemplo típico de un cemento hidráulico, es el cemento portland; esto se debe a que fragua y desarrolla resistencias a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. De todos los cementos, el portland es el más importante en cuanto a términos de calidad, desarrollo de resistencia a la compresión, tensión y a los sulfatos; por lo cual es el material idóneo [13].

#### 6.4.1 Tipos, usos y características del cemento portland [14]

- **Tipo I:** El cemento portland tipo I es el normal, es usado en la construcción de obras de hormigón en general, como lo son: viviendas, edificaciones, estructuras etc.
- **Tipo II:** El cemento Portland tipo II tienen una resistencia media a los ataques de sulfatos. Se usa en obras de construcción en general y en construcciones expuestas a la acción moderada de los sulfatos, por lo general es el cemento utilizado en la realización de tuberías de hormigón y puentes.
- **Tipo III:** El Cemento Portland tipo III, alcanza una resistencia inicial alta, logrando tener a los 3 días una igual resistencia a la compresión, que tienen en siete días los cementos tipos I y II. Es usado cuando se necesita un hormigón que debe ser desencofrado antes de los 28 días y recibirá cargas muy pronto, como en el caso de los elementos prefabricados o construcciones de emergencia.
- **Tipo IV:** El Cemento Portland tipo IV es usado cuando se necesita un bajo calor de hidratación sin producirse dilataciones durante la etapa de fraguado. El calor desprendido durante la hidratación se produce más lento. Es utilizado en estructuras de hormigón muy grandes, como los diques.
- **Tipo V:** El Cemento Portland tipo V se usa en la construcción de elementos y obras que necesiten una resistencia elevada al ataque concentrado de sulfatos y álcalis, como en las alcantarillas, canales de conducción e infraestructuras portuarias.

#### 6.4.2 Propiedades físicas y mecánicas del cemento portland

Las características físicas y mecánicas más importantes son: densidad, finura, tiempo de fraguado, fluidez, resistencia y adherencia [15].

- **Densidad:** Es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento portland normal,

suele estar muy cercano a  $3,15 \text{ g/cm}^3$ . La densidad del cemento no determina su calidad, pero analizado junto con la superficie específica se puede deducir si contiene o no adiciones.

- **Finura:** Es una de las propiedades físicas más importantes del cemento, ya que está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de resistencia.

El área superficial total de las partículas de cemento, como factor determinante definirá la velocidad de hidratación, debido a que un cemento con partículas de mucha área específica, es decir, de alta finura, se endurecerá con mayor velocidad y desarrollará rápido su resistencia.

- **Tiempo de Fraguado:** El fraguado del cemento es el cambio del estado plástico al estado sólido, es decir, del estado fresco al endurecido. Estos estados deben ser distinguidos, puesto que, aunque durante el fraguado la pasta de cemento adquiere cierta resistencia, es en el endurecimiento donde se adquiere la resistencia mecánica de la pasta.

El tiempo de fraguado se puede ver afectado por diversos factores, como los son:  
La finura del cemento: Al tener mayor finura, la velocidad de hidratación será mayor y en consecuencia los tiempos de fraguado son menores;  
Temperatura ambiente: Se tendrán menores tiempo de fraguado a mayores temperaturas, se debe a que las reacciones químicas de hidratación se aceleran con el aumento de la temperatura

- **Fluidez:** Es la propiedad que hace referencia a la dificultad con que la pasta de cemento puede ser manejada. El factor que determina la fluidez es la cantidad de agua, y si es incrementada, relativamente aumenta la fluidez haciendo menos trabajable la pasta de cemento.
- **Resistencia:** Esta es la característica más importante del cemento, puesto que esta propiedad será transmitida al mortero y el concreto elaborado con el

cemento. La resistencia de la pasta cementante en el concreto depende de la calidad y de la cantidad de componentes reactivos en la pasta y de su grado de hidratación. El concreto se vuelve más resistente con el tiempo, cuando la temperatura y la humedad disponibles sean adecuadas.

- **Adherencia:** Es la interacción que existe en la zona de contacto del agregado con la pasta cementante. Mientras se logre tener más adherencia entre el agregado y la pasta, se beneficiará la resistencia del concreto.

## 6.5 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Las mezclas asfálticas en caliente se definen como la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Para su proceso fabricación es necesario calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y para ser puesta en obra debe tener una temperatura muy superior al ambiente.

Este tipo de mezclas asfálticas, comúnmente se adoptan tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos [16].

### 6.5.1 Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente.

A continuación, se muestra la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente.

1. **The Hubbard-Field (1920's).** Este método fue uno de los primeros en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Para desarrollarlo se usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Pero no funcionó completamente, puesto que, para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas se desempeñaba adecuadamente, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.

2. **Método Marshall (1930's).** Históricamente este método fue desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Como requerimiento para emplearlo se utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.
  
3. **Método Hveem (1930's).** Este método de diseño de mezclas asfálticas, tuvo sus inicios casi en el mismo tiempo que el método Marshall. En el desarrollo del método se evalúa una estabilidad pseudotriaxial.
  
4. **Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. WASHTO (1984).** Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia a las roderas.
  
5. **Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987).** Surgió luego de reconocer la necesidad de cambios en el diseño de mezclas, debido a esta problemática se desarrolló un nuevo proyecto que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.
  
6. **Método SUPERPAVE (1993).** El método AAMAS, fue el punto de referencia para dar inicio al método SUPERPAVE, el cual es un diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. El funcionamiento del método SUPERPAVE se basa en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para establecer la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

## **6.6 POLVO MINERAL (FILLER)**

### **6.6.1 Definición de polvo mineral (filler).**

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200. Y según la normativa europea UNE-EN 933- 2., se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz 0.063 mm.

El polvo mineral también conocido como filler es un producto comercial de naturaleza polvorienta (cemento normalmente o cenizas volantes de central térmica), especialmente preparado para utilizarlo en mezclas asfálticas. Ya que es un producto comercial, su control es garantizado y sus propiedades tanto físicas como químicas, además de su futuro comportamiento son conocidas. Cuando se utiliza un filler de recuperación que es otro tipo de filler, el cual se obtiene de las plantas asfálticas, sus componentes y propiedades pueden variar y no se sabe exactamente sus propiedades lo que hace dudar si se encuentran entre las normativas establecidas por la norma, ya que son residuos utilizados.

En un pavimento el efecto se obtiene en la utilización de un filler activo en dosificación de una mezcla asfáltica, la cual aumenta significativamente su durabilidad. Entre los filleres activos que podemos encontrar están la cal hidratada y dolomíticos, su resistencia puede durar largos periodos de tiempo con contenidos óptimos de asfalto, en cambio los filleres no activos como basaltos y areniscas suelen deteriorarse rápidamente bajo contenidos óptimos de asfalto.

### **6.6.2 Características del polvo mineral (filler).**

Las características que más suelen interesar de un polvo mineral son:

- **Finura:** Debido a los espacios libres dejados por la estructura granular, el filler ocupado estos espacios dejados, reduciendo el volumen de vacíos en la mezcla lo que evita un aumento pronunciado de la cantidad de ligante asfáltico. El

polvo mineral consigue cumplir con su función relleno, dependiendo del volumen de vacíos existente una vez que se haya compactado la estructura granular y en función de la granulometría y de las partículas de mayor tamaño.

- **Modificación del comportamiento reológico:** Aumenta la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar propiedad viscosa del ligante, generando como consecuencia un aumento de la resistencia al corte de las mezclas asfálticas.
- **Acción estabilizante frente al agua:** Frente a la acción del agua aumenta la durabilidad de la mezcla ya que disminuye la porosidad de la estructura granular lo que evita que el agua entre al interior, además algunos polvos minerales al contacto mejoran la resistencia a la acción de desplazamiento que el agua ejerce en el ligante asfáltico. La acción de estabilizante además de depender del tamaño y forma de las partículas, depende de la composición química entre los rellenos minerales.
- **Procedencia del polvo mineral:** Como mejor alternativa podrá proceder de los agregados, separándose de ellos por medio de los ciclones de la central de fabricación, o aportarse a la mezcla por separado de aquéllos como un producto comercial o especialmente preparado. Al emplearse en una mezcla debe cumplir con lo establecido en las normas, debido a que es un material que se debe utilizar de forma correcta y con las proporciones indicadas en cada tipo de mezcla para obtener un resultado óptimo [17].

## 6.7 ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO

### 6.7.1 Granulometría

Con ayuda de la granulometría se puede determinar de forma cuantitativa la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados tanto gruesos como finos de un material, este proceso por medio del tamizado.

Inicialmente el agrado seco, y de masa conocida se separa por a través de una serie de tamices que a medida que pasa el material las aberturas son más pequeñas, con el objetivo de determinar la distribución de los tamaños de sus partículas.

Luego de realizar el proceso granulométrico, los resultados se usan para determinar el cumplimiento de las especificaciones en relación con la distribución de las partículas y obtener los datos necesarios para el control de la producción del agregado y mezclas que lo contengan [18].

### **6.7.2 Alargamiento y aplanamiento**

El principal objetivo de este procedimiento es la determinación de los índices de aplanamiento y alargamiento de un agregado el cual será empleado en la construcción de carreteras.

Según lo indicado en la norma el ensayo es aplicable a agrados de origen tanto natural como artificial. El ensayo para determinar el índice de aplanamiento no es aplicable a los tamaños de partículas menores de 6.3 mm ( $\frac{1}{4}$ " ) o mayores de 63 mm ( $2 \frac{1}{2}$ " ); mientras que la prueba para hallar el índice de alargamiento no aplica a los tamaños de partículas menores de 6.3mm ( $\frac{1}{4}$ " ) o mayores de 50 mm (2").

- **Resumen del método:** El ensayo de índice de aplanamiento consiste en dos procesos sucesivos. En primer lugar, el material usado debe tamizarse mediante el uso de tamices y se divide la muestra en fracciones. Luego, empleando tamices de barras paralelas colocadas a separaciones  $\frac{3}{5}[(d_i + D_i) / 2]$  el material es pasado entre las barras. Las partículas que pasen el tamiz son consideradas planas. En lugar de los tamices de barras paralelas, se puede utilizar un calibrador con ranuras cuyas aberturas son del mismo tamaño de las separaciones de las barras de los tamices.

El ensayo de índice de alargamiento consiste en dos procesos sucesivos. En primer lugar, el material usado debe tamizarse media, se divide la muestra en fracciones. Luego, cada fracción se analiza utilizando un calibrador de longitudes, el cual tiene

barras verticales separadas a distancias  $9/5[(d_i + D_i) / 2]$ . Se considera que todas las partículas retenidas por las barras son alargadas.

- **Importancia y uso:** En la construcción de carreteras, la forma de las partículas del agregado utilizado es importante tenerlo identificado ya que las partículas con formas defectuosas generan inconvenientes. Tanto partículas muy planas y alargadas tienden a producir mezclas de concreto poco trabajables. Lo que afectara su durabilidad a largo plazo. Este tipo de partículas en zonas como la capa granular y en las mezclas asfálticas son expuestas a roturas y desintegración durante el proceso de compactación, lo que genera una modificación de la granulometría del agregado, además de su comportamiento [19].

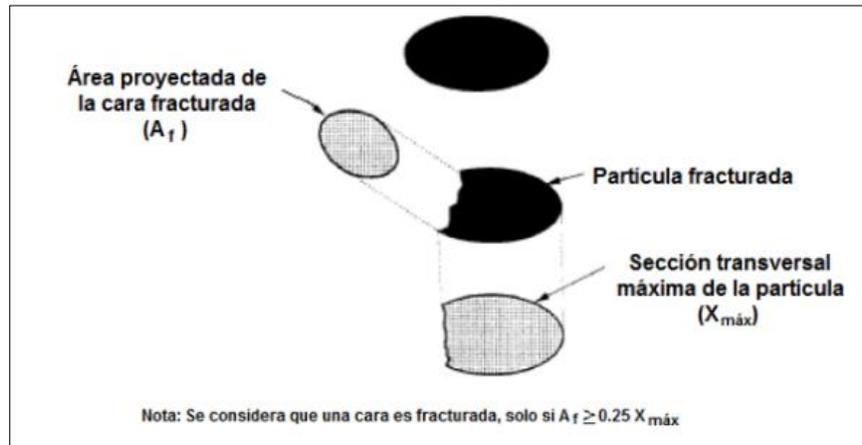
### **6.7.3 Caras fracturadas**

Con este ensayo se determina el porcentaje, ya sea por masa (pasándose) o por conteo de las partículas de un agregado grueso para encontrar el número específico de caras fracturadas.

Se indica que una partícula es de cara fracturada cuando su superficie es angulosa, áspera o quebrada ya puede por parte de la trituración, en ocasiones por otros medios artificiales o por su naturaleza.

Se considera que una cara es fracturada, solamente si tiene un área proyectada al menos tan grande como un cuarto de la máxima área proyectada (sección transversal máxima) de la partícula (excluyendo pequeñas mellas) y dicha cara tiene bordes cortantes o ligeramente despuntados.

**Ilustración 3.** Esquema de una partícula fracturada con una cara fracturada



**Figura:** Tomada del INVIAS E-227

- **Importancia y uso:** Como uno de los requisitos principales a maximizar relacionados con el porcentaje de partículas fracturadas en los agregados gruesos es la resistencia al corte, ya que una partícula con cara fracturada incrementa la fricción entre partículas ya sean ligadas o no.

Otro gran requisito, es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y así proporcionar mayor fricción y textura a los agregados usados en la construcción de capas de rodadura. Este método proporciona un procedimiento normalizado para determinar la aceptabilidad de los agregados gruesos con respecto a estos requisitos.

Según las especificaciones en la norma, el número de caras fracturadas en una partícula fracturada varía ya sea porcentaje por masa o conteo. Si la especificación no lo define con claridad, se debe utilizar el criterio de al menos una cara fracturada y se calcula el porcentaje por masa [20].

#### **6.7.4 Desgaste por medio de la máquina de los ángeles**

Este ensayo mide la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica definida, luego de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio que contiene un número determinado de esferas metálicas, el cual depende de la granulometría de

la muestra de ensayo. Una pestaña de acero recoge la muestra y las esferas de acero, hasta que caigan por acción de la gravedad en el extremo opuesto del tambor, lo que ocasiona que a medida que el tambor vaya girando y las esferas cayendo, crean un efecto de impacto y trituración. Entonces, la muestra y las esferas ruedan dentro del tambor, hasta que la pestaña las levanta y se repite el ciclo. Tras el número especificado de revoluciones, finalmente se retira el contenido del tambor y se tamiza la porción de agregado para medir el desgaste, como un porcentaje de pérdida.

**Ilustración 4.** Máquina de los ángeles



**Fuente:** Propia

- **Importancia y uso:** Con la ayuda de este ensayo, el cual es usado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados de este ensayo no proporcionan de manera automática comparaciones válidas entre fuentes marcadamente diferentes en origen, composición o estructura [21].

## 6.8 ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

### 6.8.1 Penetración

El material bituminoso es ensayado, y por medio de la distancia expresa su consistencia, en décimas de milímetro, mediante una aguja que penetra verticalmente el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25° C, (77° F) durante un tiempo de 5 segundos gracias al mecanismo de una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g; aunque se pueden emplear otras condiciones previamente definidas.

Previamente se derrite una muestra del producto bituminoso (si al inicio se encontraba a temperatura ambiente) y se deja enfriar de manera controlada. Para finalmente, empleando un penetrómetro con una aguja normalizada se penetra la muestra bajo unas condiciones especificadas.

- **Importancia y uso:** Este ensayo es usado para medir la consistencia de productos bituminosos a la temperatura de ensayo, entre más altos son los valores de penetración, la consistencia del material es más blanda [22].

