

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS CON AGREGADO PROCEDENTE DE CHICAMOCHA
MODIFICADA CON CEMENTO PORTLAND**

**KAREN LORENA ALMEIDA OSORIO
DIEGO ALFONSO BOCANEGRA ESTUPIÑAN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERIAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
2018**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS CON AGREGADO PROCEDENTE DE CHICAMOCHA
MODIFICADA CON CEMENTO PORTLAND**

**KAREN LORENA ALMEIDA OSORIO
DIEGO ALFONSO BOCANEGRA ESTUPIÑAN**

**DIRECTOR
ING. JULIAN ANDRE GALVIS FLOREZ
VISTO BUENO DIRECTOR: _____**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERIAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
2018**

NOTA DE ACEPTACION

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A Dios, que me dio la vida y la bendición de poder estudiar la carrera que elegí para mi vida.

Por darme la salud, sabiduría y paciencia para emprender y culminar este logro tan importante en mi vida.

A mis padres Elber Alfonso Bocanegra Lemus y Rosa Esperanza Estupiñan por todos los valores e ideales que transmitieron a lo largo de mi vida para poder ser la persona que soy hoy. Por todo el amor y el esfuerzo tan grande que hicieron para poder cumplir este anhelado sueño.

A mi hijo Emiliano Bocanegra Rueda que es mi mayor bendición, regalo y motivación.

DEDICO

Diego Alfonso Bocanegra Estupiñan

Principalmente a Dios por ser quien ilumina cada día de mi vida, y por ser mi escudo y
fortaleza.

A mis padres quienes con mucho esfuerzo y amor me apoyaron en este proceso, han velado
por mi bienestar y educación, siempre confiaron en mí, y en mis capacidades, por ellos soy lo
que soy ahora.

A mi abuela por ser parte de mi realización personal y apoyarme en todo momento.
A nuestro director el Ingeniero Julián Galvis por ser nuestro guía y por retornos para obtener
mejores resultados, por su paciencia y constante apoyo.

A la universidad Pontificia Bolivariana por permitirnos formar parte de ella y brindarnos las
herramientas necesarias para ser profesionales.

DEDICO

Karen Lorena Almeida Osorio

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	17
1.1. INTRODUCCIÓN	17
1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.3. OBJETIVOS	19
1.3.1. Objetivo general.....	19
1.3.2. Objetivos específicos	19
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. ALCANCE	20
4. ANTECEDENTES	21
4.1. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla de asfalto discontinua con adición de cemento portland.	21
4.2. Fabricación de asfalto con caucho reciclado a menor temperatura.	22
4.3. Análisis comparativo de una mezcla asfáltica convencional y modificada con un 4% de PVC.....	23
4.4. Comportamiento de mezclas asfálticas cerradas mediante la aplicación del ensayo fénix.	24
5. MARCO TEORICO.....	25
5.1. Pavimentos.	25
5.1.1. Pavimento flexible.	26
5.1.1.1. Capa de rodadura.	27
5.1.2. Pavimento rígido.....	27
5.1.3. Pavimento articulado.....	28
5.2. Mezclas asfálticas.	28
5.2.1. Tipos de mezcla.	29
5.2.1.1. Mezcla asfáltica en caliente.....	29
5.2.1.2. De granulometría densa	30
5.2.1.3. De granulometría abierta:.....	31
5.2.1.4. De granulometría discontinua.....	32
5.2.2. Componentes de la mezcla.	33
5.2.2.1. Agregado pétreo.....	33
5.2.2.2. Cemento asfáltico.	34
5.3. Diseño de mezclas asfálticas en caliente.....	35

5.3.1.	Thehubbar – Field (1920´s).....	35
5.3.2.	Método Marshall (1930´s).....	36
5.3.3.	Método Hyeem (1930´s).	36
5.3.4.	Método de la Western Association Of State Highway on Transportation Officials WASTHO (1984).	36
5.3.5.	Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. (AAMAS)(1987)..	36
5.3.6.	Método SUPERPAVE (1993).	37
5.4.	Método de diseño Marshall.	37
5.5.	Modulo dinámico.	37
5.6.	Cemento Portland.....	38
5.6.1.	Clasificación del cemento Portland.	38
6.	METODOLOGIA.....	40
6.1.	Recolección de la muestra.	40
6.2.	Ensayos de caracterización del agregado.	40
6.2.1.	Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino. INV E 213-13.....	40
6.2.2.	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.....	42
6.2.3.	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E 227-13.....	44
6.2.4.	Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras INV E 230-13.	45
6.2.4.1.	Índice de aplanamiento	46
6.2.4.2.	Índice de alargamiento	47
6.3.	Ensayos de caracterización del cemento portland	48
6.3.1.	Densidad del cemento hidráulico INV E 307-13.....	48
6.4.	Ensayos de caracterización del material bituminoso	50
6.4.1.	Penetración de los materiales bituminosos INV E 706-13.....	50
6.4.2.	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) INV E 712-13.	51
6.4.3.	Ductilidad INV E 702-13.....	53
6.4.4.	Punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland INV E 709-13.....	54
6.4.5.	Peso específico.....	55
6.5.	Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfaltico mediante el ensayo Marshall.	55
6.5.1.	Estabilidad de flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall INV E 748-13.....	57

6.5.1.1.	Elaboración de las probetas.....	57
6.5.1.2.	Ensayo de estabilidad y flujo.....	60
6.5.2.	Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos INV E 733-13.	62
6.5.3.	Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas INV E 736-13.....	65
6.5.4.	Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos INV E 735-13.	66
6.6.	Fabricación de las briquetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y modificadas con cemento portland.....	67
6.7.	Módulos dinámicos.....	69
6.7.1.	Compactador giratorio.....	69
6.7.2.	Equipo DTS-30.....	71
7.	RESULTADOS.....	73
7.1.	Briquetas convencionales (determinación del porcentaje óptimo de asfalto).....	74
7.1.1.	Caracterización del agregado.....	74
7.1.1.1.	Granulometría del agregado grueso y fino.....	74
7.1.1.2.	Resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los ángeles.....	77
7.1.1.3.	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.....	78
7.1.1.4.	Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados.....	78
7.1.2.	Caracterización del cemento portland.....	79
7.1.2.1.	Densidad del cemento hidráulico.....	79
7.1.3.	Caracterización del material bituminoso.....	79
7.1.4.	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas empleando el equipo Marshall.....	81
7.1.5.	Gravedad específica Bulk.....	82
7.1.6.	Gravedad específica máxima (Gmm).....	83
7.1.7.	Porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas.....	83
7.2.	Briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con cemento portland.....	87
7.2.1.	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas empleando el equipo Marshall.....	88
7.2.2.	Gravedad específica Bulk.....	89
7.2.3.	Gravedad específica máxima (Gmm).....	89
7.2.4.	Porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas.....	90
7.3.	Módulos dinámicos.....	90

7.3.1.	Resultados compactador giratorio.	90
7.3.2.	Resultados equipo DTS-30.....	91
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
8.1.	Briquetas convencionales (determinación del porcentaje óptimo de asfalto).	91
8.1.1.	Ensayo de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas empleando el equipo Marshall.....	92
8.2.	Briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con cemento Portland.....	97
8.2.1.	Ensayo de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas empleando el equipo Marshall.....	97
8.3.	Módulos dinámicos.....	107
8.3.1.	Compactador giratorio.	107
8.3.2.	Equipo DTS-30.....	109
8.4.	Verificación resultados de caracterización del material bituminoso y agregado. ...	116
9.	CONCLUSIONES.....	118
10.	RECOMENDACIONES.....	122
11.	BIBLIOGRAFIA.....	124

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cuadro comparativo de estabilidades de muestras a distintos porcentajes de cemento y asfalto.	22
Tabla 2. Cuadro comparativo de flujos de muestras a distintos porcentajes de cemento y asfalto.	22
Tabla 3. Estabilidad y flujo por cada porcentaje de asfalto.....	24
Tabla 4. Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix con distinto reemplazo de filler mineral por cemento. Asfalto 60/70.....	25
Tabla 5. Serie de tamices y porcentaje que pasa y se retiene en cada tamiz.	41
Tabla 6. Tipo de granulometrías de las muestras de ensayo.....	43
Tabla 7. Formato de granulometrías para el desgaste del agregado por medio de la máquina de los ángeles.....	43
Tabla 8. Masa mínima de muestra para cada tamaño de tamiz.	45
Tabla 9. Masa mínima de la muestra para el ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento.	46
Tabla 10. Tabla 450-6 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente.....	56