### 6.8.2 Punto de inflamación y de combustión

El método puede ser empleado a todos los productos de petróleo con puntos de inflamación por encima de 79° C (175° F) y por debajo de 400° C (752° C). Esta prueba es dinámica y su resultado depende del diseño del aparato, de su estado y así mismo del control de la velocidad a la cual se incrementa la temperatura del producto. Lo que quiere decir, que los resultados obtenidos varían según el método utilizado o el equipo en el que fue ensayado con respecto a los demás ensayos.

- **Punto de inflamación:** la muestra es puesta a la menor temperatura, corregida a una presión barométrica de 101.3 kPa, a la cual mediante una fuente de inflamación es acercada y los vapores de la muestra de ensayo desprendan una llamarada repentina bajo las condiciones especificadas de la prueba.

- Punto de combustión: la muestra es puesta a la menor temperatura corregida a una presión barométrica de 101.3 kPa, a la cual mediante una fuente de combustión hace que los vapores de la muestra de ensayo enciendan con una llama sostenida durante un mínimo de 5 segundos, bajo las condiciones especificadas de la prueba.
- **Importancia y uso:** Entre las varias propiedades a considerar de un producto de petróleo, es el riesgo de inflamación de un material, el punto de inflamación nos da una muestra de la tendencia del material a formar una mezcla inflamable con el aire en condiciones controladas de laboratorio.

El punto de inflamación da un aviso de la posible presencia de sustancias altamente volátiles e inflamables en un producto relativamente no inflamable, así evitar accidentes al momento de ser utilizado en campo bajo altas temperaturas o durante su vida útil ya que gracias al método medimos y conocemos las propiedades de reacción al calor y a la llama bajo condiciones de laboratorio controladas inicialmente.

Los resultados del ensayo se deben tomar solamente como elementos estimativos de las precauciones por adoptar durante la manipulación de estos productos para prevenir los riesgos de un incendio [23].

### **6.8.3 Punto de ablandamiento**

En este ensayo la norma establece que la determinación del punto de ablandamiento de productos bituminosos se realiza en el intervalo de 30° a 157° C (86a 315° F), utilizando el aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada (30 a 80° C) o en glicerina USP (más de 80 hasta 157° C).

Con la ayuda de dos discos horizontales de material bituminoso, fundidos entre anillos de latón, se inicia a calentar de manera controlada un frasco con agua, mientras cada anillo soporta una bola de acero. Se considera el punto de

ablandamiento a la temperatura media obtenida de los dos discos los cuales se ablandan a medida que sube la temperatura lo suficiente, para que cada bola envuelta en material bituminoso caiga una distancia de 25 mm (1").

- **Importancia y uso:** Los productos bituminosos son materiales visco-elásticos y cambian gradualmente a más blandos y menos viscosos a medida que aumenta la temperatura. Por esta razón, el punto de ablandamiento se debe determinar por medio de un método arbitrario pero muy definido, que produzca resultados reproducibles y comparables.

Al momento de clasificar los productos bituminosos, el punto de ablandamiento es un buen indicador de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas durante su vida de servicio. También, sirve para establecer la uniformidad de los suministros del producto y de las fuentes de abastecimiento [24].

#### **6.8.4 Determinación de la viscosidad**

El objetivo de este ensayo es medir la viscosidad de un ligante asfáltico a una temperatura elevada, desde 60 hasta más de 200° C, usando un viscosímetro rotacional.

La relación entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de corte se llama coeficiente de viscosidad. Este coeficiente es, entonces, una medida de la resistencia del líquido a fluir, y se llama comúnmente viscosidad del líquido. La unidad de viscosidad en el sistema SI es 1 Pa·s (1 N·s/m<sup>2</sup>) y se denomina Pascal-segundo. La unidad de viscosidad en el sistema cgs es 1 g/cm·s (1 dina·s/cm<sup>2</sup>) y se denomina poise (P). 1 Pa·s equivale a 10 P.

Este método de ensayo es útil para medir la viscosidad supuesta del asfalto a las diferentes temperaturas de aplicación. A altas temperaturas, la medida de viscosidad se usa para determinar la manejabilidad y la facilidad de bombeo en la refinería, terminal o planta asfáltica. Por el contrario, los valores medidos mediante

este procedimiento se pueden utilizar para desarrollar diagramas de temperatura contra viscosidad, los cuales son utilizados para estimar las temperaturas apropiadas de mezclado y compactación durante el diseño de las mezclas asfálticas en caliente [25].

#### **6.8.5 Ductilidad de los materiales asfálticos**

Luego de medir la distancia hasta la cual se elonga una probeta con dimensiones establecidas hasta alcanzar la rotura, hallamos la ductilidad de los materiales asfálticos de consistencia sólida y semisólida, sus dos extremos se separan a una velocidad de  $50 \pm 2.5$  mm por minuto, a una temperatura de  $25 \pm 0.5^\circ$  C ( $77 \pm 1.0^\circ$  F), establecido por la norma.

Si el ensayo repite, pero con una temperatura distinta, se debe aclarar, y además se deberá especificar la velocidad correspondiente.

Dicho ensayo se determina luego de que un material con material asfáltico es sometido a tracción, en condiciones normales de velocidad y temperatura anteriormente establecidas y mencionadas, en un baño de agua, indicando que la ductilidad del material es la longitud máxima en cm, que se estira la probeta hasta el instante de su rotura.

- **Importancia y uso:** El ensayo ofrece una serie de propiedades a tensión de los materiales bituminosos y se usa para establecer si el producto que se ensaya cumple la especificación correspondiente. Generalmente, se considera que un asfalto de baja ductilidad presentará bajas propiedades adhesivas y un deficiente comportamiento en servicio [25].

#### **6.9 MÉTODO MARSHALL**

El método Marshall se emplea para dosificar mezclas en calientes de agregados pétreos y cemento asfáltico con o sin adición de llenantes minerales. El objetivo del

diseño de una mezcla asfáltica es determinar la proporción adecuada de cemento asfalto en la mezcla, el cual asegure:

- Suficiente estabilidad como satisfacer las exigencias del servicio sin desplazamientos o distorsiones.
- Suficiente asfalto para asegurar la obtención de un pavimento durable que resulta del recubrimiento completo de las partículas de agregado pétreo, impermeabilizando y ligando las mismas entre sí, bajo una compactación adecuada.
- Suficiente trabajabilidad para permitir una eficiente colocación de la mezcla con que se pavimentará sin que se produzca segregación.
- Suficientes vacíos con aires en mezcla compactadas, para proveer una reserva de espacio que impida exudaciones y pérdidas de estabilidad al producirse una pequeña compactación adicional bajo las cargas del tránsito, como los posibles aumentos de volumen de asfalto a altas temperaturas.

Esta norma describe el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de las muestras de mezclas asfálticas para pavimentación.

Las muestras, de forma cilíndrica y de 102 mm (4") de diámetro, son probadas a carga en dirección perpendicular a su eje cilíndrico empleando el aparato Marshall. El procedimiento se puede emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas. El método descrito es aplicable solamente a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 25.4 mm (1"), según indica la norma.

El procedimiento consiste anticipadamente en la fabricación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica, de 102 mm (4") de diámetro y una altura nominal de 63.5 mm (2½"), las cuales se someten a curado en un baño de agua o en un horno, y luego a carga en la prensa Marshall bajo condiciones normalizadas, determinándose su estabilidad y su deformación (flujo).

El ensayo Marshall se puede realizar con dos tipos de equipos: (1) el método tradicional, que emplea un marco de carga con un anillo de carga y un dial para

medir la deformación (flujo) de las probetas (Método A), y (2) un registrador de carga–deformación combinado con una celda de carga y un transductor lineal diferencial variable (TLDV) u otro dispositivo de registro automático de la deformación (Método B) [27].

## **6.10 MÓDULO DINÁMICO**

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica se establece como el valor de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima, obtenido en un ensayo a compresión, puede ser uniaxial o triaxial, a flexión y tracción indirecta, utilizando cargas en forma cóncava. Para determinar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica existen diferentes técnicas, entre las cuales están: ensayos de laboratorio, monogramas y fórmulas o correlaciones.

Otra de las técnicas utilizadas para la determinación de módulos dinámicos de mezclas asfálticas se basa en el módulo dinámico del asfalto y en las concentraciones volumétricas del asfalto y de los agregados (datos del diseño Marshall). [28].

## 7 METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología basada principalmente en las especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carretera del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) 2013. Todos los ensayos fueron realizados en las instalaciones de los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga.

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario seguir la metodología enseñada seguidamente:

### 7.1 BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

La recolección bibliográfica se hizo a partir de libros, artículos científicos, base de datos de la UPB.

### 7.2 RECOLECCIÓN DE MATERIALES A UTILIZAR

- Se contó con el apoyo de la empresa AC Construcciones y Pavimentos SAS ubicado en la vía Barrancabermeja La Lizama Km 12, esta nos ayudó con el suministro del material (agregado) procedente del rio Sogamoso.

**Ilustración 5.** Ubicación de la empresa AC Construcciones y Pavimentos SAS



**Fuente:** Google Maps.

**Ilustración 6.** Agregado del río Sogamoso en empresa



**Fuente:** Propia

- Por otra parte, el cemento asfáltico fue suministrado por la empresa Multinsa S.A. ubicada en la Carrera 19a #73-65, Barrio La Libertad, Barrancabermeja, Santander.

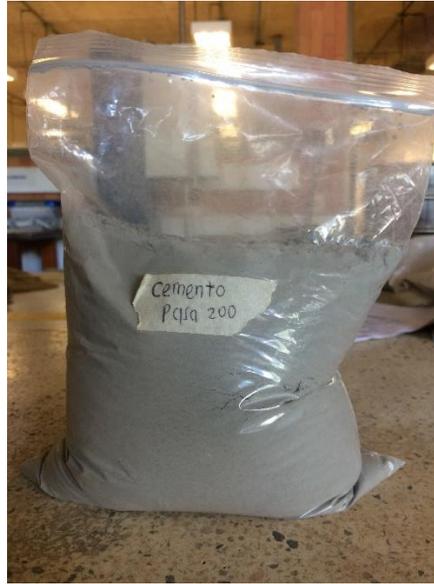
A continuación, se muestran ilustraciones de los materiales utilizados:

**Ilustración 7.** Cemento Asfáltico 60/70



**Fuente:** Propia

**Ilustración 8. Cemento Portland**



**Fuente:** Propia

### **7.3 ENSAYOS DE LABORATORIOS**

Los ensayos mencionados a continuación siguieron la metodología del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), la cual incluye la caracterización de los materiales, tales como, el agregado y el cemento asfáltico; además, la elaboración de briquetas (Tipo Marshall) y los ensayos mecánicos realizados a estas, como lo son: peso específico “bulk”, estabilidad – flujo y análisis de densidad y vacíos.

#### **7.3.1 Caracterización del agregado**

- **Granulometría (INV E-213-13):** Con el agregado conseguido del río Sogamoso se llevó a cabo la granulometría correspondiente para una mezcla asfáltica MCD-19, como lo estipula el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en el artículo 450 “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Concreto asfáltico).

**Tabla 1.** Granulometría MDC-19

TAMIZ	TAMIZ	% Pasa		Diseño	
IN (")	Mm	Min	Max	% Pasa	% Ret
3/4"	19,05	100	100	98,7	2,9
1/2"	12,50	80	95	82	14,5
3/8"	9,52	70	88	74	9,8
No. 4	4,75	49	65	53	27,7
No.10	2,00	29	45	33	12,3
No. 40	0,42	14	25	16	11,9
No. 80	0,18	8	17	11	4,1
No. 200	0,075	4	8	6	2,7
P-200	0,0	0	0	0	1,2

Fuente: Propia

**Ilustración 9.** Distribución granulométrica.

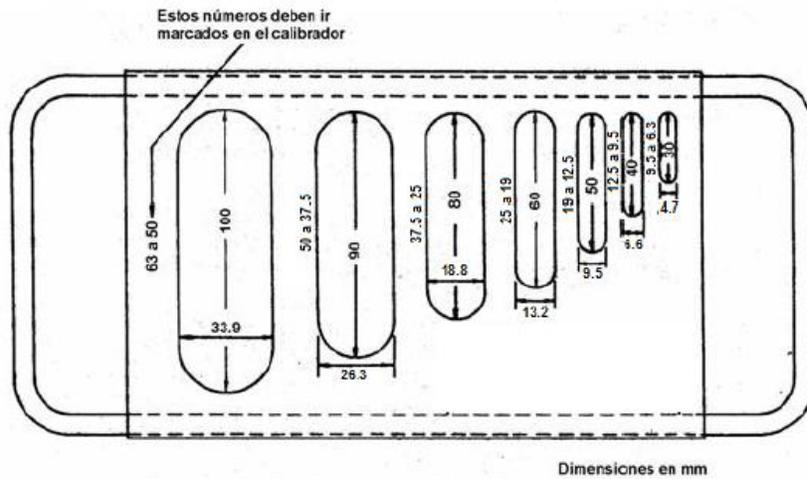


Fuente: Propia

Posteriormente, se realizaron los ensayos correspondientes para caracterizar los agregados procedentes del río Sogamoso:

- **Índice de alargamiento y aplanamiento (INV E-230-13):** Luego de dividir la muestra por medio de los tamices 3/4", 1/2" y 3/8" se utilizó el calibrador de espesores donde las partículas que pasen este son consideradas planas. El cribado se realizó manualmente, pero sin forzar ni romper las partículas.

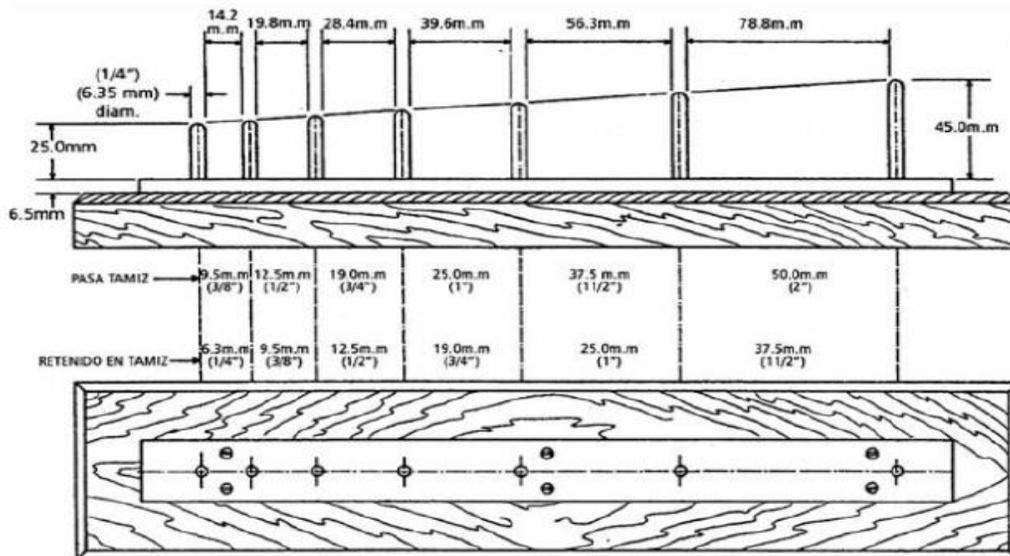
**Ilustración 10.** Calibrador de espesores



**Fuente:** Manual de normas de ensayos de materiales para carreteras (INV E-230-13)

De la misma manera, el ensayo de alargamiento consiste en primer lugar, dividir la muestra y por medio del calibrador de longitudes evaluar las partículas, donde las que queden retenidas por las barras son denominadas alargadas.

**Ilustración 11.** Calibrador de longitudes



**Fuente:** Manual de normas de ensayos de materiales para carreteras (INV E-230-13)

Los resultados de los ensayos mencionados serán encontrados en la **Tabla 2** y **Tabla 3** mostradas a continuación:

**Tabla 2.** Resultados: Ensayo de índice por fracción de partículas alargadas

<b>PARTICULAS ALARGADAS</b>						
<b>Tamiz #</b>	<b>Masa (Kg) Pasa</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Masa (Kg) No Pasa</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Índice por Fracción</b>	<b>Índice Global</b>
<b>3/4</b>	0,50	100%	0	0%	25%	
<b>1/2</b>	0,48	96%	0,02	4%	24%	30%
<b>3/8</b>	0,37	74%	0,13	26%	19%	

Fuente: Propia

**Tabla 3.** Resultados: Ensayo de índice por fracción de partículas aplanadas

<b>PARTICULAS APLANADAS</b>						
<b>Tamiz #</b>	<b>Masa (Kg) Pasa</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Masa (Kg) No Pasa</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Índice por Fracción</b>	<b>Índice Global</b>
<b>3/4</b>	0,14	28%	0,36	72%	18%	
<b>1/2</b>	0,10	20%	0,40	80%	20%	72%
<b>3/8</b>	0,12	24%	0,38	76%	19%	

Fuente: Propia

- **Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E-227-13):** Inicialmente se lavó el material respectivamente al tamiz definido (3/4", 1/2" y 3/8") con el fin de remover algún residuo de material fino. Luego, se determinó la masa de la muestra y se esparció sobre una superficie limpia para luego verificar detalladamente que la partícula cumpliera con el criterio de fractura; posteriormente se pesó la muestra que cumplió con dicho criterio, esto con el fin de conocer el porcentaje de las partículas fracturadas.

**Ilustración 12.** Verificación detallada para el criterio de caras fracturadas



**Fuente:** Propia

Los porcentajes de caras fracturados pueden ser apreciados a continuación en la **Tabla 4.**

**Tabla 4.** Resultados: Ensayo de porcentaje de caras fracturadas

<b>CARAS FRACTURADAS</b>			
<b>Tamiz #</b>	<b>Masa (Kg) Partículas Fracturadas</b>	<b>Masa (Kg) Partículas No Fracturadas</b>	<b>% de Caras Fracturadas</b>
<b>3/4</b>	0,42	0,10	80,8%
<b>1/2</b>	0,46	0,04	92,0%
<b>3/8</b>	0,42	0,08	84,0%

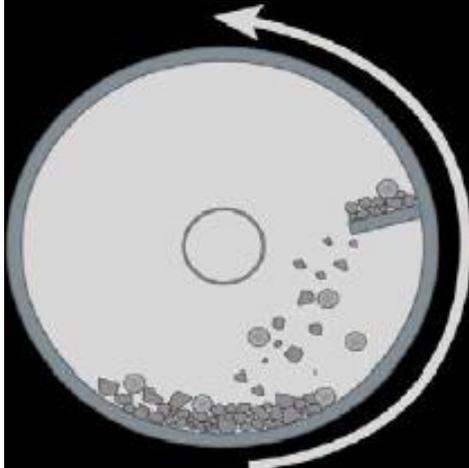
**Fuente:** Propia

- **Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de La Máquina De Los Ángeles (INV E-218-13):** Se tomó una muestra compuesta por 2500 gr retenidos en el tamiz 1/2" y el tamiz 3/8" haciendo un total de 5000 gr según lo indica del método B, debido a que en el tamiz 3/4" no queda retenido un gran porcentaje de la muestra.

Luego de verificar que el tambor estuviese limpio se colocó en la máquina de los ángeles la muestra junto con las 12 esferas, para así hacer girar el tambor a una velocidad entre 30-33 rpm hasta completar 500 revoluciones. Después, se procedió

a tamizar el material utilizando el tamiz No. 12 y en consecuencia pesar el material retenido y el que pasa para calcular el porcentaje de desgaste sufrido.

**Ilustración 13.** Degradación del agregado durante el uso de la máquina de los ángeles



**Fuente:** Manual de normas de ensayos de materiales para carreteras (INV E-218-13)

**Ilustración 14.** Uso del tamiz No. 12



**Fuente:** Propia

El resultado en la **Tabla 5** corresponde al desgaste del agregado sufrido en la máquina de los ángeles.

**Tabla 5.** Resultados: Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángulos

<b>Muestra (gr)</b>	2500	<b>Tamiz</b>
		<b>1/2</b>
	2500	<b>Tamiz</b>
		<b>3/8</b>
<b>Muestra Total (gr)</b>	5000	
<b>Masa Retenida en Tamiz #12 (gr)</b>		3780
<b>% Perdidas</b>	24,4%	

**Fuente:** Propia

Finalmente se obtuvieron los resultados generales para luego compararlos con los requisitos establecidos por las diferentes normas.

**Tabla 6.** Resumen de resultados de la caracterización de los agregados

<b>No</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>NORMA INV</b>	<b>RESULTADOS</b>		<b>ESTADO</b>
			<b>Proyecto de Grado</b>	<b>Requisitos</b>	
			-Índice de		
			Alargamiento:	Alargamiento 35%	
			Material 3/4": 25%;	Máx.	
			Material 1/2": 24%;		
<b>1</b>	<b>Índice de Aplanamiento y Alargamiento</b>	<b>E-230</b>	Material 3/8": 19%.		<b>Cumple</b>
			-Índice de		
			Aplanamiento:	Aplanamiento 35% Máx.	
			Material 3/4": 18%;		
			Material 1/2": 20%;		
			Material 3/8": 19%.		

<b>2</b>	<b>Caras</b>	E-227	Material 3/4": 81%;	75% Mínimo	Cumple
	<b>Fracturadas</b>		Material 1/2": 93%;		
	<b>Desgaste</b>		Material 3/8": 84%.		
<b>3</b>	<b>(Máquina de los ángeles)</b>	E-218	24,4%	25% Máximo	Cumple

**Fuente:** Propia

Luego de observar los resultados de la caracterización del agregado, realizados mediante los ensayos en el laboratorio, se puede analizar que los resultados están dentro de los parámetros establecidos por la norma INVIAS. Respecto al gran porcentaje mostrado en el ensayo de caras fracturadas se puede decir que se tuvo un material fracturado casi en su totalidad.

### 7.3.2 Caracterización del cemento asfáltico

A continuación, se presentan los ensayos de caracterización de cemento asfalto, con el fin de conocer sus propiedades mecánicas, y establecer la viabilidad de su uso para este proyecto de grado

- **Penetración (INV E-706-13):** Luego de ubicar el molde debajo de la aguja que sostiene el penetrómetro, es llenado con el asfalto a ensayar, normalmente a una temperatura de 25°C. Al instante, se calibró el penetrómetro verificando que la aguja se encontrara en cero y se aproximó hasta que su punta tocara justamente la superficie de la muestra. Posteriormente se soltó el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado (5 s) para finalmente leer y anotar la distancia expresada en decimas de milímetros, que haya penetrado la aguja la muestra. En este procedimiento se realizaron tres penetraciones en diferentes puntos de la superficie separados entre sí.

**Ilustración 15. Ensayo: Penetración**



**Fuente:** Propia

Después de realizadas las 3 penetraciones en este ensayo como lo indica la norma, se obtuvieron los resultados mostrados en la **Tabla 7**, penetraciones con unidades de medida expresadas en mm las cuales fueron indicadas por el penetrómetro.

**Tabla 7.** Resultados: Ensayo de penetración

<b>Ensayo</b>	<b>Penetración [mm]</b>	<b>Promedio [mm]</b>
<b>1</b>	64	
<b>2</b>	64	64
<b>3</b>	64	

**Fuente:** Propia

- **Punto de inflamación y combustión (INV E-709-13):** En este ensayo se llenó la copa hasta una temperatura no mayor a 56°C, de manera que la parte superior del menisco quedara a nivel con la marca de llenado de la copa. Luego, se aplicó calor a una velocidad considerable y a medida que la temperatura de la muestra iba llegando a su punto de inflamación se aplicaba la llama de prueba cada 2°C sucesivo medidos en el termómetro hasta el punto de aparición de un destello

(chispa) en cualquier punto de la superficie del material. Esta temperatura fue considerada como el punto de inflamación.

Para determinar el punto de combustión se continuó calentando de modo que la temperatura de la muestra aumentara entre 5 y 6°C por minuto y la llama de prueba se siguió aplicando a intervalos de 2°C hasta que el material se inflamara y mantuviera la llama por lo menos durante 5 segundos. En ese momento se tomó el valor de la temperatura para conocer el punto de combustión.

**Ilustración 16.** Ensayo: Punto de inflamación y combustión



**Fuente:** Propia

Los datos registrados en la **Tabla 8** son las temperaturas que se tuvieron en tanto el ensayo de inflamación como el ensayo de combustión, reaccionaron a la llama puesta.

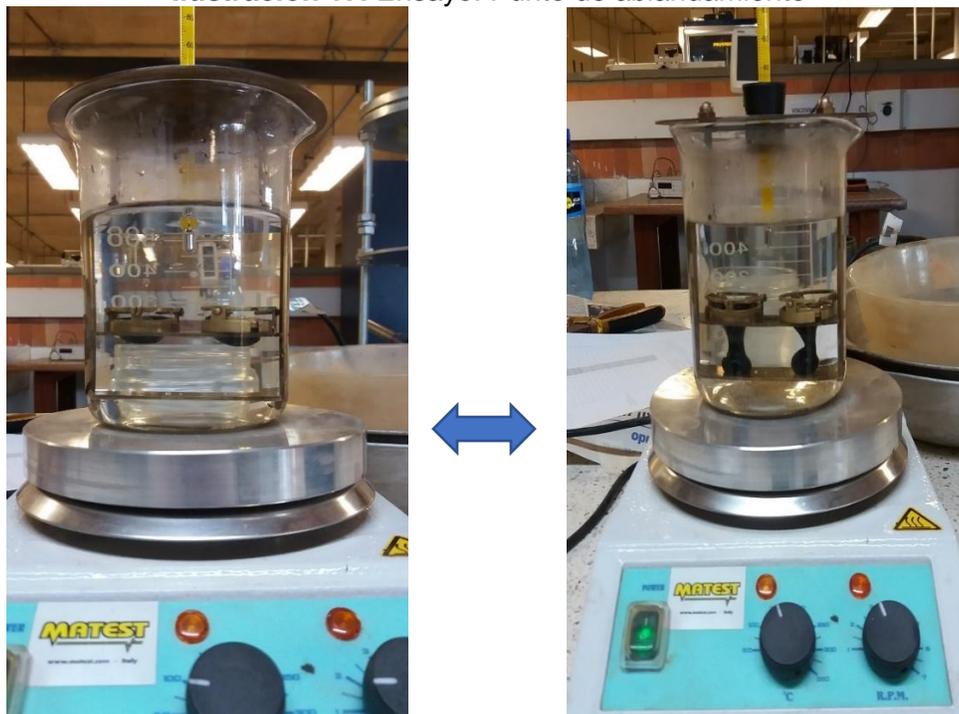
**Tabla 8.** Resultados: Ensayo de punto de inflamación y combustión

Ensayo	Temperatura [°C]
Punto de Inflamación	310
Punto de Combustión	330

**Fuente:** Propia

- **Punto de ablandamiento (INV E-712-13):** Se vertió el cemento asfáltico dentro de los anillos en el cual se dejó un sobrante de la materia por encima de su borde y se apartó para que se enfriara a una temperatura ambiente durante un mínimo de 30 minutos. Luego de que se hayan enfriado la muestra, se cortó el exceso del material de la parte superior para que la superficie del disco concidiera con el nivel superior del anillo. Después, se hizo el montaje de los aparatos en una campana del laboratorio, colocando los especímenes, las guías para el centrado de las bolas dentro del recipiente con agua, a la cual se le varió la temperatura a una de 5°C por minuto. Para cada pareja de anillo y bola se anotó la temperatura indicada por el termómetro en el momento en el que la muestra que rodea tocó el fondo de la placa de referencia.

**Ilustración 17.** Ensayo: Punto de ablandamiento



**Fuente:** Propia

Dicha temperatura es registrada en el instante que la muestra toca el fondo de la placa, dicha temperatura se aprecia en la **Tabla 9** mostrada a continuación; esta indica que ambas muestras tocaron fondo a la misma temperatura.

**Tabla 9.** Resultados: Ensayo de punto de ablandamiento

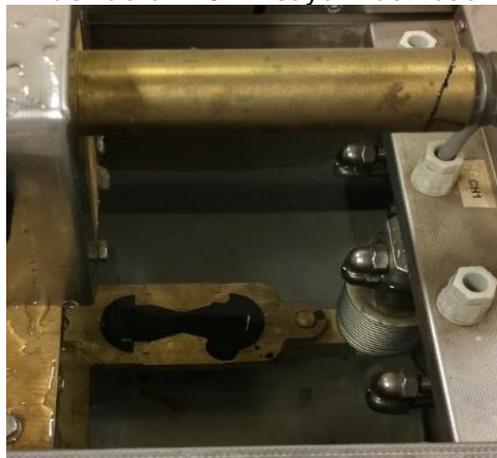
Ensayo	Punto de Ablandamiento [°C]
1	50

Fuente: Propia

- **Ductilidad de los materiales asfálticos (INV E-702-13):** Para este ensayo se ensambló el molde en la placa de bronce, la cual debía ser plana y encontrarse a nivel para que todas las piezas del molde se apoyaran completamente sobre ella, el material asfáltico fue calentado cuidadosamente hasta que se encontrara lo suficientemente fluido para verterlo en el molde. Luego, se dejó enfriar el molde a temperatura ambiente dejándolo reposar para retirar el espécimen.

Se montó la probeta en el ductilómetro introduciendo cada pareja de clavijas en el agua a una temperatura de 22°C. Para luego, poner en acción el mecanismo de arrastre del equipo hasta que llegue a su punto de rotura. Después se observó la distancia a la cual se había separado ambas partes de la muestra.

**Ilustración 18.** Ensayo: Ductilidad



Fuente: Propia

**Ilustración 19.** Resultado final del ensayo de ductilidad



**Fuente:** Propia

En este ensayo realizado anteriormente, los valores registrados como datos del procedimiento fueron la temperatura del agua en grados centígrados y principalmente la ductilidad en centímetros, es decir, cuánto se estira o que tan dúctil es el material utilizado para el proyecto.

**Tabla 10.** Resultados: Ensayo de ductilidad

<b>Ensayo</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Ductilidad [cm]</b>
1	21,9	142

**Fuente:** Propia

- **Densidad (Principio de Arquímedes):** Para la determinación de la densidad del cemento asfáltico se puso en práctica el principio de Arquímedes el cual dice que un cuerpo sumergido en un líquido en reposo recibe un empuje hacia arriba el cual es igual al peso del volumen de agua que desaloja.

Conociendo este principio se prosiguió a elaborar una pequeña bola de cemento asfáltico, la cual fue pesada para conocer su masa.

Luego en una probeta con agua se dejó caer la bola, esta desplazó un volumen de agua. Conociendo la masa de la bola del cemento asfáltico y el volumen de agua desplazado por esta, se pudo conocer su densidad utilizando la fórmula de densidad.

En la **Tabla 11** presentada a continuación se pueden ver los datos utilizados para determinar la densidad del cemento asfáltico usado.

**Tabla 11.** Resultados: Ensayo de densidad

Ensayo	Masa [gr]	Volumen Desplazado [cm <sup>3</sup> ]	Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]
1	13,78	15	0,919

Fuente: Propia

- **Determinación de la viscosidad:** La **Tabla 12** expuesta a continuación, muestra los resultados del ensayo de viscosidad del cemento asfáltico, los cuales fueron tomados del proyecto de grado del estudiante Andrés Felipe Díaz (2017); se tomaron los mismos valores debido a que el material a utilizar es el mismo y los resultados serían iguales.