Tabla 11. Granulometría 4% de asfalto.....	74
Tabla 12. Granulometría 4,5% de asfalto.....	75
Tabla 13. Granulometría 5% de asfalto.....	75
Tabla 14. Granulometría 5,5 % de asfalto.....	76
Tabla 15. Granulometría 6% de asfalto.....	76
Tabla 16. Porcentaje de desgaste por medio de la máquina de los ángeles.....	78
Tabla 17. Porcentaje de caras fracturadas.....	78
Tabla 18. Índice de aplanamiento y alargamiento.....	79
Tabla 19. Densidad del cemento Portland.....	79
Tabla 20. Resultados caracterización del material bituminoso.....	80
Tabla 21. Tabla general de resultados.....	81
Tabla 22. Resultados de estabilidad y flujo promedio de cada porcentaje de asfalto.....	82
Tabla 23. Gravedad específica BULK.....	82
Tabla 24. Gravedad específica máxima (Gmm).....	83
Tabla 25. Porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas.....	83
Tabla 26. Tabla 450-10. Criterios para la mezcla preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.....	85
Tabla 27. Tabla general de resultados.....	88
Tabla 28. Resultados de estabilidad y flujo promedio de cada porcentaje de asfalto.....	89
Tabla 29. Gravedad específica Bulk.....	89
Tabla 30. Gravedad específica máxima (Gmm).....	89
Tabla 31. Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica.....	90
Tabla 32. Resultados densidad del compactador giratorio.....	90
Tabla 33. Resumen general resultados de ensayo de módulos dinámicos.....	91
Tabla 34. Estabilidad vs porcentaje de asfalto.....	92
Tabla 35. Flujo vs porcentaje de asfalto.....	93
Tabla 36. Densidad vs porcentaje de asfalto.....	94
Tabla 37. Porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de asfalto.....	95
Tabla 38. Estabilidad vs porcentaje de cemento Portland.....	97
Tabla 39. Flujo vs porcentaje de cemento portland.....	99
Tabla 40. Densidad vs porcentaje de cemento Portland.....	102
Tabla 41. Porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de cemento Portland.....	105
Tabla 42. Resumen de resultados de caracterización del material bituminoso.....	116
Tabla 43. Resumen de resultados de caracterización del agregado.....	117

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Tamizado del agregado por medio de la tamizadora mecánica.....	41
Imagen 2. Clasificación del agregado según el material retenido en cada tamiz.	42
Imagen 3. Máquina de los ángeles.	44
Imagen 4. Calibrador para el ensayo de índice de aplanamiento.....	47
Imagen 5. Calibrador para el ensayo de índice de alargamiento.	48
Imagen 6. Equipo para el ensayo de densidad del cemento hidráulico (cemento portland)...	49
Imagen 7. Proceso de rotación del frasco.....	49
Imagen 8. Equipo para el ensayo de penetración.....	50
Imagen 9. Penetración del material bituminoso.....	51
Imagen 10. Equipo para el ensayo de punto de ablandamiento.....	52
Imagen 11. Punto de ablandamiento del material bituminoso.....	52
Imagen 12. Máquina para el ensayo de recuperación elástica del material bituminoso.	53
Imagen 13. Punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico.....	54
Imagen 14. Ejecución del ensayo de peso específico del material bituminoso.	55
Imagen 15. Proceso de calentamiento del agregado proveniente de la arenera Chicamocha. 58	
Imagen 16. Proceso de calentamiento del cemento asfáltico.	59
Imagen 17. Proceso de mezclado entre el agregado y el asfalto.....	59
Imagen 18. Máquina de compactación mecánica.	60
Imagen 19. Baño de agua María.	61
Imagen 20. Prensa ensayo Marshall.....	61
Imagen 21. Determinación del peso de la briqueta sumergido en agua.	63
Imagen 22. Determinación del peso de la muestra seca en el aire.....	64
Imagen 23. Determinación del peso de la muestra superficialmente seca.	64
Imagen 24. Proceso de extracción de burbujas de aire de la muestra.	66
Imagen 25. Briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con cemento portland.....	68
Imagen 26. Compactador giratorio	70
Imagen 27. Extracción de las briquetas del compactador giratorio.	71
Imagen 28. Equipo DTS-30.....	72
Imagen 29. Ensayo de módulos dinámicos en ejecución mediante el equipo DTS-30.....	73

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Curva granulométrica de los agregados.....	77
Grafica 2. Densidad máxima vs porcentaje de asfalto.....	84
Grafica 3. Estabilidad máxima vs porcentaje de asfalto.....	85
Grafica 4. Porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de asfalto.....	87
Grafica 5. Comportamiento de la estabilidad vs porcentaje de asfalto.....	93
Grafica 6. Comportamiento del flujo vs porcentaje de asfalto.....	94
Grafica 7. Comportamiento densidad vs porcentaje de asfalto.....	95
Grafica 8. Comportamiento del porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de asfalto.....	96
Grafica 9. Comportamiento de la estabilidad vs porcentaje de cemento Portland.....	98
Grafica 10. Comportamiento de la relación de estabilidad de las briquetas convencionales-modificadas con cemento Portland y con él % óptimo de asfalto.....	99
Grafica 11. Comportamiento del flujo vs porcentaje de cemento Portland.....	101
Grafica 12. Comportamiento de la relación del flujo de briquetas convencionales-modificadas con cemento Portland y con él % óptimo de asfalto.....	102
Grafica 13. Comportamiento densidad vs porcentaje de cemento Portland.....	103
Grafica 14. Comportamiento de la relación de la densidad de las briquetas convencionales-modificadas con cemento Portland y con él % óptimo de asfalto.....	104
Grafica 15. Comportamiento porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de cemento portland.....	106
Grafica 16. Comportamiento de la relación de la densidad de las briquetas convencionales-modificadas con cemento Portland y con él % óptimo de asfalto.....	107
Grafica 17. Comportamiento de la densidad vs porcentaje de cemento Portland en el compactador giratorio.....	108
Grafica 18. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 0% de cemento Portland.....	109
Grafica 19. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 25% de cemento Portland.....	110
Grafica 20. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 50% de cemento Portland.....	111
Grafica 21. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 75% de cemento Portland.....	111
Grafica 22. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 100% de cemento Portland.....	112
Grafica 23. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 0% de cemento Portland.....	113

Grafica 24. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 25% de cemento Portland.	114
Grafica 25. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 50% de cemento Portland.	114
Grafica 26. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 75% de cemento Portland.	115
Grafica 27. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 100% de cemento Portland.	115

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Perfil típico de una estructura de pavimento flexible.....	26
Figura 2. Mezcla asfáltica.	30
Figura 3. Granulometría de una muestra densa.	31
Figura 4. Granulometría de una mezcla abierta.....	32
Figura 5. Granulometría de una mezcla discontinua.	33

LISTA DE FORMULAS

	Pág.
Fórmula 1. Ecuación para hallar la gravedad específica Bulk.	62
Fórmula 2. Ecuación para hallar el porcentaje de vacíos con aire de las mezclas asfálticas.	65

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON AGREGADO PROCEDENTE DE CHICAMOCHA MODIFICADA CON CEMENTO PORTLAND

AUTOR(ES): KAREN LORENA ALMEIDA OSORIO
DIEGO ALFONSO BOCANEGRA ESTUPIÑAN

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Julián André Galvis Flórez

RESUMEN

Mediante este proyecto de grado se va a analizar el comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica fabricada con agregado proveniente de la arenera Chicamocha localizada en la finca "el tamarindo" corregimiento Pescadero, vía Bucaramanga - san gil y modificada con cemento Portland. Para el desarrollo de este ensayo fue de mucha importancia caracterizar el agregado, el cemento asfáltico y el cemento hidráulico. Se realizaron tres briquetas por cada porcentaje de asfalto, los porcentajes de asfalto son del (4%, 4,5, 5, 5,5% y 6%). Una vez se encontró el porcentaje óptimo de asfalto que fue del 5,5%, se procedió a fabricar las briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con cemento Portland. Los porcentajes de cemento Portland que se utilizaron para modificar las briquetas fueron del (0%, 25%, 50%, 75% y 100%). Una vez se realizaron las briquetas modificadas con cemento Portland se procedió a realizar los ensayos de estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas, gravedad específica Bulk, gravedad específica máxima (Gmm) y porcentaje de vacíos con aire. Luego, se realizaron cinco briquetas con (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) de cemento Portland en el compactador giratorio, para luego ser falladas en el equipo DTS-30 en donde se obtienen los resultados de los módulos dinámicos.