**Tabla 12.** Valores de la viscosidad del cemento asfáltico

Viscosidad (cP)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	Temperatura (°C)
27083,3	9	97,5	79,8
25763,3	9,5	97,9	79,6
24400	10	97,6	79,7
9064,81	27	97,9	89,6
8863,64	27	97,5	89,6
8818,18	27	97	89,6
3786,82	64,5	97,7	100
3759,69	64,5	97	99,9
3759,69	64,5	97	99,5
1800	135	97,2	109,3
1798,15	135	97,1	109,5

1783,09	136	97	109,7
928,21	195	72,4	119,9
920,51	195	71,8	119,8
920,51	195	71,8	120,1

**Fuente:** Trabajo de grado: Determinación y análisis de ensayo de viscosidad a cementos asfálticos sin modificar y modificados con PVC empleando el viscosímetro rotacional brockfild por Andrés Felipe Díaz en el año 2017

**Tabla 13.** Resumen de resultados de la caracterización del cemento asfáltico

No	NOMBRE	NORMA INV	RESULTADOS		ESTADO
			Proyecto de Grado	Requisitos	
1	Penetración	E-706	64 mm	Mínimo 60 mm Máximo 70 mm	Cumple
2	Punto de Inflamación y Combustión	E-709	-Punto de Inflamación: 310° C -Punto de Combustión: 330° C	Mínimo 230° C	Cumple
3	Punto de Ablandamiento	E-712	50° C	Mínimo 48° C Máximo 54° C	Cumple
4	Ductilidad	E-702	Temperatura: 21,9 °C Ductilidad: 142 cm	Mínimo 100 cm	Cumple
5	Densidad (Principio de Arquímedes)	-	0,919 gr/cm <sup>3</sup>	-	-

**Fuente:** Propia

Finalmente comparando y reduciendo los resultados mostrados en la tabla anterior de la caracterización del cemento asfáltico, se concluyó que todos los ensayos realizados cumplen con los cálculos y requisitos establecidos a la norma INVIAS respectivamente lo que nos indica que es un material apto para la realización de los ensayos necesarios.

### 7.3.3 Caracterización del cemento portland

Para la caracterización del cemento portland se realizó el ensayo de granulometría pasando por un conjunto de tamices la muestra, la cual quedo finalmente en el tamiz pasa 200.

**Ilustración 20.** Conjunto de tamices



**Fuente:** Propia

### 7.3.4 Método Marshall

Después de hacerse la caracterización de los materiales, se procedió a la elaboración del diseño convencional de la mezcla empleando el método Marshall con el objetivo de determinar la proporción adecuada de cemento asfáltico en la mezcla, este estaba planteado con el uso de una mezcla asfáltica convencional sin ningún tipo agregado, para esto se realizaron briquetas de 4%, 4,5%, 5%, 5,5% y 6% de contenido asfáltico donde para cada planteamiento se realizó un total 3 briquetas haciendo un total de 15 muestras de ensayo.

Para el desarrollo del método Marshall se efectuaron los siguientes pasos:

#### 7.3.4.1 Elaboración de las briquetas

- Se programó en Excel una hoja de caculo, y se introdujeron los datos de los porcentajes límites de agregados según el ensayo de granulometría mostrado en el artículo 450 del INVIAS, estos fueron promediados para posteriormente conocer el porcentaje retenido en cada uno los tamices y así, calcular las proporciones en peso (gramos) del agregado pétreo que se debían mezclar según el porcentaje de cemento asfáltico, todo esto con el fin de cumplir con las especificaciones a cerca del peso de las briquetas, las cuales debían pesar 1200 gr.
- Luego, en una bandeja previamente tarada se pesaron sucesivamente las cantidades de cada porción del agregado, anteriormente calculadas en la tabla mencionada en el párrafo anterior para la elaboración de la primera briketa del primer porcentaje.

**Ilustración 21.** Peso de las cantidades de cada porción del agregado



**Fuente:** Propia

- Para la elaboración de las briquetas tanto el agregado como el cemento asfáltico, se pusieron a calentar con ayuda de una estufa eléctrica a una temperatura de 140° y 150° C respectivamente y al mismo tiempo, los moldes tipo Marshall eran metidos al horno para que al momento de elaborar las briquetas no se perdiera temperatura de la mezcla asfáltica.

**Ilustración 22.** Materiales puestos a calentar



**Fuente:** Propia

- En el momento en que el agregado alcanzó la temperatura establecida se llevó a un recipiente donde se iba a realizar el mezclado y a continuación se vertió la cantidad requerida de asfalto previamente calculada, también a la temperatura indicada.

**Ilustración 23.** Vertimiento del asfalto al agregado



**Fuente:** Propia

- Seguido a esto, se mezclaron los agregados y el asfalto lo más rápidamente posible hasta obtener una mezcla homogénea en un lapo que no superara los 60 segundos. Para este proceso es importante tener en cuenta evitar pérdidas durante el mezclado y su uso.

**Ilustración 24.** Mezcla homogénea del cemento asfáltico y el agregado



**Fuente:** Propia

#### **7.3.4.2 Compactación de las briquetas**

- Se preparó la zona de compactación y se colocó el conjunto de molde de las briquetas previamente calentado, antes de haber vertido la muestra se puso en el fondo del molde un papel de filtro circular ajustado al tamaño del molde para luego de haberse esparcido la mezcla se golpeó con la ayuda de un palustre 15 veces alrededor de perímetro y 10 sobre el interior. Después, se colocó otro papel de filtro sobre la muestra.

**Ilustración 25.** Preparación de la mezcla asfáltica para la compactación



**Fuente:** Propia

- Posteriormente, se le aplicó el número de golpes especificados por la norma (75 golpes). Cuando fueron terminados los primeros golpes se retiró el collar para girarlo, al ajustarlo nuevamente se reanudó con otros 75 golpes en la cara opuesta de la muestra. Al terminar el total de los golpes se desmontó el molde para dejar enfriar hasta que la muestra tuviera una temperatura adecuada para poder sacarla cuidadosamente y dejarla en una superficie plana y lisa ya marcadas e identificadas.

Este procedimiento se realizó tres veces para cada uno de los porcentajes respectivos del cemento asfáltico para tener un total de 15 briquetas.

**Nota 1:** Cabe resaltar que para la elaboración de algunas briquetas se hizo uso de la máquina de compactación automática mientras que para otras fueron compactadas manualmente con el martillo de compactación Marshall.

**Ilustración 26.** Uso de la máquina de compactación automática



**Fuente:** Propia

**Ilustración 27.** Uso del martillo de compactación Marshall



**Fuente:** Propia

#### **7.3.4.3 Ensayos realizados a las briquetas**

Luego de haber dejado reposar las briquetas, estas fueron sometidas a los siguientes ensayos: Determinación del peso específico bulk, el ensayo de estabilidad y flujo y análisis de la densidad y vacíos.

- **Determinación del peso específico “bulk”:** Para este ensayo se determinó la masa pesando la briqueta completamente seca, este valor fue registrado como peso en aire.

Luego la briqueta fue sumergida en un baño de agua cuidando que no quedaran burbujas de aire atrapadas bajo estas, el peso registrado fue el peso en agua.

Por último, para hallar el valor del peso saturado y superficialmente, se sacó la briqueta del agua y con una toalla fue secada rápidamente su superficie llevándola así a la balanza.

**Ilustración 28.** Ensayo: Determinación del peso específico “bulk” (convencionales)



Fuente: Propia

Conociendo estos valores se prosiguió a calcular el peso bulk, densidad y el porcentaje de agua absorbida por volumen de cada una de las briquetas. A continuación, en la **Tabla 14.**

**Tabla 14.** Datos y Resultados: Ensayo de peso bulk (Briquetas convencionales)

% Asfalto	Muestra	Peso en Aire [gr]	Peso en Agua [gr]	Peso Saturada y Superficialmente Seca [gr]	Peso específico Bulk	Promedio P. E. Bulk	Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	% Agua Absorbida Por Vol.
4%	#1	1161,7	649,9	1169,1	2,237	2,217	2,23077	1,425
	#2	1165,7	673,8	1205,8	2,19		2,18459	7,538
	#3	1178,5	668,6	1199	2,22		2,21524	3,865
4,5%	#1	1217,5	688	1218,1	2,30	2,293	2,28985	0,113
	#2	1162,9	656,2	1173,9	2,25		2,23954	2,125
	#3	1089,5	623,8	1090,3	2,34		2,32847	0,171
5%	#1	1170,5	671,9	1171,7	2,34	2,331	2,33491	0,240
	#2	1206,2	693	1206,6	2,35		2,34147	0,078
	#3	1150	651,7	1151,4	2,30		2,29448	0,280

	#1	1200,6	688,5	1201,7	2,34		2,33242	0,214
5,5%	#2	1287	740,1	1287,3	2,35	2,346	2,34492	0,055
	#3	1155,7	663,9	1156,5	2,35		2,33908	0,162
	#1	1195,3	678,5	1195,8	2,31		2,30372	0,097
6%	#2	1176,2	669,7	1176,6	2,32	2,299	2,31342	0,079
	#3	1279,3	715,6	1279,9	2,27		2,26026	0,106

Fuente: Propia

- **Ensayo de estabilidad y flujo:** Para iniciar este ensayo se midieron cada una de las briquetas desde varios puntos para determinar el promedio de su diámetro y espesor, estos datos se utilizaron en la prensa pinzuar para la ejecución de este ensayo.

**Ilustración 29.** Dimensionamiento de las briquetas convencionales



Fuente: Propia

La **Tabla 15** presentada a continuación muestra cada una de las medidas de diámetro y espesor hechas a todas las briquetas elaboradas.

**Tabla 15.** Dimensiones de las briquetas en cm (Briquetas convencionales)

% Asfalto	Diámetro 1	Diámetro 2	Espesor 1	Espesor 2	Espesor 3	Espesor 4	Promedio Diámetro	Promedio Espesor
4%	10,13	10,2	6,68	6,65	6,65	6,62	10,17	6,65
	10,19	10,1	6,95	6,94	6,9	6,9	10,15	6,92
	10,15	10,18	6,76	6,74	6,77	6,76	10,17	6,76
4,5%	10,30	10,33	6,50	6,53	6,43	6,53	10,32	6,50
	10,19	10,23	6,57	6,57	6,56	6,57	10,21	6,57
	10,15	10,22	5,76	5,76	5,74	5,8	10,19	5,77
5%	10,20	10,18	6,31	6,45	6,22	6,22	10,19	6,30
	10,25	10,24	6,35	6,43	6,37	6,38	10,25	6,38
	10,19	10,15	6,36	6,34	6,40	6,43	10,17	6,38
5,5%	10,16	10,14	6,40	6,47	6,48	6,50	10,15	6,46
	10,22	10,25	6,75	6,66	6,74	6,88	10,24	6,76
	10,18	10,17	6,16	6,16	6,21	6,33	10,18	6,22
6%	10,30	10,27	6,36	6,35	6,34	6,39	10,29	6,36
	10,26	10,24	6,28	6,36	6,3	6,34	10,25	6,32
	10,46	10,45	6,86	6,74	6,81	6,80	10,46	6,80

**Fuente:** Propia

Seguidamente, se colocaron las briquetas en baño María durante un tiempo de 30 a 40 minutos aproximadamente a una temperatura de 60°C.

**Ilustración 30.** Briquetas en baño María (Briquetas convencionales)



**Fuente:** Propia

Al mismo tiempo se preparó la prensa pinzuar limpiando las barras guías y las superficies interiores de las mordazas las cuales deben estar previamente calentadas antes de montar las briquetas.

Después de haber transcurrido el tiempo en el baño María, se sacaron las briquetas y fueron secadas con una toalla colocándolas así en la maquina con los criterios establecidos por la norma. Finalmente, se les aplicó una carga de ensayo con la prensa luego de haber digitado en la máquina los datos de sus dimensiones, posteriormente los resultados mostrados por la elaboración del ensayo fueron registrados.

**Ilustración 31.** Ensayo: Estabilidad y flujo (Briquetas convencionales)



**Fuente:** Propia

Los resultados obtenidos de cada una de las briquetas luego de ser falladas en la prensa pinzuar son mostrados a continuación en la **Tabla 16**.

**Tabla 16.** Resultados: Ensayo de estabilidad y flujo (Briquetas convencionales)

% Asfalto	Muestra	Fuerza Max. [KN]	Estabilidad [KN]	Estabilidad Corre. [KN]	Flujo Max. [mm]
4%	#1	0,852	7,99	7,4307	3,811
	#2	-	-	-	-
	#3	0,838	7,69	6,8441	4,722
4,5%	#1	-	-	-	-
	#2	0,745	7,11	6,6123	5,645
	#3	-	-	-	-
5%	#1	-	-	-	-
	#2	0,959	9,53	9,1488	10,300
	#3	0,669	6,65	6,6500	7,217
5,5%	#1	-	-	-	-
	#2	1,277	11,74	10,4486	10,460
	#3	1,011	9,87	10,2648	6,746
6%	#1	0,692	6,90	6,6240	9,717
	#2	0,849	8,55	8,5500	9,791
	#3	-	-	-	-

Fuente: Propia

- **Análisis de densidad y vacíos:** Es importante comentar que para la realización de este ensayo se escogió una briqueta por cada uno de los porcentajes de contenido asfáltico. El valor calculado con este ensayo fue la gravedad específica máxima teórica, necesario para la determinación del porcentaje de vacíos.

Entrando en contexto con el procedimiento de este ensayo, primero se calentó una briqueta de cada porcentaje de cemento asfáltico para posteriormente romperlas en partículas no mayores a 6mm y dejarlas enfriar a una temperatura ambiente.

**Ilustración 32.** Rompimiento de las briquetas convencionales



**Fuente:** Propia

Se colocó la muestra dentro de una bandeja y se pesó en una balanza registrando el dato como masa de la muestra. Después, se agregó la muestra al picnómetro y se añadió agua hasta cubrir la muestra por completo. Se fijó la tapa del contenedor y se conectó la tubería que venía de la bomba de vacíos para luego accionar la máquina y esta vibrara por un tiempo de 17 minutos.

**Ilustración 33.** Ensayo: Análisis de densidad y vacíos (Briquetas convencionales)



**Fuente:** Propia

El valor de la presión del contenedor debía estar a 2,7 Bar (+/- 0,3 bar) para poder cumplir con dicho procedimiento.

Este procedimiento se hizo con tres diferentes niveles de agua, la cual se introducía por la válvula que compartía un embudo y que luego era cerrada para posteriormente repetir el procedimiento. Para finalizar el ensayo, se pesó el picnómetro completo (Picnómetro + tapa + lleno de agua + muestra). Luego de haber retirado el material y limpiado, el picnómetro se volvió a pesar en la misma

forma, pero esta vez sin ninguna muestra. Estos datos fueron registrados para más adelante determinar la gravedad específica máxima teórica (Gmm) de la mezcla (Ver Tabla 17) y así el porcentaje de vacíos.

**Tabla 17.** Resultados: Ensayo de análisis de densidad y vacíos (Briquetas convencionales)

<b>Peso Pic+Tapa+Agua</b>			
<b>[gr]</b>		<b>19700</b>	
<b>% AC</b>	<b>Peso Muestra [gr]</b>	<b>Peso Completo [gr]</b>	<b>Gmm</b>
4	1154	20370	2,38430
4,5	1090	20300	2,22449
5	1170	20370	2,34000
5,5	1134	20340	2,29555
6	1263	20390	2,20419

**Fuente:** Propia

A continuación, se muestran los datos y resultados obtenidos de los ensayos: Peso específico "Bulk", estabilidad y flujo, y análisis de densidad y vacíos.

**Tabla 18.** Resumen de resultados del método Marshall de las briquetas convencionales

%	Asfalto	Muestra	Espesor [cm]	Diámetro [cm]	Pesos [gr]			Volumen	Peso		% De	%	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Estabilidad	
					Seca	En Agua	S.S.S. En Aire		Específicos	Gmm	Agua Absorbida Por Vol.	Vacíos con Aire		[KN]	Flujo
								g (BULK)					Corregida	[mm]	
4		1	6,65	10,17	1161,7	649,9	1169,1	539,668	2,237	2,3843	1,425	-	2,231	7,4307	3,811
4		2	6,92	10,15	1165,7	673,8	1205,8	559,573	2,191	2,3843	7,538	-	2,185	-	-
4		3	6,76	10,17	1178,5	668,6	1199	548,391	2,222	2,3843	3,865	-	2,215	6,8441	4,722
4									<b>2,217</b>	<b>2,3843</b>	<b>4,276</b>	<b>7,023</b>	<b>2,210</b>	<b>7,1374</b>	<b>4,267</b>
4,5		1	6,50	10,32	1217,5	688	1218,1	542,968	2,297	2,2245	0,113	-	2,290	-	-
4,5		2	6,57	10,21	1162,9	656,2	1173,9	537,702	2,246	2,2245	2,125	-	2,240	6,6123	5,645
4,5		3	5,77	10,19	1089,5	623,8	1090,3	469,690	2,335	2,2245	0,171	-	2,328	-	-
4,5									<b>2,293</b>	<b>2,2245</b>	<b>0,803</b>	<b>3,072</b>	<b>2,286</b>	<b>6,6123</b>	<b>5,645</b>
5		1	6,30	10,19	1170,5	671,9	1171,7	513,782	2,342	2,3400	0,240	-	2,335	-	-
5		2	6,38	10,25	1206,2	693	1206,6	526,144	2,349	2,3400	0,078	-	2,341	9,1488	10,3
5		3	6,38	10,17	1150	651,7	1151,4	518,469	2,301	2,3400	0,280	-	2,294	6,6500	7,217
5									<b>2,331</b>	<b>2,3400</b>	<b>0,199</b>	<b>0,401</b>	<b>2,324</b>	<b>7,8994</b>	<b>8,759</b>
5,5		1	6,46	10,15	1200,6	688,5	1201,7	522,905	2,339	2,2955	0,214	-	2,332	-	-

5,5	2	6,76	10,24	1287	740,1	1287,3	555,970	2,352	2,2955	0,055	-	2,345	10,4486	10,460
5,5	3	6,22	10,18	1155,7	663,9	1156,5	505,359	2,346	2,2955	0,162	-	2,339	10,2648	6,746
5,5								<b>2,346</b>	<b>2,2955</b>	<b>0,144</b>	<b>2,191</b>	<b>2,339</b>	<b>10,3567</b>	<b>8,603</b>
6	1	6,36	10,29	1195,3	678,5	1195,8	528,391	2,311	2,2042	0,097	-	2,304	6,6240	9,717
6	2	6,32	10,25	1176,2	669,7	1176,6	521,500	2,320	2,2042	0,079	-	2,313	8,5500	9,791
6	3	6,80	10,46	1279,3	715,6	1279,9	583,991	2,267	2,2042	0,106	-	2,260	-	-
6								<b>2,299</b>	<b>2,2042</b>	<b>0,094</b>	<b>4,318</b>	<b>2,292</b>	<b>7,5870</b>	<b>9,754</b>

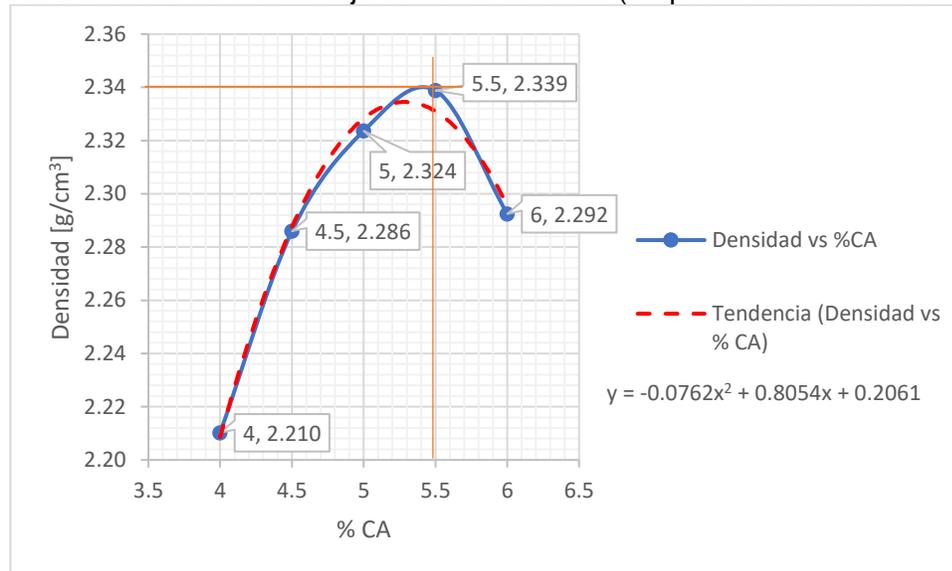
Fuente: Propia

Conociendo todos estos datos se procedió a calcular el porcentaje óptimo de cemento asfáltico que sería utilizado en la elaboración de las siguientes briquetas convencionales y de igual manera en las modificadas.

Para encontrar este valor se dibujaron gráficos que establecieran las siguientes relaciones: Densidad vs Porcentaje de cemento asfáltico, Estabilidad vs Porcentaje de cemento asfáltico y por último Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de cemento asfáltico, los cuales son mostrados a continuación.

- **Densidad vs. Porcentaje cemento asfáltico**

**Gráfica 1.** Densidad vs. Porcentaje cemento asfáltico (briquetas convencionales)

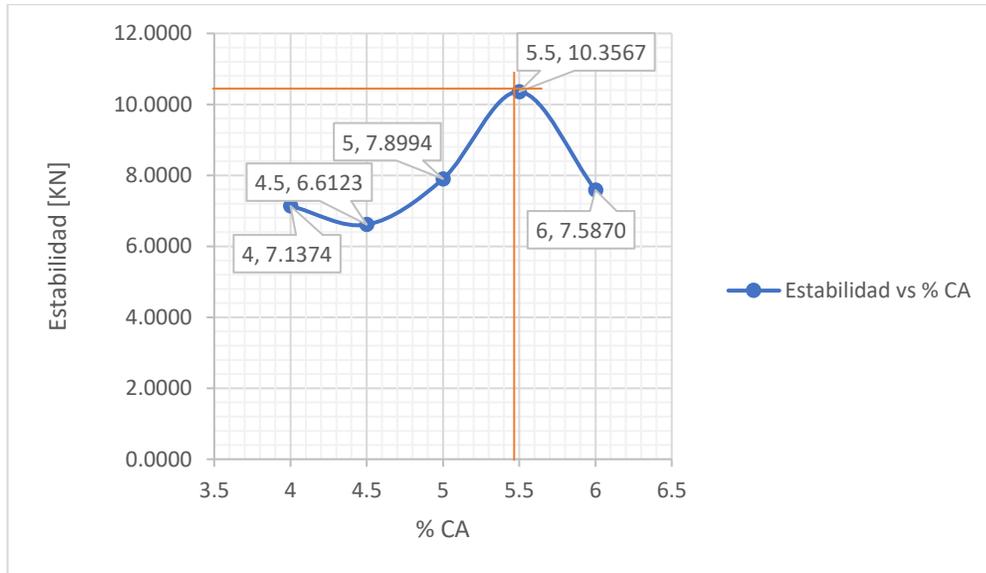


**Fuente:** Propia

Con base a esta gráfica se escogió el valor del porcentaje de cemento asfáltico que correspondía a la densidad máxima de 2,339 g/cm<sup>3</sup>, en este caso **5,5 %**.

- **Estabilidad vs. Porcentaje cemento asfáltico**

**Gráfica 2.** Estabilidad vs. Porcentaje cemento asfáltico (briquetas convencionales)

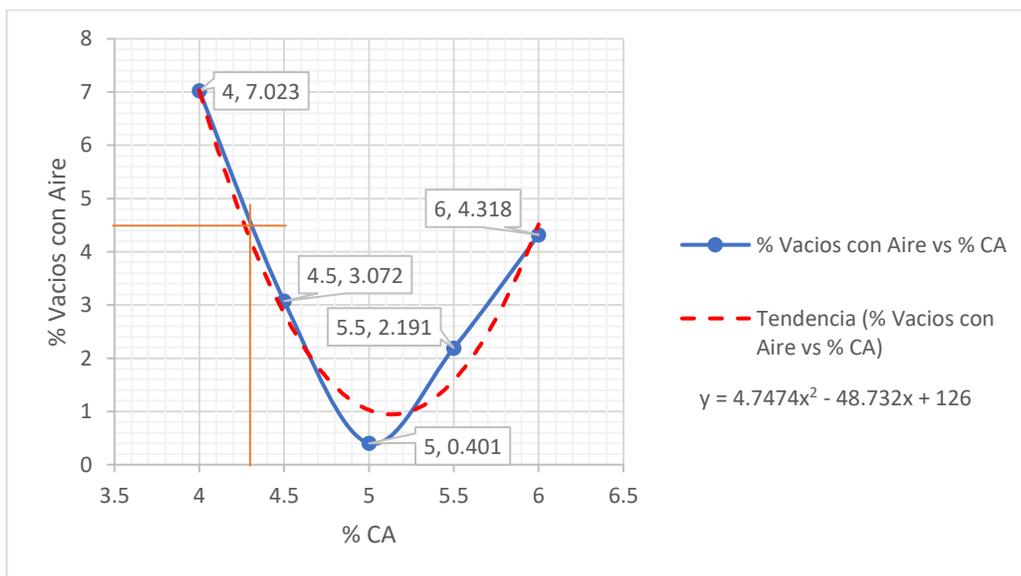


**Fuente:** Propia

Con la gráfica mostrada anteriormente se seleccionó el porcentaje de cemento asfáltico con el valor de la estabilidad máxima de 10,3567 kN correspondiendo al **5,5%**.

- **Porcentaje de vacíos vs. Porcentaje cemento asfáltico**

**Gráfica 3.** Porcentaje de vacíos vs. Porcentaje cemento asfáltico (briquetas convencionales)



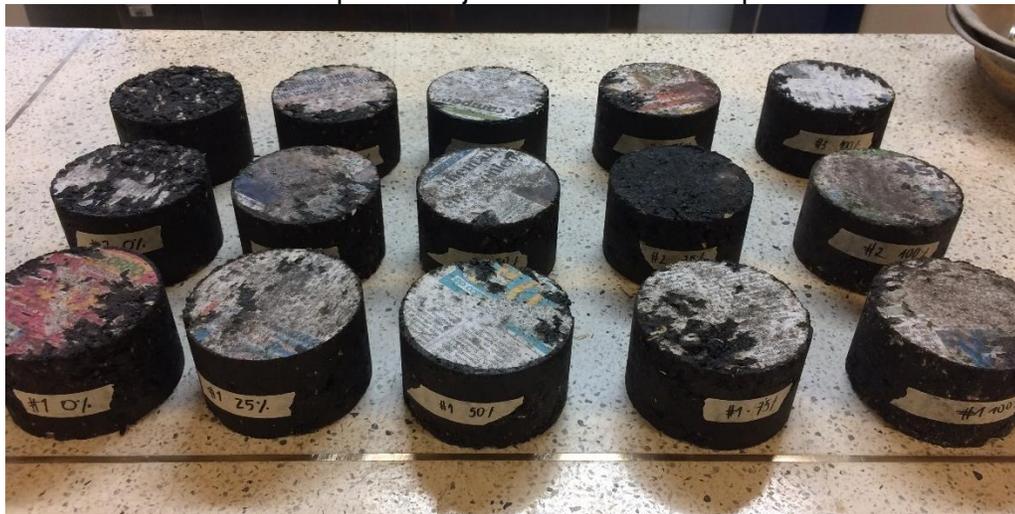
**Fuente:** Propia

Según las especificaciones con aire permitido dadas en la norma INVIAS (Capítulo 4 – Artículo 450 – Tabla 450-10), el valor medio del intervalo de 3 a 6 del porcentaje de vacíos aceptado corresponde a 4,5 % el cual corresponde a un porcentaje de cemento asfáltico equivalente a **4,3 %**.

Con base a los resultados de las curvas dibujadas anteriormente, el contenido óptimo de asfalto se calculó promediando los valores previamente hallados: 5,5 %, 5,5 % y 4,3 %, para así sacar el valor óptimo que fue: **5,1 %** aproximado a **5 %**.

Luego de encontrar el valor óptimo de asfalto, se procedió a elaborar las briquetas con la adición del cemento portland, para el cual se utilizaron 5 porcentajes diferentes: 0%, 25%, 50%, 75% y 100%, los cuales se reemplazaron en la mezcla por el material que pasa el tamiz N° 200, llamado filler. Se optó por utilizar estos porcentajes luego de considerar la información encontrada en los artículos: **Influencia de las características del relleno mineral en la resistencia de una mezcla asfáltica** y **Comportamiento de mezclas asfálticas cerradas mediante la aplicación del ensayo fénix**, descritos en el Capítulo 3. Antecedentes.

**Ilustración 34.** Briquetas mejoradas con cemento portland



**Fuente:** Propia

Seguidamente de elaboradas las briquetas mejoradas con cemento portland, se realizaron los ensayos respectivos al método Marshall para establecer el

comportamiento mecánico, dichos ensayos explicados anteriormente al momento de la determinación del porcentaje óptimo del cemento asfáltico.

### 7.3.5 Módulo Dinámico

Posteriormente, se prosiguió a elaborar cinco (5) briquetas en el compactador giratorio ingresando los valores del peso de la muestra, la densidad y altura deseada con el fin de llegar a las medidas aptas para realizar el ensayo de módulo dinámico según la norma AASTHO TP 62-03 de 2005.

**Ilustración 35.** Proceso de elaboración de briquetas en el compactador giratorio



**Fuente:** Propia

Para terminar, se elaboró el ensayo de modulo dinámico con la ayuda de la maquina DTS-30, y basándose en la norma AASTHO TP 62-03 de 2005, la cual hace referencia a la aplicación de un esfuerzo de compresión axial sinusoidal a una muestra de asfalto con varias frecuencias y a diferentes temperaturas, para medir el esfuerzo aplicado, y la recuperación de deformación axial de las briquetas.

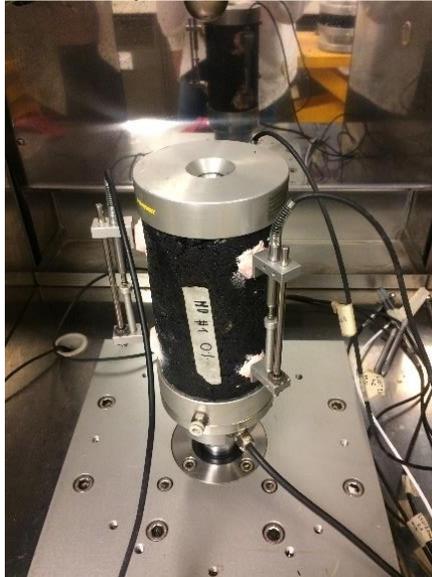
Luego de preparadas las briquetas con el compactador giratorio se le instalaron seis (6) pines en lugares específicos a cada una de ellas (Ver ilustración 36), con el fin de ubicar los sensores de deformación respectivos (Ver ilustración 37).