PALABRAS CLAVE:

Asfalto, cemento, agregado, estabilidad, flujo, briqueta.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ANALYSIS OF MECHANICAL AND DYNAMIC BEHAVIOR OF ASPHALTIC MIXTURES WITH AGGREGATE FROM MODIFIED CHICAMOCHA WITH PORTLAND CEMENT

AUTHOR(S): KAREN LORENA ALMEIDA OSORIO
DIEGO ALFONSO BOCANEGRA ESTUPIÑAN

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Julián André Galvis Flórez

ABSTRACT

Through this project degree will analyze the mechanical and dynamic behavior of an asphalt mix made with aggregate from the Chicamocha sand located on the farm "the Tamarindo" Pescadero corregimiento, via Bucaramanga - San Gil and modified with Portland cement. For the development of this trial it was very important to characterize the aggregate, the asphalt cement and the hydraulic cement. Three briquettes were made for each percentage of asphalt, the percentages of asphalt are (4%, 4.5, 5, 5.5% and 6%) Once the optimum percentage of asphalt was found, which was 5.5 %, the briquettes were produced with the optimum percentage of asphalt and modified with Portland cement. The percentages of Portland cement that were used to modify the briquettes were (0%, 25%, 50%, 75% and 100%). Once the briquettes modified with Portland cement were carried out, the stability and flow tests of the asphalt mixtures, Bulk specific gravity, maximum specific gravity (Gmm) and percentage of voids with air were carried out. Then, five briquettes were made with (0%, 25%, 50%, 75% and 100%) Portland cement in the rotary compactor, to be later failed in the DTS-30 equipment where the results you are obtained of the modules dynamic

KEYWORDS:

Asphalt, cement, aggregate, stability, flow, briquette.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1. INTRODUCCIÓN

En la elaboración de mallas viales, los pavimentos flexibles son la infraestructura más aplicada, pero debido al crecimiento en la frecuencia de cargas vehiculares, que acogen las vías generadas por los ejes de vehículos que se transforman en esfuerzo aplicado sobre la superficie de rodadura, estos asfaltos convencionales adquieren una cualidad y tienden a ser deficientes, en este proyecto de grado se desea estudiar la forma como actúa una mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19 modificada con cemento portland, usando agregados provenientes de la arenera Chicamocha localizada en la finca “el tamarindo” corregimiento Pescadero, vía Bucaramanga - san gil.

Los materiales esenciales para el desarrollo de este proyecto de grado son el cemento asfáltico 60-70 donado por MULTINSA S.A, cemento Portland y el agregado extraído de la arenera chicamocha, con estos elementos se busca obtener resultados positivos en las mezclas asfálticas para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, obteniendo así una mezcla más estable e incrementando su capacidad.

1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia y en los demás países del mundo, la red vial es un elemento esencial para el desarrollo económico y su crecimiento, ya que por estas circulan personas, que a su vez movilizan materia prima, mercancías, etc. Por mucho tiempo la industria de la construcción vial en el mundo ha tenido la necesidad de hacer investigaciones y estudios para conocer las propiedades, características y comportamiento de los materiales que se extraen de la naturaleza, debido a esto se han hecho grandes inversiones de dinero que tienen como objetivo brindar mejores condiciones en la calidad de vida humana.

Habid (citado por López,2017) explica que debido a los grandes proyectos de infraestructura que pertenecen a las vías de cuarta generación y que vienen desarrollándose desde

el 2015, y que hasta el 2020, crecerán de manera importante los sectores del cemento, agregados y asfalto, los cuales demandarán millones de toneladas para bases, sub bases y concretos hidráulicos.

Forero (citado por López, 2017) afirma que “El sector de los materiales para la construcción es el más activo en cuanto a demanda, y la estrategia es que precisamente se abastezca con eficiencia este requerimiento con la oferta desde los lugares cercanos de la producción” (p.1).

López (2017) expone:

Un informe sobre la evaluación de la situación actual y futura del mercado para los materiales de construcción desarrollado por la Unidad de Planeación Minero Energética (Upme), indica que para el 2023 la demanda de materiales como gravas, arcilla, arena, entre otros, aumentará un 48% en las principales ciudades del país. (p.1)

“En la Asociación Colombiana de Minería (ACM) le dan una lectura optimista a la producción de agregados. El gremio indica que la explotación de materiales para construcción compuesta por arcillas, arenas y rocas entre otras, “aumenta de manera importante (26%)” (López, 2017, p.1).

Ante la alta demanda de materiales que se van a necesitar a futuro, es necesario investigar y estudiar las propiedades y características de los materiales que se necesitan para la construcción de pavimentos ya que es esencial saber si aquellos materiales que extraemos de las diferentes canteras son aptos o no para el diseño de pavimentos.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario plantear una mezcla asfáltica modificada con cemento portland, utilizando agregado de la arenera Chicamocha localizada en la finca “el tamarindo” corregimiento Pescadero, vía Bucaramanga - san gil, que ofrezca un mejoramiento de las condiciones del pavimento y que cumpla con todo lo estipulado en la norma INVIAS año 2013, generando beneficios en lo económico y social que son muy importantes para la ingeniería.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Utilizando agregados provenientes del río Chicamocha, comparar la resistencia mecánica y dinámica de mezclas asfálticas densas en caliente, tipo MDC- 19 con adición de cemento Portland en relación con la mezcla asfáltica convencional.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las propiedades de los materiales de agregado, cemento asfáltico y cemento portland, que serán empleados en la elaboración de las probetas.
- Determinar mediante el ensayo Marshall el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, estabilidad y resistencia a la deformación plástica de una mezcla densa en caliente tipo MDC-19.
- Realizar probetas de mezclas asfálticas empleando agregado de la arenera Chicamocha, para ser comparadas mecánica y dinámicamente con probetas de mezclas asfálticas empleando agregado de la misma fuente de material pero modificadas con cemento portland.
- Determinar el incremento de la resistencia mecánica (Marshall) y dinámica (Modulos dinámicos) de las probetas asfálticas antes y después de la modificación con cemento convencional con agregado Chicamocha.

2. JUSTIFICACION

Actualmente, en la industria de la construcción vial es esencial lograr que la estructura del pavimento sea capaz de tener un buen desempeño ante el permanente aumento en volumen y magnitud del tránsito en las vías, ya que esto nos permite tener beneficios en lo social, económico y técnico.

Debido a esto, el mejoramiento de las mezclas asfálticas con cemento portland se considera una opción, ya que el cemento Portland es un conglomerante que al ser mezclado con áridos, genera resistencia de la matriz en la cual el cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes, las cuales son: módulos elásticos elevados, durabilidad, Estabilidad inmediata, evolución temprana de resistencias y resistencia a la abrasión. [1]

El nivel de mejoramiento de la mezcla asfáltica modificada con cemento portland podría resultar beneficioso, ya que la estructura del pavimento podría adquirir una buena capacidad de soporte.

En cuanto a la modificación de pavimentos con cemento portland, con este proceso se busca la variación en el comportamiento mecánico y dinámico del pavimento inmediatamente después de su aplicación, para conseguir que la estructura del pavimento logre una resistencia ideal.

La importancia de realizar este proyecto de grado, radica en determinar el comportamiento de las muestras antes y después; es decir, comparar que al momento de su modificación nos arrojen unos resultados diferentes en su resistencia respecto a una mezcla asfáltica convencional.

3. ALCANCE

Mediante este proyecto de grado se busca verificar si la mezcla asfáltica convencional modificada con cemento portland, la cual va a ser fabricada con agregado proveniente de la cantera de la arenera Chicamocha tiende a mostrar un mejoramiento considerable en sus propiedades mecánicas y dinámicas.

Se comprobara que las propiedades y las características del agregado, cemento portland y cemento asfáltico cumplen con las normas estipuladas en la actualidad, y además comprobar si son aptos o no para la construcción de pavimentos.

Inicialmente, se harán una serie de ensayos para determinar el porcentaje óptimo de asfalto de las briquetas fabricadas con agregado de la arenera Chicamocha. Posteriormente, ya con el

porcentaje óptimo de asfalto hallado, se modificarán las briquetas con cemento portland, para luego proceder a realizar el ensayo de módulos dinámicos. Finalmente se realizará un análisis en donde se verán reflejados los beneficios y limitaciones del proyecto.

4. ANTECEDENTES

4.1. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla de asfalto discontinua con adición de cemento portland.

Consistió en comparar algunas propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica discontinua con adición de cemento portland a diferentes porcentajes con una sin cemento, en un comienzo se realizó la recolección de información acerca del tema, después la obtención de los materiales de la planta asfáltica TORCOROMA y como siguiente, la caracterización de estos materiales que dio una idea muy general de la geología de los materiales y de algunas de sus características después la elaboración de las briquetas y sus respectivos ensayos los cuales dieron óptimos resultados de estabilidad, flujo y porcentajes tanto de cemento como de asfalto siendo el porcentaje óptimo de asfalto para nuestra mezcla de 5,5% y de cemento para este mismo del 4%. [2]

En la tabla No. 1 se puede evidenciar el resumen general de los resultados de las estabilidades corregidas a distintos porcentajes de asfalto y cemento.

Tabla 1. Cuadro comparativo de estabildades de muestras a distintos porcentajes de cemento y asfalto.

RESUMEN DE ESTABILIDADES CORREGIDA (lb)			
PORCENTAJE DE CEMENTO	% DE ASFALTO		
	5	5,5	6
2	2081	2313	2018
3	2130	23361	2000
4	2185	2460	1974
5	2101	2386	1941
6	2043	2294	1858

Fuente: Elaboración propia

En la tabla No. 2 se puede evidenciar el resumen general de los resultados de los flujos corregidos a distintos porcentajes de asfalto y cemento.

Tabla 2. Cuadro comparativo de flujos de muestras a distintos porcentajes de cemento y asfalto.

RESUMEN DE ESTABILIDADES CORREGIDA (lb)			
PORCENTAJE DE CEMENTO	% DE ASFALTO		
	5	5,5	6
2	21	23	24
3	20,3	21,7	24,2
4	19,5	21,7	24,3
5	19,7	21,9	24,5
6	20	22	24,7

Fuente: Elaboración propia

4.2. Fabricación de asfalto con caucho reciclado a menor temperatura.

Aunque la utilización de polvo de caucho en la fabricación de asfalto y pavimentos para carreteras no es una novedad, puesto que las ventajas de estos están ampliamente probadas, dichas mezclas presentan un inconveniente importante: su temperatura de

fabricación es mayor que la de una mezcla convencional, ya que la incorporación del caucho aumenta la viscosidad del ligante y, por tanto, es necesario elevar dicha temperatura. Esto, a su vez, supone un aumento del uso de energía (consumo de combustibles) y, como consecuencia, de las emisiones de gases de efecto invernadero. En la investigación, desarrollada bajo la dirección del profesor Juan Gallego Medina, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM, se planteó dar solución a este inconveniente estudiando si era posible obtener una producción más sostenible de estas mezclas que incorporaban un alto contenido en caucho, pero sin que se viera afectado el rendimiento mecánico de las mismas.

Para ello se realizó, por un lado, un estudio en profundidad sobre las propiedades de estas nuevas mezclas que incorporan una serie de aditivos de origen orgánico capaces de reducir la viscosidad de los ligantes y, por otro, un análisis preciso sobre los impactos y beneficios ambientales de su producción. [3]

4.3. Análisis comparativo de una mezcla asfáltica convencional y modificada con un 4% de PVC

Este estudio utiliza una mezcla asfáltica modificada con un 4% de PVC buscando que certifique una conducta en sus características técnicas óptimo y que aporte con el mejoramiento del medio ambiente al darle uso a un material reciclado.

Se realizó la caracterización de los materiales implementando operaciones y especificaciones indicadas por la norma INVIAS del años 2013, para la elaboración de esta investigación se necesitó de la maquina giratoria para llegar a la densidad óptima en las dos mezclas tanto como la convencional como la modificada con PVC y determinar su comparación. Este método dio como resultado una variación de resultados en sus especímenes debido al método de compactación que se utilizó. Los efectos concluyentes del actual ensayo manifiestan la viabilidad de la implementación del PVC en la mezcla asfáltica, suministrando como resultado final mejor resistencia en su estabilidad con respecto al flujo. [4]

En la tabla No. 3 se puede observar los resultados obtenidos de estabilidad y flujo por cada por porcentaje de asfalto.

Tabla 3. Estabilidad y flujo por cada porcentaje de asfalto.

% ASFALTO	ESTABILIDAD (lb)	FLUJO (pulg)
3,5	4932	0,18
4	4239	0,142
4,5	3892	0,132
5	3662	0,158
5,5	3265	0,153
6	3124	0,154
6,5	3269	0,143

Fuente: Elaboración propia

4.4. Comportamiento de mezclas asfálticas cerradas mediante la aplicación del ensayo fénix.

En Colombia son escasas las investigaciones que se han realizado sobre el fenómeno de deterioro en las mezclas asfálticas, debido ante todo, a la falta de equipos apropiados para llevar a cabo mediciones en campo y en el laboratorio y al escaso presupuesto destinado para estas investigaciones. Es por esto, que con base en las investigaciones desarrolladas con el ensayo Fénix, se buscó establecer la viabilidad de su uso y permitir la caracterización de las propiedades mecánicas y dinámicas de mezclas asfálticas con granulometrías cerradas colombianas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y granulometrías del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), fabricadas con agregados y asfaltos convencionales, asfálticas, RAP, reemplazo de filler por cemento o cal entre otras. Adicionalmente, se pretendió de una manera simple, sencilla y económica, buscar implementar un ensayo que permita evaluar las mezclas asfálticas sin la necesidad de tener múltiples equipos de laboratorio y el empleo de recursos y tiempos elevados.

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), asfaltitas 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). Todas estas probetas, fueron divididas por la mitad y se les realizó la fisura de 5 mm en la mitad, para ser pegadas a las placas de acero con el epóxico y posteriormente, ser ensayadas a una velocidad de 1 mm/min y a una temperatura de 15 °C.

En la tabla No. 4 podemos ver los resultados obtenidos mediante la ejecución del ensayo Fénix.

Tabla 4. Curva carga-desplazamiento ensayo Fénix con distinto reemplazo de filler mineral por cemento. Asfalto 60/70

PROBETA	CARGA MAXIMA A TRACCION N (Fmax, KN)	DESPLAZAMIENTO A CARGA MAXIMA (ΔF_{max} , mm)	ELASTICA	FLUENCIA	RESISTENCIA A TRACCION (Mpa)	INDICE DE RIGIDEZ A TRACCION (KN/mm)	INDICE DE ENERGIA (J/m ²)
100%	0,667	0,697	0,306	0,506	0,974	1,59	0,461
75%	0,553	0,515	0,179	0,545	0,758	1,61	0,562
0%	0,328	0,762	0,174	0,422	0,787	1,61	0,778

Fuente: Elaboración propia

5. MARCO TEORICO

5.1. Pavimentos.

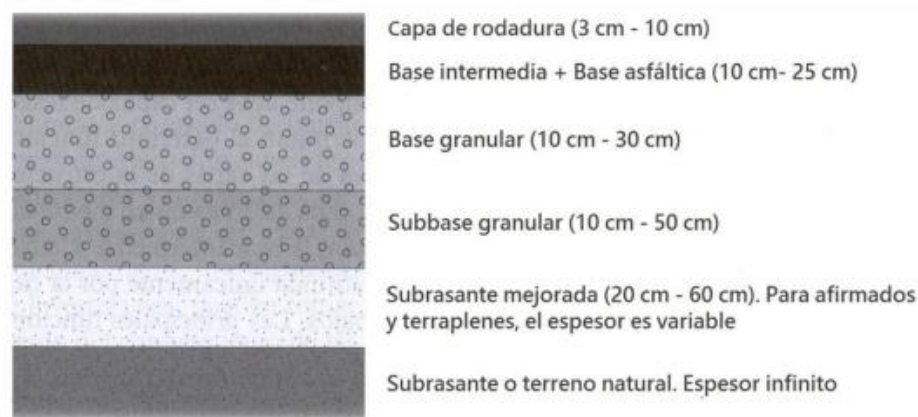
Los pavimentos son estructuras viales las cuales se construyen por un conjunto de capas superpuestas horizontales, son compuestas por materiales que han sido seleccionados. Las cargas dinámicas de los vehículos transitados por estas estructuras producen esfuerzos

cíclicos y deformaciones verticales, horizontales y de corte en medio de las capas. Así que, estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales. De esta forma, cumple un objetivo funcional al diseñarse con el fin de dar un paso seguro, cómodo y confortable al parque automotor que transite por esta superficie. [5]

5.1.1. Pavimento flexible.

Pueden ser definidas como estructuras viales conformadas por una capa asfáltica que es apoyada sobre capas de menor rigidez, sus componentes se basan en materiales granulares no tratados (base, subbase, afirmado y en algunos subrasante mejorada), a su vez soportan sobre la subrasante o terreno natural. La capa asfáltica para un pavimento de este tipo se conforma por la carpeta de rodadura, la base intermedia y la base asfáltica; cuando los niveles de tránsito son bajos, esta capa se puede constituir simplemente por la capa de rodadura. Los esfuerzos se disipan en cada una de las capas de esta estructura, generando cargas vehiculares, de modo que cuando llegan a la subrasante, la resistencia mecánica del suelo que la compone debe ser capaz de resistir dicho esfuerzo sin generar deformaciones que permitan el deterioro estructural o funcional de la vía. [5]

Figura 1. Perfil típico de una estructura de pavimento flexible.