**Ilustración 36. Pines instalados**



**Fuente: Propia**

**Ilustración 37. Briqueta con sensores instalados**



**Fuente: Propia**

En la **Tabla 19** y **Tabla 20** se muestran las frecuencias, ciclos y temperaturas aplicadas para la realización del ensayo.

**Tabla 19.** Frecuencias Y Ciclos

<b>Frecuencias [Hz]</b>	<b>Ciclos</b>
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

**Fuente:** American Association of State Highway and Transportation Officials (AASTHO), 2005

La temperatura de 4.4C° no se empleó para determinar los módulos, por seguridad del equipo y debido a la condensación que genera el frio, trabajar a una temperatura de 4.4°C genera agua que puede afectar los circuitos de la máquina.

Además, en el territorio colombiano, no tendríamos proyectos viales con estas condiciones de temperatura, por estas razones expresadas anteriormente, se consideró con el aval del director de este trabajo de grado, no emplear la temperatura de 4.4°C

**Tabla 20.** Temperaturas

<b>Temperaturas °C (°F)</b>
4,4 (40)
21,1 (70)
37,8 (100)
54,4 (130)

**Fuente:** American Association of State Highway and Transportation Officials (AASTHO), 2005.

## 8 DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos del método de Marshall y módulo dinámico realizados en el laboratorio:

### 8.1 ENSAYOS DEL MÉTODO MARSHALL

#### 8.1.1 Determinación del peso específico “Bulk”

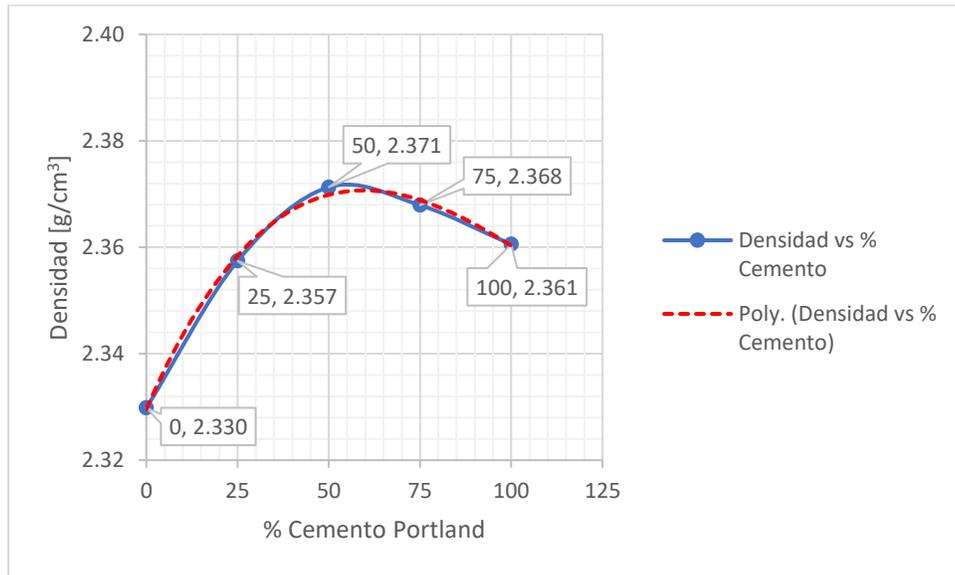
En la **Tabla 21** se muestran los resultados obtenidos del ensayo de peso bulk en las briquetas modificadas con diferentes porcentajes de cemento portland en el filler.

**Tabla 21.** Datos y Resultados: Ensayo de peso bulk (Briquetas mejoradas)

% Cemento Portland	Muestra	Peso en Aire [gr]	Peso en Agua [gr]	Peso Saturada y Superficialmente Seca [gr]	Peso específico Bulk	Promedio P. E. Bulk	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	% Agua Absorbida Por Vol.
0%	#1	1181,4	677,8	1183,8	2,335	2,337	2,32778	0,474
	#2	1178,5	676,5	1181,8	2,33		2,32528	0,653
	#3	1172,4	674,3	1174,6	2,34		2,33636	0,440
25%	#1	1195,9	691,9	1197,6	2,36	2,365	2,35775	0,336
	#2	1187,2	687	1189,9	2,36		2,35363	0,537
	#3	1172,4	680	1175,1	2,37		2,36090	0,545
50%	#1	1186,3	688,6	1187,8	2,38	2,378	2,36927	0,300
	#2	1193,4	692,8	1194,4	2,38		2,37205	0,199
	#3	1201,5	697,3	1202,2	2,38		2,37254	0,139
75%	#1	1181,5	686,3	1182,6	2,38	2,375	2,37347	0,222
	#2	1182,8	688,2	1184,1	2,39		2,37800	0,262
	#3	1195	690,1	1196,6	2,36		2,35225	0,316
100%	#1	1182,1	687	1183,7	2,38	2,368	2,37277	0,322
	#2	1191	694,9	1192,4	2,39		2,38679	0,281
	#3	1170,8	672,7	1175,4	2,33		2,32204	0,915

Fuente: Propia

**Gráfica 4.** Densidad vs. Porcentaje cemento portland (briquetas mejoradas)



**Fuente:** Propia

En la **Gráfica 4**, se observa que la densidad máxima fue de 2,371 gr/cm<sup>3</sup> y se obtuvo con un porcentaje de cemento portland de 50 %. Además, se puede analizar que la densidad es mayor cuando se utilizan agregados mezclados con cemento portland teniendo en cuenta que el 0% corresponde a una mezcla convencional.

### 8.1.2 Ensayo de estabilidad y flujo

En la **Tabla 22**, se encuentran todas las medidas de las briquetas con sus respectivos porcentajes de cemento portland, necesarias para ejecutar el ensayo de estabilidad y flujo en la prensa pinzuar. Mientras que en la **Tabla 23** se encuentran los resultados obtenidos del ensayo.

**Tabla 22.** Dimensiones de las briquetas en cm (Briquetas mejoradas)

% Cemento	Diámetro		Espesor				Promedio	
	1	2	1	2	3	4	Diámetro	Espesor
0%	10,12	10,1	6,34	6,34	6,34	6,35	10,13	6,34
	10,14	10,14	6,34	6,32	6,33	6,33	10,14	6,33
	10,16	10,2	6,32	6,34	6,33	6,33	10,18	6,33
25%	10,16	10,18	6,31	6,33	6,33	6,32	10,17	6,32
	10,18	10,17	6,3	6,36	6,26	6,28	10,18	6,30
	10,11	10,18	6,16	6,17	6,15	6,14	10,15	6,16
50%	10,22	10,25	6,14	6,16	6,17	6,16	10,24	6,16
	10,14	10,18	6,29	6,28	6,3	6,28	10,16	6,29
	10,18	10,15	6,29	6,31	6,29	6,29	10,17	6,30
75%	10,14	10,17	6,20	6,2	6,21	6,20	10,16	6,20
	10,06	10,1	6,21	6,19	6,19	6,18	10,08	6,19
	10,17	10,1	6,3	6,3	6,29	6,3	10,14	6,30
100%	10,16	10,17	6,26	6,25	6,26	6,25	10,17	6,26
	10,11	10,19	6,14	6,14	6,15	6,15	10,15	6,15
	10,19	10,18	6,33	6,33	6,35	6,34	10,19	6,34

Fuente: Propia

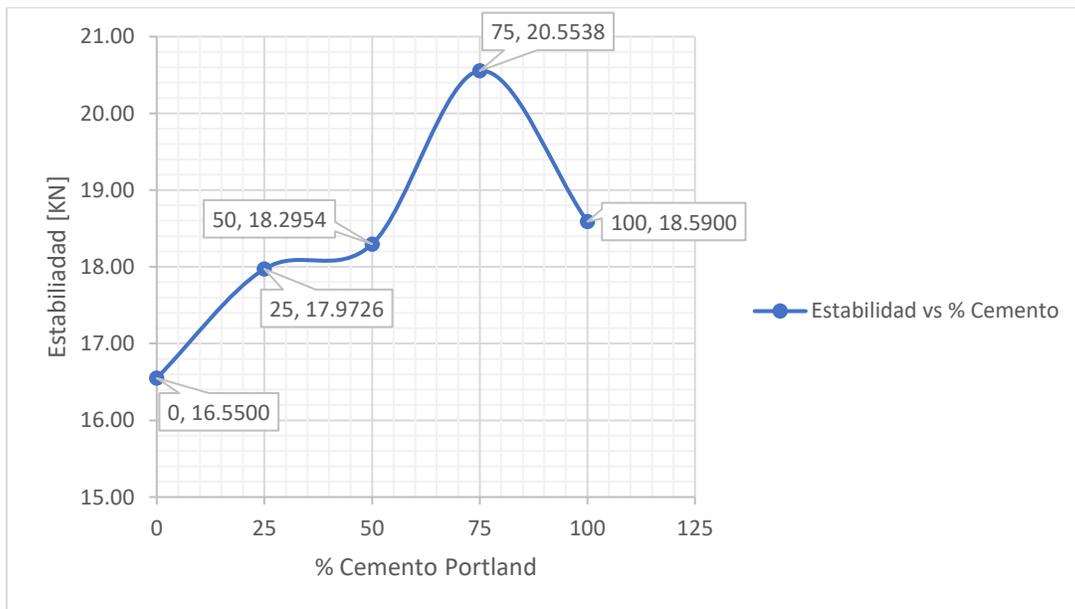
**Tabla 23.** Resultados: Ensayo de estabilidad y flujo (Briquetas mejoradas)

% Cemento	Muestra	Fuerza	Estabilidad	Estabilidad	Flujo
		Max. [KN]	[KN]	Correg. [KN]	Max. [mm]
0%	#1	17,34	17,37	17,3700	5,863
	#2	16,75	16,83	16,8300	4,875
	#3	15,38	15,45	15,4500	3,213
25%	#1	-	-	-	-
	#2	17,41	17,61	17,6100	6,092

	#3	16,87	17,63	18,3352	3,773
	#1	15,33	16,02	16,6608	4,284
50%	#2	19,66	19,93	19,9300	4,158
	#3	-	-	-	-
75%	#1	20,58	21,29	22,1416	3,871
	#2	16,78	17,40	18,9660	5,575
	#3	-	-	-	-
100%	#1	17,61	17,98	18,6992	3,828
	#2	16,97	17,77	18,4808	4,901
	#3	-	-	-	-

Fuente: Propia

**Gráfica 5.** Estabilidad vs. Porcentaje cemento portland (briquetas mejoradas)



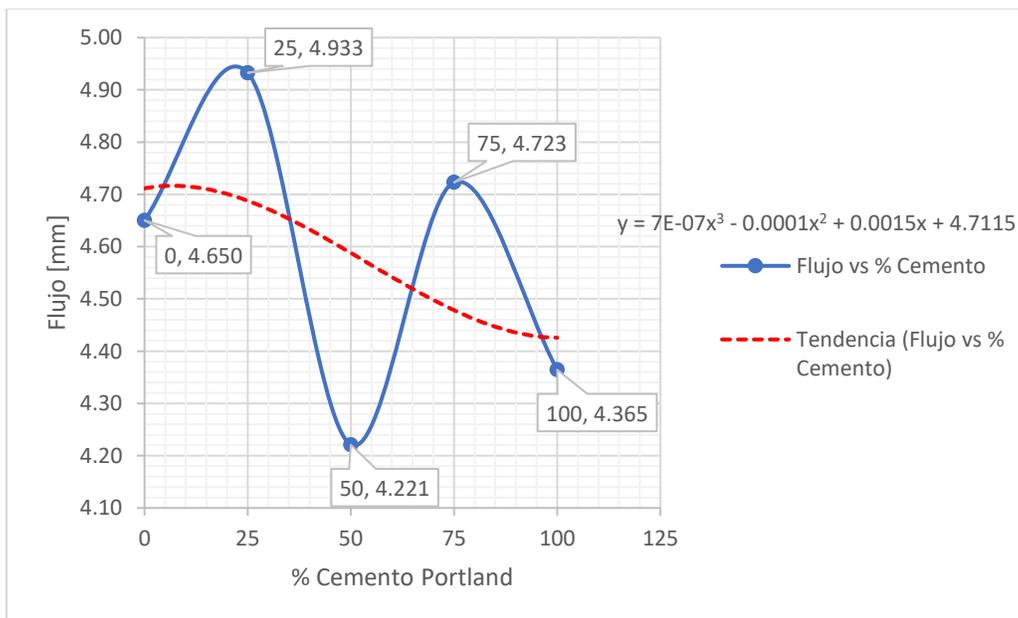
Fuente: Propia

En la **Gráfica 5**, se observa que luego de realizar el ensayo, la estabilidad de la mezcla asfáltica mejorada con cemento llega a su punto máximo con 75% de cemento portland, para luego descender hasta 18,5900 KN. Además, se observa

que todos los valores se encuentran sobre el valor de 0% de cemento portland, lo que quiere decir que la estabilidad mejora al adicionar cemento portland.

En la **Grafica 6**, se aprecia el comportamiento del flujo a medida que incrementa el porcentaje de cemento portland, donde se observa un flujo muy variable, ya que inicia con un comportamiento creciente (0%-25) para posteriormente decrecer significativamente (25%-50%), luego de esto, comienza a crecer nuevamente hasta sobrepasar el valor inicial (50%-75%) y finalmente vuelve a decrecer (75%-100%). Además, los resultados se encuentran entre un rango de 4 y 5 mm.

**Gráfica 6.** Flujo vs. Porcentaje cemento portland (briquetas mejoradas)



Fuente: Propia

### 8.1.3 Análisis de densidad y vacíos

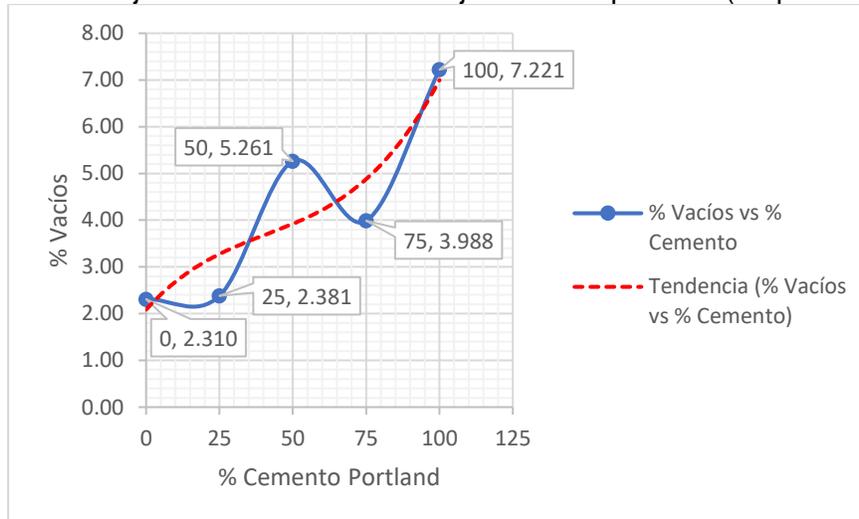
En la **Tabla 24** se aprecian los pesos obtenidos inicialmente del picnómetro más la tapa más el picnómetro con agua lleno completamente, además el peso de la muestra y el peso completo que es la suma de los dos pesos anteriores después del ensayo.

**Tabla 24.** Resultados: Ensayo de análisis de densidad y vacíos (Briquetas mejoradas)

Peso Pic+Tapa+Agua [gr]			
<b>19700</b>			
% Cemento	Peso Muestra [gr]	Peso Completo [gr]	Gmm
0%	1174	20360	2,28405
25%	1164	20360	2,30952
50%	1184	20360	2,25954
75%	1175	20400	2,47368
100%	1188	20350	2,20818

**Fuente:** Propia

**Gráfica 7.** Porcentaje de vacíos vs. Porcentaje cemento portland (briquetas mejoradas)



**Fuente:** Propia

En la **Gráfica 7** se observan los resultados del ensayo de porcentaje de vacíos donde se puede apreciar que la línea de tendencia va ascendiendo de inicio a fin hasta llegar al punto más alto que corresponde al porcentaje de vacíos con un 100 % de cemento portland como filler.

**Tabla 25.** Resumen de resultados del método Marshall de las briquetas mejoradas

%	Muestra	Espesor [cm]	Diámetro [cm]	Pesos [gr]			Volumen	Peso		% De	%	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Estabilidad	
				Seca En Aire	En Agua	S.S.S. En Aire		Específicos		Agua Absorbida Por Vol.	Vacíos con Aire		[KN] Corregida	Flujo [mm]
								g (BULK)	Gmm					
0	1	6,34	10,13	1181,4	677,8	1183,8	510,670	2,335	2,2840	0,474	-	2,328	17,3700	5,863
0	2	6,33	10,14	1178,5	676,5	1181,8	511,175	2,332	2,2840	0,653	-	2,325	16,8300	4,875
0	3	6,33	10,18	1172,4	674,3	1174,6	515,216	2,343	2,2840	0,440	-	2,336	15,4500	3,213
0				<b>1177,43</b>			<b>512,354</b>	<b>2,337</b>	<b>2,2840</b>	<b>0,522</b>	<b>2,310</b>	<b>2,330</b>	<b>16,5500</b>	<b>4,650</b>
25	1	6,32	10,17	1195,9	691,9	1197,6	513,595	2,365	2,3095	0,336	-	2,358	-	-
25	2	6,30	10,18	1187,2	687	1189,9	512,270	2,361	2,3095	0,537	-	2,354	17,6100	6,092
25	3	6,16	10,15	1172,4	680	1175,1	497,533	2,368	2,3095	0,545	-	2,361	18,3352	3,773
25				<b>1185,17</b>			<b>507,799</b>	<b>2,365</b>	<b>2,3095</b>	<b>0,473</b>	<b>2,381</b>	<b>2,357</b>	<b>17,9726</b>	<b>4,933</b>
50	1	6,16	10,24	1186,3	688,6	1187,8	506,606	2,376	2,2595	0,300	-	2,369	16,6608	4,284
50	2	6,29	10,16	1193,4	692,8	1194,4	509,748	2,379	2,2595	0,199	-	2,372	19,9300	4,158
50	3	6,30	10,17	1201,5	697,3	1202,2	510,858	2,380	2,2595	0,139	-	2,373	-	-
50				<b>1193,73</b>			<b>509,071</b>	<b>2,378</b>	<b>2,2595</b>	<b>0,213</b>	<b>5,261</b>	<b>2,371</b>	<b>18,2954</b>	<b>4,221</b>
75	1	6,20	10,16	1181,5	686,3	1182,6	502,362	2,381	2,4737	0,222	-	2,373	22,1416	3,871
75	2	6,19	10,08	1182,8	688,2	1184,1	494,171	2,385	2,4737	0,262	-	2,378	18,9660	5,575

75	3	6,30	10,14	1195	690,1	1196,6	508,049	2,359	2,4737	0,316	-	2,352	-	-
75				<b>1186,43</b>			<b>501,527</b>	<b>2,375</b>	<b>2,4737</b>	<b>0,267</b>	<b>3,988</b>	<b>2,368</b>	<b>20,5538</b>	<b>4,723</b>
100	1	6,255	10,17	1182,1	687	1183,7	507,612	2,380	2,2082	0,322	-	2,373	18,6992	3,828
100	2	6,145	10,15	1191	694,9	1192,4	497,215	2,394	2,2082	0,281	-	2,387	18,4808	4,901
100	3	6,34	10,19	1170,8	672,7	1175,4	516,333	2,329	2,2082	0,915	-	2,322	-	-
100				<b>1181,3</b>			<b>507,053</b>	<b>2,368</b>	<b>2,2082</b>	<b>0,506</b>	<b>7,221</b>	<b>2,361</b>	<b>18,5900</b>	<b>4,365</b>

Fuente: Propia

## 8.2 MÓDULO DINÁMICO

Se ensayaron módulos dinámicos para cinco (5) contenidos de cemento portland (0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %), a seis (6) frecuencias y tres (3) temperaturas diferentes para cada briqueta como se muestra a continuación en la **Tabla 26**.

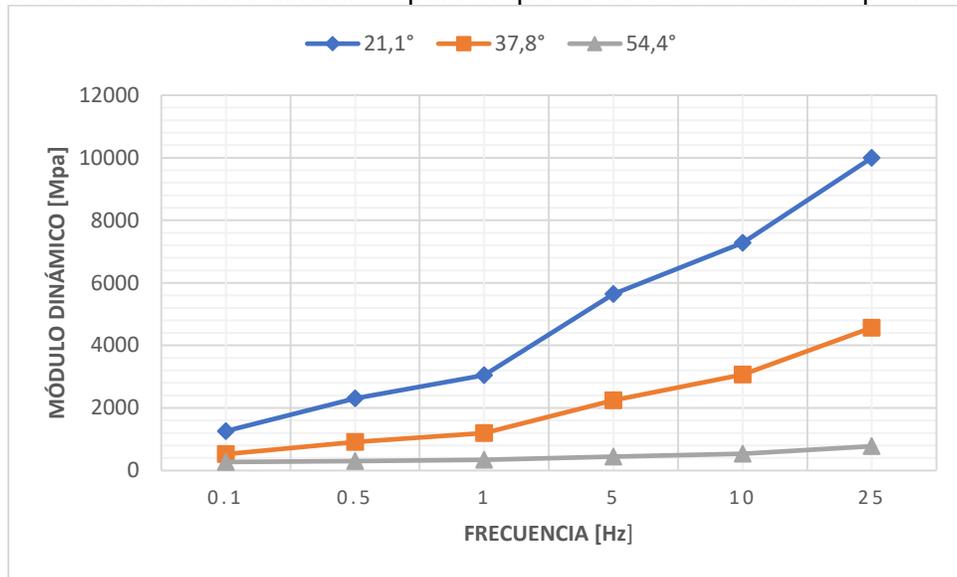
**Tabla 26.** Resultados: Módulos Dinámicos

% de Cemento Portland	Frecuencia [Hz] Temperatura [°C]	Módulo Dinámico [Mpa]					
		0,1	0,5	1	5	10	25
0%	21,1°	1261	2306	3052	5646	7284	10000
	37,8°	524	911	1201	2250	3069	4569
	54,4°	273	306	341	448	536	777
25%	21,1°	1424	2630	3442	6128	7700	10130
	37,8°	434	613	743	1297	1773	2771
	54,4°	376	429	465	632	773	1091
50%	21,1°	1535	2868	3810	6957	8895	12125
	37,8°	464	633	770	1331	1821	2880
	54,4°	394	486	565	869	1144	1834
75%	21,1°	1747	3248	4267	7654	9744	13063
	37,8°	509	687	832	1422	1941	3157
	54,4°	384	457	515	702	868	1390
100%	21,1°	863	1338	1714	3325	4408	6352
	37,8°	512	678	808	1327	1759	2778
	54,4°	405	500	584	888	1167	1869

**Fuente:** Propia

En las siguientes graficas se muestra el comportamiento del módulo dinámico en las diferentes frecuencias con distintas temperaturas.

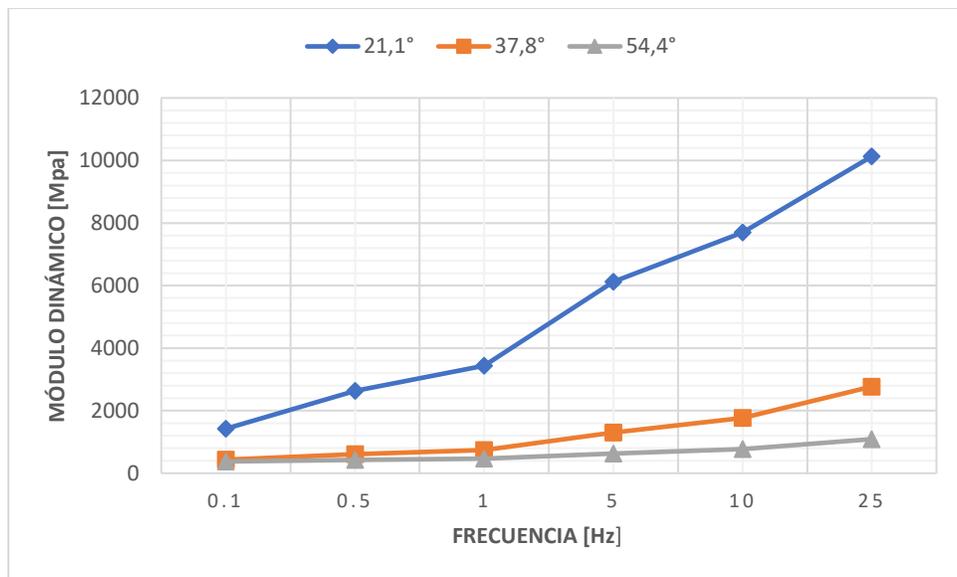
**Gráfica 8.** Módulos dinámicos para briquetas de 0 % de cemento portland



Fuente: Propia

En la **Gráfica 8** se observa que el mayor valor de modulo dinámico lo encontramos a una temperatura de 21.1°, el cual equivale a 10000 Mpa. lo que quiere decir que entre menor es la temperatura, mayor es el resultado de los módulos. Además, a mayor frecuencia el módulo aumenta.

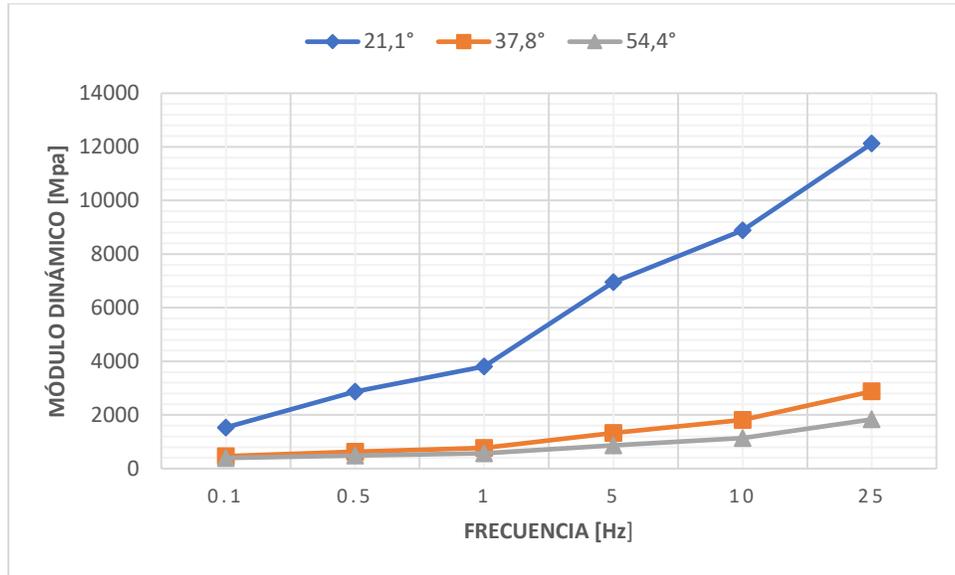
**Gráfica 9.** Módulos dinámicos para briquetas de 25 % de cemento portland



Fuente: Propia

En la **Gráfica 9** se observa igualmente la tendencia del aumento del módulo dinámico a medida que baja la temperatura. Así mismo, al incrementar la frecuencia también aumenta el módulo dinámico.

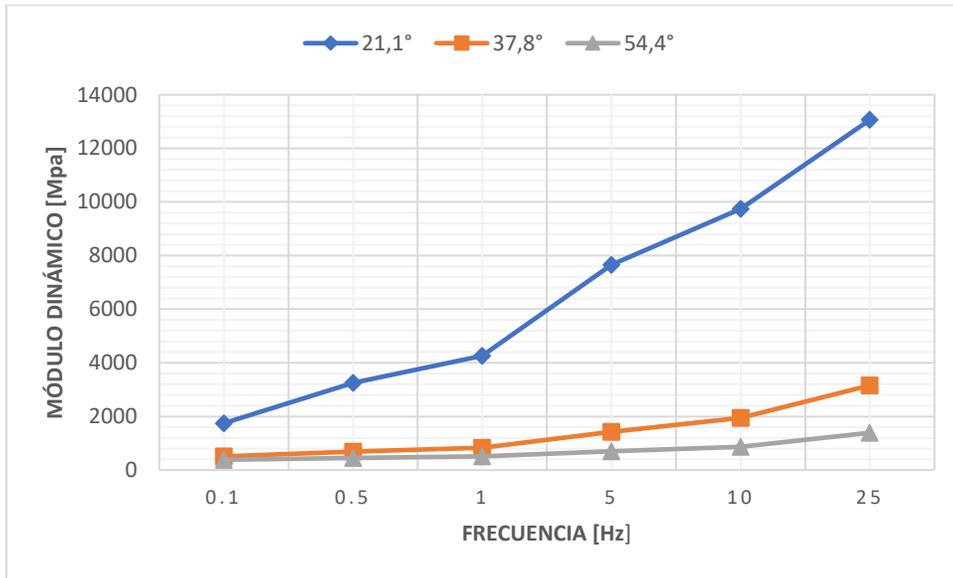
**Gráfica 10.** Módulos dinámicos para briquetas de 50 % de cemento portland



**Fuente:** Propia

En la **Gráfica 10** se observa que el comportamiento de la gráfica es creciente en sus tres (3) temperaturas, donde vemos que el módulo dinámico más alto es de 12125 Mpa dado en una temperatura de 21,1°.

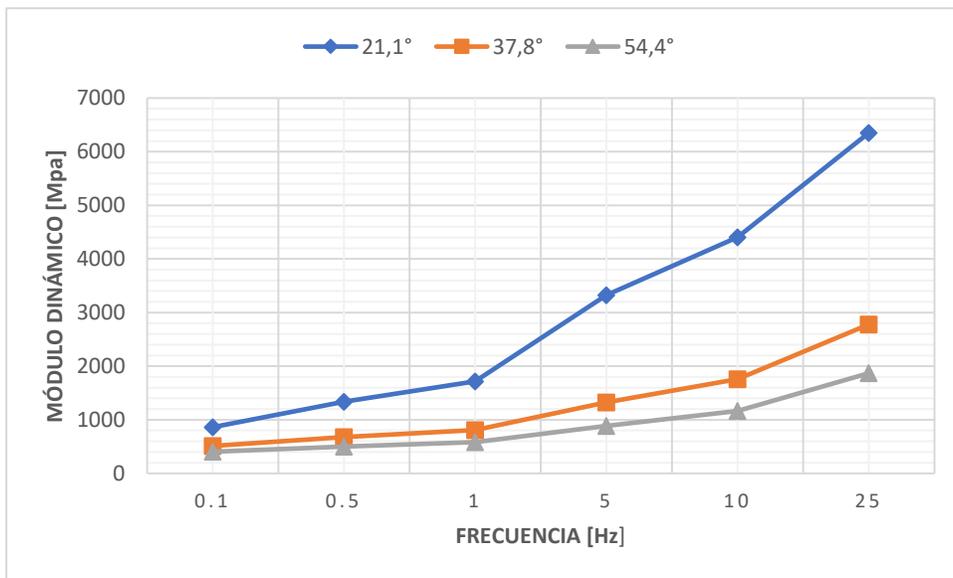
**Gráfica 11.** Módulos dinámicos para briquetas de 75 % de cemento portland



Fuente: Propia

En la **Gráfica 11** se observa igualmente la misma tendencia del aumento del módulo dinámico a medida que baja la temperatura. Así mismo, al incrementar la frecuencia también aumenta el módulo dinámico.