Fuente: Rondón, H.A.; Reyes, F.A.

5.1.1.1. Capa de rodadura.

La capa de rodadura conforma la estructura de pavimento flexible y proporciona una superficie de rodadura estable y uniforme al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito; impermeabilidad hasta donde sea posible para impedir el paso del agua al interior del pavimento y complementa la capacidad estructural del pavimento con su resistencia la tensión. [6]

5.1.2. Pavimento rígido.

Se refiere a los pavimentos que se encuentran constituidos por una losa de concreto hidráulicos, que se apoya sobre una subrasante o sobre una capa de material que previamente ha sido seleccionado, lo cual se denomina subbase de pavimento rígido.

El concreto resiste con facilidad esfuerzos a tensión y es por esto que un pavimento de este tipo es mucho más eficiente incluso cuando existen partes débiles en la capa subrasante, la capacidad para este pavimento depende completamente de la resistencia de cada losa, así mismo las capas construidas por debajo de la subrasante (capas subyacentes) ejercen poca influencia en el diseño del espesor.

- La subbase: Su función más importante es impedir la acción de bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento.
- Losa de concreto: Su función es la misma de la carpeta asfáltica del pavimento flexible, más la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que le apliquen.

5.1.3. Pavimento articulado.

Se componen por una capa de rodadura que se elabora con bloques de concreto prefabricados, llamados adoquines que son bloques o piedras de forma rectangular que se utilizan específicamente para construir pavimentos de este tipo, poseen gran resistencia y facilidad de manejo y mantenimiento, estos adoquines se utilizan de un espesor uniforme elaborados entre sí. Esta capa puede ubicarse encima de una capa delgada de arena que a su vez se encuentra apoyada sobre una capa de base granular, o así mismo sobre la subrasante, es resistente al desgaste y al agua. Uno de los inconvenientes presentados para este pavimento es que se produzca una falla de la base, y el arreglo puede llegar a ser muy costoso.

5.2. Mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas son empleadas para la construcción de pavimentos, como lo son capas de rodadura o en capas inferiores, su función principal es proporcionar una cómoda, segura y económica superficie de rodamiento para los usuarios de las vías, dando facilidad a la circulación de los vehículos, es caracterizada por ser una combinación de asfalto y agregados que a su vez son mezclados de manera uniforme, teniendo los equipos necesarios para calentar los materiales que son necesarios para su mezcla, sin embargo la fabricación de estas mezclas posee una gran afectación ambiental y energética las cuales causan gases de efecto invernadero.

Entre los diferentes tipos de mezcla podemos encontrar la mezcla para pavimento flexible la cual es la más utilizada en el país y destaca la mezcla densa en caliente y su diseño se rige por la norma INVIAS, para este proyecto de grado se tomó la mezcla MDC-19. [7], [8]

5.2.1. Tipos de mezcla.

En el país es muy común encontrar pavimentos flexibles debido a la facilidad para su mantenimiento y los bajos costos de construcción comparado con el pavimento en concreto, este se divide en diferentes tipos de mezcla dependiendo de diferentes factores como el entorno donde nos encontremos y las necesidades que soliciten los proyectos a construir, ya sea para realización de un pavimento nuevo o para refuerzo de alguno ya existente, entre ellos existen las mezclas asfálticas en caliente, de granulometría densa, de granulometría abierta y de granulometría discontinua. [9], [10]

5.2.1.1. Mezcla asfáltica en caliente.

Hace parte del tipo más generalizado de mezclas asfálticas, todas las partículas del agregado utilizado deberán estar recubiertas completamente por una película homogénea de ligante que deberá proporcionar durabilidad y estabilidad. El proceso es calentar el agregado y así mismo el cemento asfáltico, su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente, son empleadas para la construcción de carreteras, de vías urbanas, aeropuertos, y también son utilizadas para capas de rodadura y capas inferiores de los pavimentos. Esta mezcla se clasifica en una mezcla de granulometría densa, mezcla asfáltica de granulometría abierta mezcla asfáltica de granulometría discontinua. [9], [11], [8]

Figura 2. Mezcla asfáltica.



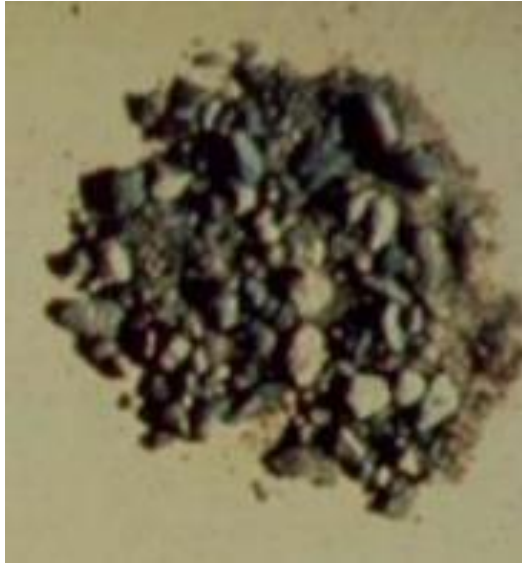
Fuente: www.aditivosasfalticos.com/olasitio.html

[12]

5.2.1.2. De granulometría densa

Esta mezcla asfáltica en caliente contiene una granulometría homogénea y continua, contiene asfalto y agregado pétreo bien gradado con un tamaño entre 37.5 mm (1 ½ in) y 9.5 mm (3/8 in), regularmente utilizado para carpetas de asfalto nuevas de alta resistencia o como refuerzo a una carpeta ya existente. Este proyecto de grado uso este tipo de mezcla para su correcto desarrollo. [9], [11]

Figura 3. Granulometría de una muestra densa.



Fuente: www.aditivosasfalticos.com/olasitio.html

[12]

5.2.1.3. De granulometría abierta:

Esta mezcla asfáltica en caliente contiene una granulometría homogénea y uniforme, contiene asfalto y agregado pétreo con granulometría uniforme y un tamaño nominal entre 12.5 mm (1/2 in) y 6.3 mm (1/4 in). Son usadas para formar capas de rodadura, normalmente son utilizadas sobre carpetas de granulometría densa con la finalidad de satisfacer la calidad de rodamiento [9], [11]

Figura 4. Granulometría de una mezcla abierta.



Fuente: www.aditivosasfalticos.com/olasitio.html

[13]

5.2.1.4. De granulometría discontinua.

Esta mezcla asfáltica en caliente contiene una granulometría homogénea y uniforme contiene asfalto y un agregado pétreo con granulometría discontinua, y un tamaño nominal entre 19.0 mm (3/4 in) y 9.5 mm (3/8 in). Se utilizan para carpetas de rodadura debido a su macro textura impide se formen películas de agua sobre el pavimento, también puede ser utilizadas en carreteras de alto tránsito pero en la construcción de capas inferiores. [9], [11]

Figura 5. Granulometría de una mezcla discontinua.



Fuente: www.aditivosasfalticos.com/olasitio.html

[13]

5.2.2. Componentes de la mezcla.

Contiene gran cantidad de agregados gruesos y finos aproximadamente un 90%, este material aporta estabilidad a la mezcla asfáltica a través de la fricción, un 5% de llenante mineral o para N° 200 que mezclado con el ligante asfáltico, y el otro 5% es el ligante asfáltico y tiene como función adherir los componentes de la mezcla, es importante para que un pavimento tenga un correcto funcionamiento que estos componentes sean de buena calidad en especial el ligante asfáltico y el llenante mineral, ya que son los de más influencia en el costo y la calidad de la mezcla. [7]. [10], [8], [14], [15]

5.2.2.1. Agregado pétreo.

Este material es duro, conocido también como roca, se usa como triturado en fragmentos de diferente tamaño, son necesarios para la construcción de un pavimento ya que constituyen entre un 90% y 95% en peso, y entre un 75% y 85% en volumen,

se clasifican en agregado grueso o grava, fino o arena y pasa 200 es muy importante su selección debido a que determina el comportamiento del pavimento.

Existen diferentes tipos de agregado dependiendo de su procedencia como son los depósitos naturales de grava y arena, por medio de trituradoras de canteras y artificiales que se extrae de demoliciones de concretos y asfaltos reciclados. El agregado pétreo para este proyecto de grado fue extraído de la arenenera Chicamocha ubicada en la finca “el tamarindo” corregimiento Pescadero, vía Bucaramanga - san gil. [9], [16], [8]

5.2.2.2. Cemento asfáltico.

Es un material termoplástico que cuando su temperatura crece, decrece su viscosidad (utilizada para determinar las temperaturas de fabricación de mezclas asfálticas), es empleado principalmente para la pavimentación, aunque tiene otros usos como agente estabilizador, impermeabilizante, en fabricación de pinturas, entre otros.