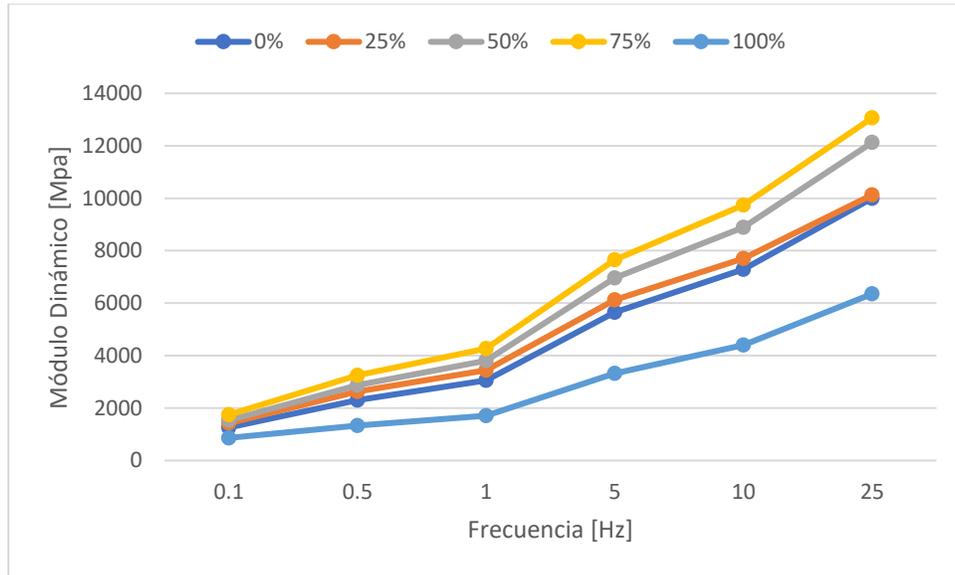
**Gráfica 12.** Módulos dinámicos para briquetas de 100 % de cemento portland



Fuente: Propia

En la **Gráfica 12** se observa que el mayor valor de modulo dinámico lo encontramos a una temperatura de 21.1°, el cual equivale a 6352 Mpa.

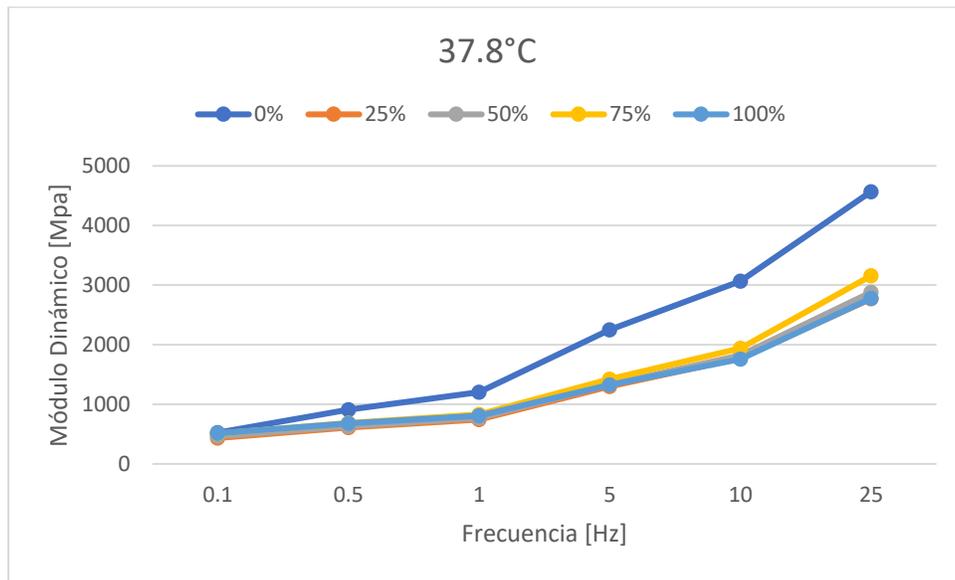
**Gráfica 13.** Módulos dinámicos vs. Frecuencias a 21,1°C



**Fuente:** Propia

En la **Gráfica 13** se aprecia que la briqueta con un porcentaje de 75 % de cemento portland como llenante mineral, presenta mayores módulos a la temperatura de 21,1°C, mientras que los módulos menores los encontramos con un porcentaje de 100 %.

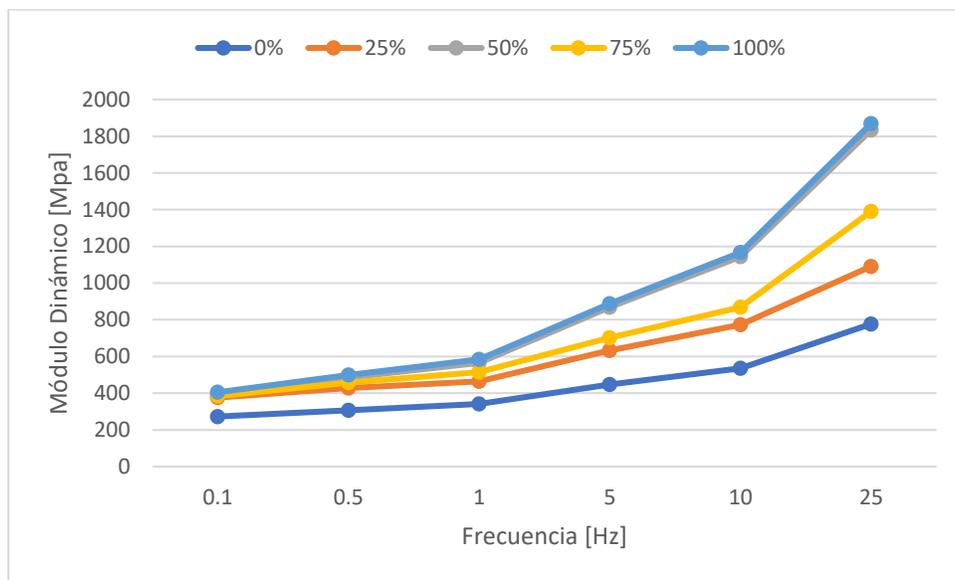
**Gráfica 14.** Módulos dinámicos vs. Frecuencias a 37,8°C



Fuente: Propia

En la **Gráfica 14** se puede observar que, a una temperatura de 37,8°C, los valores más altos los presenta la briqueta con un porcentaje de 0% de cemento portland. También, a menor frecuencia (0,1 Hz) los módulos tienden a ser similares.

**Gráfica 15.** Módulos dinámicos vs. Frecuencias a 54,4°C



Fuente: Propia

En la **Gráfica 15** se observa que, a una temperatura de 54,4°C, los módulos más altos corresponden a la briqueta que presenta un 100 % de cemento portland como llenante mineral, mientras que los más bajos son de la briqueta con un 0 % de cemento portland.

## 9 CONCLUSIONES

- Mediante la caracterización del agregado, se pudo observar que la calidad del material de la fuente Rio Sogamoso se encuentra dentro de los parámetros de cumplimiento con las exigencias de la norma INV 2013 (Art. 450), específicamente se halló que los valores de alargamiento y aplanamiento se encuentran dentro de lo establecido por la norma; además resulto ser un material fracturado que cumple con las especificaciones, el cual hace más fácil la adherencia y la cohesión de los materiales al momento de elaborar la mezcla asfáltica. Luego de caracterizar el cemento portland mediante el ensayo de granulometría, este se definió como un material fino ya que la de la mayoría de su peso, quedo retenido en el tamiz pasa 200.
- Se cumplió con el objetivo de analizar el comportamiento mecánico luego de realizar los ensayos Marshall a la mezcla asfáltica con un porcentaje óptimo de 5% de CA, este porcentaje influye en sus propiedades mecánicas y muestra un buen comportamiento ante las deformaciones producidas por las cargas ejercidas sobre las briquetas realizadas con este porcentaje.
- De acuerdo a los resultados de densidad mostrados en la Gráfica 4: Densidad vs Porcentaje cemento portland (Briquetas mejoradas), se puede observar que la densidad aumenta hasta un valor máximo ( $2,371 \text{ g/cm}^3$ ), después del cual comienza a decrecer. Además, cabe resaltar que la densidad es mayor cuando se utilizan agregados mezclados con cemento portland para mejorar las mezclas asfálticas, teniendo en cuenta que el 0% es una mezcla convencional, lo que indica que el uso del cemento en mezclas asfálticas mejora propiedades como la densidad.
- Basándose en los resultados mostrados en la Gráfica 5: Estabilidad vs Porcentaje cemento portland (Briquetas mejoradas) se pudo concluir que para alcanzar una resistencia óptima en mezclas asfálticas mejoradas con cemento portland, es necesario utilizar un 75% de este con respecto al material filler.

- Analizando los resultados, la mezcla mejorada con cemento portland (al 75% de la llenante mineral) luego de alcanzar su estabilidad máxima comienza a decrecer. Con respecto a una mezcla convencional, la estabilidad aumenta al hacer uso de cemento portland como filler, debido a que los resultados de los porcentajes utilizados muestran valores de estabilidad mayores a comparación con los de la mezcla asfáltica convencional.
- Teniendo en cuenta en principio, que una mezcla asfáltica entre más porcentaje de vacíos presente, mayor será su deformación. Observando la Gráfica 7: Porcentaje de vacíos vs Porcentaje cemento portland (Briquetas mejoradas) se puede decir que, la briqueta mejorada más propensa a sufrir una mayor deformación es la que presenta 100% de cemento portland como filler.
- En los resultados graficados de módulo dinámico, se aprecia un comportamiento similar respecto a los diferentes porcentajes de cemento portland, ya que los mayores módulos dinámicos se presentan a menor temperatura (21.1°) y así mismo, a mayores frecuencias (25Hz).
- En pavimentos flexibles con temperaturas bajas (inferior a 21.1°C) el porcentaje óptimo de cemento portland remplazando la llenante mineral es 75%, con el cual se obtienen módulos dinámico más altos.
- Las mezclas asfálticas deben tener una estabilidad idónea tanto a bajas como a altas temperaturas sin presentar fallas. Teniendo en cuenta que a temperaturas altas (54.4°C) el módulo dinámico es menor debido a que la mezcla presenta un comportamiento muy viscoso, que la hace fluir y desplazarse con mucha facilidad.
- Analizando los resultados presentados en las Gráficas 13, 14 y 15, se puede decir que, para cada una de las temperaturas aplicadas existe un porcentaje de cemento portland óptimo diferente. En el caso de tener una temperatura de 21.1°C sería recomendable utilizar una mezcla asfáltica mejorada con cemento portland con un 75% como llenante mineral. Mientras que para una temperatura de 37.8°C, quien presenta los mayores módulos dinámicos es la briqueta convencional (con 0% de cemento portland como llenante mineral), y para una temperatura de 54.4°C, la briqueta más apta es aquella que contiene un 100% de cemento portland como llenante mineral.

- Es necesario continuar con investigaciones respecto a las mezclas asfálticas densas en caliente y realizar ensayos dinámicos con el fin de evaluar los efectos de agregar cemento con el objetivo de representar la situación real a la que está sometido una estructura de pavimento.

## 10 REFERENCIAS

- [1] H. Arenas, "¿Por qué nuestro retraso en infraestructura?", Cámara Colombiana de Infraestructura, Bogotá, 2003.
- [2] ECOPETROL, «Superficie De Las Redes Viales En Colombia,» Bogotá, 2003.
- [3] O. J. Reyes y J. F. Rincon, "Influencia de las características del relleno mineral en la resistencia de una mezcla asfáltica", *Revista EIA*, nº 11, pp. 93-103, 2009.
- [4] L. M. Neme, Ó. J. Reyes y J. F. Camacho, "Comportamiento de mezclas asfálticas cerradas mediante la aplicación del Ensayo Fénix", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 1, pp. 21, 2013.
- [5] H. A. Rondón y F. A. Reyes, "Pavimentos, materiales, construcción y diseño", Bogotá, 2015.
- [6] A. Montejó, "Ingeniería de pavimentos para carreteras", Bogotá: Universidad Católica De Colombia, 1998.
- [7] F. Sanchez, "Curso básico de diseño de pavimentos", Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito, [En línea]. Disponible en: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/CONTENIDO%20CURSO.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/CONTENIDO%20CURSO.pdf).
- [8] L. M. Monsalve, L. C. Giraldo y J. Maya, "Diseño de pavimento flexible y rígido", Armenia, 2012.
- [9] A. Villarino, "Ciencia y tecnología de los materiales", Escuela Politecnica Superior de Ávila, [En línea]. Disponible en: <http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%207-%20MATERIALES%20BITUMINOSOS.pdf> .
- [10] Universidad de La Coruña, "Materiales bituminosos", [En línea]. Disponible en: [ftp://ceres.udc.es/ITS\\_Caminos/1\\_Ciclo/Materiales\\_Construccion/Apuntes\\_1P/4P\\_05\\_07\\_08\\_Bituminosos.pdf](ftp://ceres.udc.es/ITS_Caminos/1_Ciclo/Materiales_Construccion/Apuntes_1P/4P_05_07_08_Bituminosos.pdf).
- [11] R. Jiménez, "Alquitranes y Betunes", *ARQHYS*, 2012.

- [12] ASOPAC, Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia, Cartilla del pavimento asfáltico, Bogotá, 2004.
- [13] Ingeniería De Cementación Petrolera, "Módulo 1: Cementos petroleros: características y análisis - Unidad 1: Los cementos petroleros y sus propiedades", [En línea]. Disponible en: <http://www.actiweb.es/marcus/archivo2.pdf>.
- [14] Canal Construcción, "Cemento Portland usos y tipos", [En línea]. Disponible en: <http://canalconstruccion.com/cemento-portland-usos-y-tipos.html>.
- [15] H. López y L. Montejo, "Determinación de las propiedades mecánicas del concreto endurecido usadas en el diseño estructural para los concretos elaborados en la ciudad de cali con material de la región", Cali, 2001.
- [16] A. Padilla Rodríguez, "Capítulo 3. Mezclas asfálticas", Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- [17] A. Padilla, "Capítulo 2. Materiales básicos", Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- [18] Instituto Nacional de Vías INVIAS, "Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos - INV E -213-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.
- [19] Instituto Nacional de Vías INVIAS, "Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras - INV E -230-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.
- [20] Instituto Nacional de Vías INVIAS, "Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso - INV E -227-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.
- [21] Instituto Nacional De Vías INVIAS, "Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de Los Ángeles - INV E -218-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.

- [22] Instituto Nacional De Vías INVIAS, "Penetración de los materiales bituminosos - INV E -706-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.
- [23] Instituto Nacional De Vías INVIAS, "Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa Abiertacleland - INV E -709-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.
- [24] Instituto Nacional De Vías INVIAS, "Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) - INV E -712-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.
- [25] Instituto Nacional De Vías INVIAS, "Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional - INV E -717-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.
- [26] Instituto Nacional De Vías INVIAS, "Ductilidad de los materiales asfálticos - INV E -702-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.
- [27] Instituto Nacional De Vías INVIAS, "Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el Equipo Marshall - INV E -748-13", de *Manual De Normas De Ensayo De Materiales Para Carreteras*.
- [28] C. Higer, N. Gloria y C. Jhon, "Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica", *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 20, nº 30, pp. 41-54, 2011.