El cemento asfáltico es la materia prima, que imparte estabilidad y cohesión al pavimento. [17]

Existen cuatro categorías de productos asfálticos que se usan en pavimentos, estos son:

- Cementos asfálticos, cuyo grado se mide por la penetración o por la viscosidad a 60°.
- Emulsiones asfálticas.
- Asfalto espumado o espuma de asfalto.
- Asfaltos líquidos y aceites de carreteras.

Es importante resaltar que la temperatura de compactación en obra no puede determinarse de la misma forma como se hace en laboratorio, ya que se hace necesario realizar tramos de prueba en donde se evalúe el efecto del equipo de compactación y de las condiciones propias de la obra como lo son las condiciones climáticas.

Las propiedades de las mezclas asfálticas se modifican con la adición de diferentes productos al asfalto. Esta metodología es utilizada para mejorar el comportamiento que arrojan las mezclas tradicionales al ser sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Se busca mejorar las propiedades como lo son la rigidez y la resistencia bajo carga monotonica, el ahuellamiento, a la fatiga y al envejecimiento.

5.3. Diseño de mezclas asfálticas en caliente.

Existen diferentes procedimientos para calcular las cantidades de cada material en la mezcla caliente. A continuación se presentan algunos que tienen una larga trayectoria de uso a nivel mundial:

5.3.1. Thehubbar – Field (1920´s).

Fue uno de los primeros métodos de mezclas asfálticas, en el cual evaluaba el contenido de vacíos en la mezcla y en el agregado del material y se compara con una estabilidad ya obtenida para medir la deformación.

5.3.2. Método Marshall (1930's).

Fue descubierto durante la segunda guerra mundial y después se adaptó para su uso en carreteras. Tiene en cuenta que la estabilidad representa la carga que tolera la mezcla y el flujo la deformación que presenta la misma; todo esto a su vez junto con el porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales para su implementación.

5.3.3. Método Hyeem (1930's).

Es un método contemporáneo con el método Marshall, a diferencia que el principal parámetro de evaluación de este es la estabilidad pseudotriaxial.

5.3.4. Método de la Western Association Of State Highway on Transportation Officials WASTHO (1984).

Este método fue recomendado para realizar cambio que se requerían en los materiales y las especificaciones de diseño de mezclas asfálticas en caliente para mejorar la resistencia a las roderas.

5.3.5. Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. (AAMAS)(1987).

Después de muchos años de desarrollo y evolución de los métodos de diseño para mezclas asfálticas, se dio la necesidad de encontrar un nuevo método de compactación de las mezclas en el laboratorio y la evaluación de sus propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las 25 deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.

5.3.6. Método SUPERPAVE (1993).

Fue un método que vio sus inicios tomando aspectos de diseño del método AAMAS. El método Superpave contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla. El funcionamiento de dicho método predice a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por baja temperatura. Después de un largo proceso de investigación en el laboratorio por 7 años, los modelos estuvieron listos en el año 2000. Superpave promete ser un diseño confiable el cual se basa en métodos de ensayos de laboratorios que pueden ser usados para la identificación de la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos

5.4. Método de diseño Marshall.

Este método fue desarrollado por Bruce Marshall, su propósito es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente y establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. El método Marshall solo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación, que usan cemento asfáltico clasificado por penetración o viscosidad y que contienen agregados con tamaño máximo de 25 mm.

5.5. Modulo dinámico.

El módulo dinámico es una propiedad importante para el diseño y análisis de un pavimento flexible ya que representa la rigidez de un pavimento caracterizando el comportamiento esfuerzo – deformación de los componentes de la mezcla.

Define propiedades elásticas del pavimento aplicando cargas sinusoidales (medio seno inverso) a compresión axial a diferentes frecuencias y temperaturas permitiendo medir las deformaciones recuperables dinámicas usando deformímetros (LVDT) para determinar

los valores de deformación y esfuerzo máximos que nos permitirán calcular el módulo dinámico y ángulo de desgaste. Se debe tener en cuenta que en el módulo dinámico la rigidez se ve afectada por la temperatura y frecuencia ya que a mayor temperatura y menor frecuencia se produce más daño al pavimento generando mayor frecuencia ya que a mayor temperatura y menor frecuencia se produce más daño al pavimento generando mayor deformación. [18], [19], [20], [21]

5.6. Cemento Portland.

El cemento es un conglomerante que se da a partir de un proceso de transformación de una mezcla de caliza, arcillas calcinadas sometidas a altas temperaturas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos:

- De origen arcilloso: Obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente.
- De origen puzolánico: La puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos.

5.6.1. Clasificación del cemento Portland.

Al cambiar su composición química y sus propiedades físico – mecánicas, se puede obtener características diferentes cuando el cemento es sometido a hidratación de esta manera dando lugar a diferentes tipos.

Existen diferentes clasificación del cemento portland que dependen del origen de la normalización, en Colombia según la norma técnica colombiana NTC 30 que se basa en las normas ASTM de los Estados Unidos presentan la siguiente nomenclatura y clasificación.

- Cemento Portland TIPO 1: destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
- Cemento Portland TIPO 1-M: destinado a obras de hormigón en general. al que no se le exigen propiedades especiales pero tienen resistencias superiores a las del tipo 1.
- Cemento Portland TIPO 2: destinado a obras que estén expuestas a sulfatos y obras donde se requiera moderado calor de hidratación
- Cemento Portland TIPO 3: desarrolla altas resistencias iniciales.
- Cemento Portland TIPO 4: desarrolla bajo calor de hidratación
- Cemento Portland TIPO 5: ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos
- Cemento Portland Blanco: se obtiene con materiales seleccionados que le confieren una coloración blanca
- Cementos Portland con incorporadores de aire: aquel al que se le adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización.
- Cemento Portland tipo 1-A, 1-M-A, 2A Y 3A: son los mismos tipos de cementos mencionados anteriormente con la diferencia que a estos se les adiciona un material incorporador de aire

Además de los tipos de cemento mencionados anteriormente, en Colombia se utilizan los siguientes:

- El cemento portland de escoria de alto horno: Mediante la pulverización conjunta de Clinker portland y escoria granulada finalmente molida con adición de sulfato de calcio
- El cemento portland puzolánico: Por medio de la pulverización conjunta de Clinker Portland y puzolanas. [22]

6. METODOLOGIA

6.1. Recolección de la muestra.

Para la realización del proyecto de grado, se necesitó transportar el agregado de la arenera Chicamocha que proviene de las canteras de arena y agregado que se encuentran en el sector de pescadero, ubicado en finca “el tamarindo” vía Bucaramanga-San gil.

El asfalto fue suministrado por MULTINSA S.A y el cemento portland fueron suministrados por la Universidad Pontificia Bolivariana.

6.2. Ensayos de caracterización del agregado.

Para la realización del proyecto se tomó como referencia las siguientes normas y especificaciones técnicas del INVIAS del año 2013:

Primero que todo se optó por realizar la identificación de las características del agregado, por ende los ensayos que se realizaron fueron los siguientes:

6.2.1. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino. INV E 213-13.

A partir de este ensayo se pudo obtener la clasificación del tamaño de los agregados gruesos y finos de un material, por medio de un proceso llamado tamizado. La muestra del material se separó por una serie de mallas que van disminuyendo en su tamaño progresivamente.

Según lo estipulado en la norma, se tomó la cantidad del material granular y se colocó sobre una superficie plana, posteriormente se cuarteo en partes iguales manualmente. Se tomó dos cuartas partes de este material, se procedió a lavar el material para luego llevarse al horno a una temperatura de 110°C durante un tiempo de (24±4 horas) y llevar a cabo el secado. Al finalizar todo este proceso se encajaron los tamices en orden decreciente por tamaño de abertura y se colocó la muestra encima del tamiz superior, se agito manualmente o con la tamizadora mecánica por un periodo suficiente hasta lograr que la gran mayoría de partículas de la muestra pasara por cada tamiz y se retuviera en la abertura acorde con su tamaño.

Tabla 5. Serie de tamices y porcentaje que pasa y se retiene en cada tamiz.

GRANULOMETRIA DEL AGREGADO			
# Tamiz	W Pasa (%)	Promedio (%)	W retenido (%)
3/4"	100	100	0
1/2"	(80-95)	87,5	12,5
3/8"	(70-88)	79	8,5
N°4	(49-65)	57	22
N°10	(29-45)	37	20
N°40	(14-25)	19,5	17,5
N°80	(8-14)	12,5	7
N°200	(4-8)	6	6,5
Fondo	6		6

Fuente: Elaboración propia

Imagen 1. Tamizado del agregado por medio de la tamizadora mecánica.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 2. Clasificación del agregado según el material retenido en cada tamiz.



Fuente: Elaboración propia

6.2.2. 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.

A través de este ensayo se midió la resistencia al desgaste de los agregados gruesos de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”). Por medio de la máquina de los ángeles, la cual consistió en una combinación de acciones como son la abrasión, el impacto y molienda en un tambor de acero que contiene una cantidad de esferas determinadas que depende de la granulometría de la muestra de ensayo.

Se tomó una muestra de agregado anteriormente lavada para luego ser llevada al horno y cumplir un proceso de secado a una temperatura de 110°C en un periodo de tiempo de 24 horas. Al terminar este tiempo, se procedió a estipular el tipo de granulometría a utilizar y seguidamente se ingresó el agregado y las esferas al tambor rotatorio. El proceso de desgaste del material debió ser a 500 revoluciones. Una vez se terminó este proceso fue necesario sacar el material del tambor y proceder a pasarlo por el tamiz No. 12 para luego ser lavado y ser secado en el horno a una temperatura de 110°C. Luego de esto se pesó la muestra seca y se prosiguió a hallar el porcentaje de desgaste del material.

En la tabla No. 6 se evidencia el tipo de granulometrías y el número de esferas que se deben utilizar para la elaboración del ensayo. En la tabla para No. 7 se evidencia el formato estipulado

por la norma INVIAS del año 2013 para la realización del ensayo desgaste por medio de máquina de los ángeles.

Tabla 6. Tipo de granulometrías de las muestras de ensayo.

GRANULOMETRIA	NUMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA, g
A	12	5000 +- 25
B	11	4584 +- 25
C	8	3330 +-20
D	6	2500 +- 15

Fuente: INVIAS año 2013

Tabla 7. Formato de granulometrías para el desgaste del agregado por medio de la máquina de los ángeles.

TAMAÑOS DE TAMIZ		MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES, g			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRIAS			
		A	B	C	D
37,5 (1 1/2")	25,0 (1")				
25,0 (1")	19,0 (3/4")	1250 +-25			
19,0 (3/4")	12,5 (1/2")	1250 +-25			
12,5 (1/2")	9,5 (3/8")	1250 +-25	2500+-10		
9,5 (3/8")	6,3 (1/4")	1250 +-25	2500+-10	2500+-10	
6,3 (1/4")	4,75 (No. 4)			2500+-10	
4,75 (No. 4)	2,36 (No. 8)				5000+-10
Total		5000+-10	5000+-10	5000+-10	5000+-10

Fuente: INVIAS año 2013

Imagen 3. Máquina de los ángeles.



Fuente: Elaboración propia

6.2.3. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E 227-13.

La muestra del material se vertió sobre el tamiz No. 4 para lograr que las partículas de agregado grueso y fino logaran una mejor separación. Se tomó una muestra como lo señala la tabla No. 8. La cantidad de material que se retuvo sobre el tamiz No. 4 tuvo que ser lavada para lograr remover las partículas finas que quedaron adheridas al agregado grueso. Posteriormente se secó el material en el horno a una temperatura de 110°C durante un tiempo de 24 horas. Después de haber transcurrido el tiempo de secado se inspeccionó detalladamente cada partícula de la muestra para comprobar si cumplía o no con el criterio de fractura. Para finalizar se procedió a

determinar la masa y se contó el número de partículas clasificadas en la categoría de partículas fracturadas.

A continuación se presenta la tabla No. 8, la cantidad mínimamente requerida para elaborar el ensayo de caras fracturadas según el tamaño máximo nominal del material utilizado:

Tabla 8. Masa mínima de muestra para cada tamaño de tamiz.

TAMAÑO MAXIMO NOMINAL mm (Pulgadas)	MASA MINIMA DE LA MUESTRA g (lb aprox.)
9,5 (3/8)	200 (0,5)
12,5 (1/2)	500 (1,0)
19 (3/4)	1500 (3,0)
25 (1)	300 (6,5)
37,5 (1 1/2)	7500 (16,5)
50 (2)	15000 (33,0)
63 (2 1/2)	30000 (66,0)
75 (3)	60000 (132,0)
90 (3 1/2)	90000 (198,0)

Fuente: INVIAS año 2013

6.2.4. Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras INV E 230-13.

Mediante este ensayo se describe los índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados que se van a utilizar en el diseño de carreteras.

6.2.4.1. Índice de aplanamiento

El material se redujo por cuarteo hasta obtener una muestra representativa del ensayo, de masa mínima acorde con el tamaño máximo nominal del agregado como se muestra en la tabla No. 5. Luego se secó la muestra en el horno a una temperatura de 110°C, se retiró del horno y se esperó hasta que la muestra lograra temperatura ambiente. Inmediatamente la muestra se estabilizó a la temperatura ambiente se realizó un ensayo de granulometría según la norma INV E 213-13, en este ensayo se descartaron las partículas retenidas en el tamiz de 63 mm (2 ½") y las que pasaron por el tamiz de 6,3 mm (¼") según lo estipulado en la norma INVIAS.

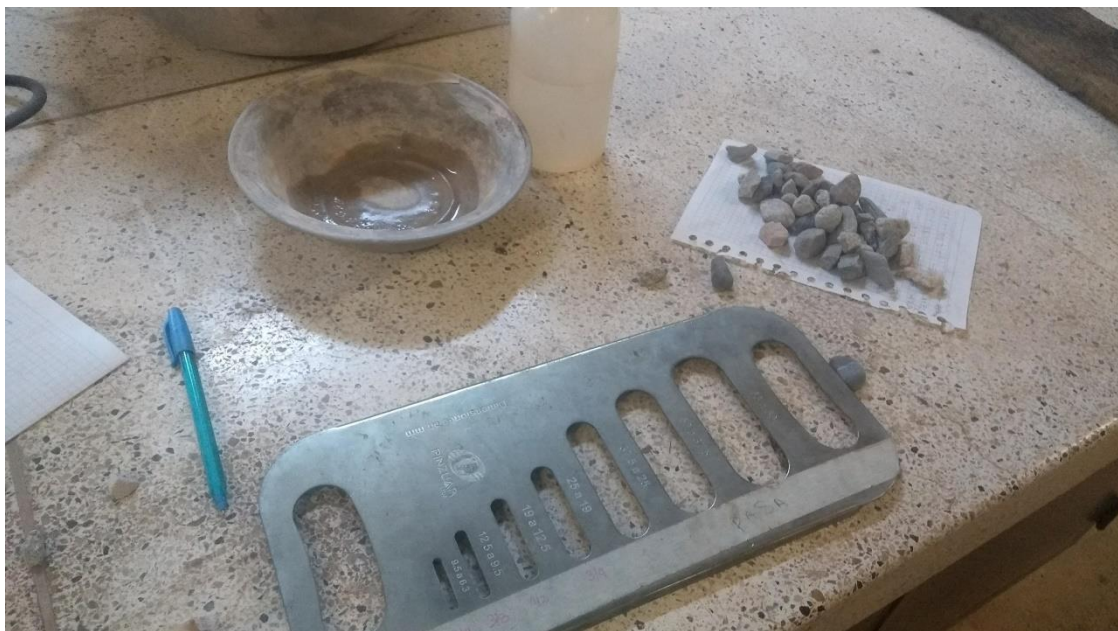
Por medio del calibrador de aplanamiento, se pasaron manualmente, una por una, las partículas por cada abertura del calibrador sin la necesidad de forzarlas. Una vez terminado este proceso se procedió a pesar la masa de cada una de las partículas que pasaron por cada abertura o espacio del calibrador, luego de esto se combinaron todas las partículas que pasaron por cada espacio o ranura del calibrador y se pesaron.

Tabla 9. Masa mínima de la muestra para el ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento.

TAMAÑO MAXIMO NOMINAL DEL AGREGADO, mm (pg.)	MASA MINIMA DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO DEL INDICE DE APLANAMIENTO, kg	MASA MINIMA DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO DEL INDICE DE ALARGAMIENTO, kg
50 mm (2")	35	
37,5 mm (1 1/2")	15	15
25 mm (1")	5	5
19 mm (3/4")	2	2
12,5 mm (1/2")	1	1
9,5 mm (3/8")	0,5	0,5

Fuente: INVIAS año 2013

Imagen 4. Calibrador para el ensayo de índice de aplanamiento.



Fuente: Elaboración propia

6.2.4.2. Índice de alargamiento

En cuanto a la preparación de la muestra el ensayo de índice de alargamiento se realizó de la misma manera que el ensayo de índice de aplanamiento. En este ensayo se descartaron las partículas retenidas en el tamiz de 50 mm (2") y las que pasaron por el tamiz de 6,3 mm (¼") según lo estipulado en la norma INVIAS.

En este ensayo se pasó manualmente cada una de las partículas de la muestra a través de las aberturas del calibrador sin forzarlas. Una vez terminado este proceso se procedió a pesar la masa de cada una de las partículas que quedaron retenidas en cada barra del calibrador, o sea cada partícula alargada. Luego de esto se combinaron todas las partículas que se retuvieron en cada barra del calibrador de alargamiento y se pesaron.

Imagen 5. Calibrador para el ensayo de índice de alargamiento.



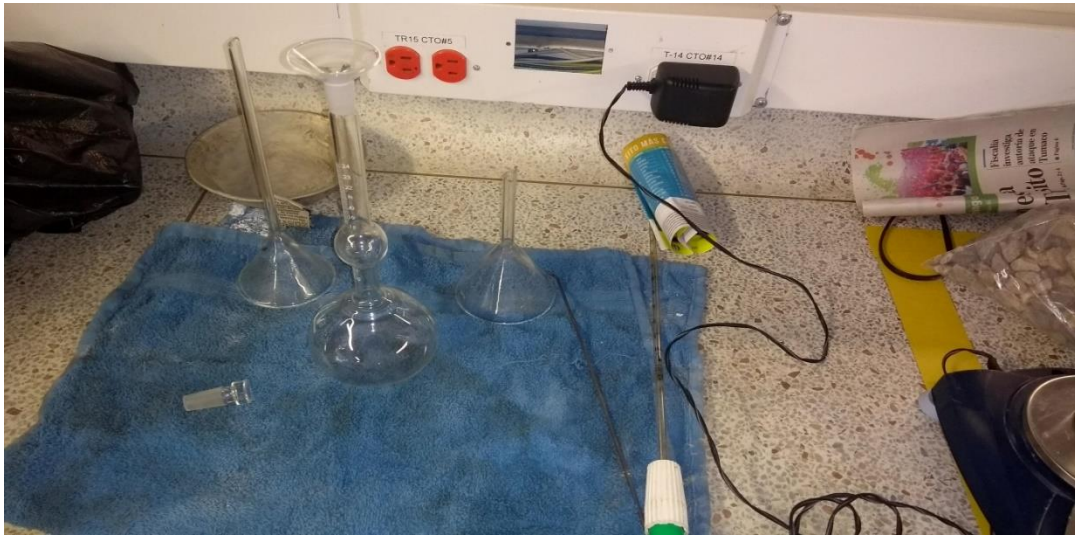
Fuente: Elaboración propia

6.3. Ensayos de caracterización del cemento portland

6.3.1. Densidad del cemento hidráulico INV E 307-13.

Se llenó el frasco con el líquido hasta un punto situado entre las marcas 0 y 1 ml del cuello. Luego, se secó el interior del frasco por encima del nivel del líquido después de verterlo. Se agregaron 64 gr de cemento portland al interior del frasco en pequeñas cantidades para evitar que el cemento se adhiriera a las paredes del frasco. Una vez se vertió el cemento en el recipiente, se colocó un tapón al frasco y de inmediato se empezó a rotar en círculos horizontales para liberar el aire en el cemento y lograr que no subieran burbujas de aire a la superficie del líquido. Posteriormente, se dejó el frasco en posición estática durante unos 5 minutos. El proceso anterior se realizó 3 veces y cuando se verificó que no salieron más burbujas se tomó la lectura del nivel del agua para así determinar la densidad del cemento hidráulico.

Imagen 6. Equipo para el ensayo de densidad del cemento hidráulico (cemento portland).



Fuente: Elaboración propia

Imagen 7. Proceso de rotación del frasco.



Fuente: Elaboración Propia

6.4. Ensayos de caracterización del material bituminoso

6.4.1. Penetración de los materiales bituminosos INV E 706-13.

A través de este ensayo pudimos determinar la consistencia de los materiales bituminosos sólidos y semisólidos en los cuales el asfalto es el único o el principal componente.

En cuanto a la preparación de la muestra, el material bituminoso se calentó cuidadosamente hasta que se logró una fluidez óptima la cual permitió verterlo en el recipiente de la muestra. Bajo ninguna circunstancia se permitió que la temperatura de calentamiento del material bituminoso excediera la prevista en la norma INV E 712-13, más de 90°C (195°F). Luego de este proceso la muestra se dejó enfriar a temperatura ambiente durante un periodo de tiempo de 45 a 90 minutos. A continuación se colocaron las muestras en el baño con agua y se dejaron conservar.

Una vez se cumplió con la elaboración de la muestra se procedió a realizar el ensayo con la máquina de penetración. Se acercó la aguja a la superficie del asfalto y se soltó el mecanismo que libera la aguja. Finalmente, se leyó y se anotó la distancia en mm, que la aguja penetra en la muestra. Se realizó mínimo tres penetraciones sobre diferentes puntos de la superficie, separados como mínimo 1 (cm) entre ellas.

Imagen 8. Equipo para el ensayo de penetración.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 9. Penetración del material bituminoso.



Fuente: Elaboración propia

6.4.2. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) INV E 712-13.

El material bituminoso se calentó cuidadosamente con el fin de lograr una consistencia líquida y así poder esparcirlo en los anillos. El calentamiento de la muestra debió ser por no más de dos horas y, en ningún caso, se permitió que la temperatura fuera mayor a 110°C (200°F). Luego se dejó enfriar los anillos con la muestra durante 30 minutos y se cortó el exceso de material bituminoso con un cuchillo o con una espátula caliente.

Se tomó un frasco de vidrio con una capacidad de 500 ml en el cual se colocaron los anillos con los especímenes, las guías para el centrado de las bolas y los termómetros. Luego se llenó el frasco con el líquido apropiado para la realización del ensayo. Se utilizaron unas pinzas para centrar las bolas en sus guías correspondientes, sobre cada uno de los anillos del material a ensayar. El recipiente se calentó a una rata constante de elevación de temperatura de 5°C (9°F)/min y se

anotó para cada pareja de anillo y bola, la temperatura que el termómetro indico en el momento que el producto bituminoso que rodea la bola, toco el fondo de la placa de referencia.

Imagen 10. Equipo para el ensayo de punto de ablandamiento.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 11. Punto de ablandamiento del material bituminoso.



Fuente: Elaboración propia

6.4.3. Ductilidad INV E 702-13.

La muestra de material bituminoso se calentó cuidadosamente en el horno a una temperatura ajustada de 135°C (275°F) hasta que se logró una fluidez óptima la cual permitió verterlo en el molde de la muestra. Luego de este proceso el molde se dejó enfriar a una temperatura ambiente por un periodo de 30 a 40 minutos. Inmediatamente, se colocó la probeta en el ductilímetro, introduciendo cada pareja de clavijas de los sistemas fijo y móvil del molde en los orificios de cada pinza. Finalizado este proceso se dio inicio al ensayo de tracción y se anotó la longitud de estiramiento de la muestra cuando esta se rompió, o en muchas ocasiones cuando el material bituminoso tocó el fondo del baño del ductilímetro.

Imagen 12. Máquina para el ensayo de recuperación elástica del material bituminoso.



Fuente: Elaboración propia

6.4.4. Punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland INV E 709-13.

El recipiente de ensayo se llenó con material bituminoso hasta el nivel indicado en la norma INVIAS año 2013. Posteriormente, se encendió el equipo para aplicar temperatura a la muestra de asfalto y seguido a esto se introdujo el termómetro en posición vertical, de tal manera que pudiera tomar las lecturas de temperatura.

Cuando la temperatura del asfalto estuviera a unos 28°C por debajo del punto de inflamación, se comenzó a pasar la llama sobre la superficie de la muestra de asfalto. Se consideró que la muestra se había inflamado cuando apareció una llama en la superficie del recipiente. Para determinar el punto de combustión, se continuó calentando la muestra a la misma velocidad de 5 a 6°C y se siguió pasando la llama sobre la superficie del recipiente del ensayo a intervalos de 2°C, hasta que el asfalto se incendió y mantuvo la llama como mínimo 5 segundos.

Imagen 13. Punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia

6.4.5. Peso específico.

Se tomaron dos esferas de asfalto y se determinó su masa. Posteriormente, se introdujeron en un cilindro lleno de agua y se midió el volumen de desplazamiento del agua al introducir las muestras. Este resultado se dividió en la masa para poder hallar la densidad del asfalto

Imagen 14. Ejecución del ensayo de peso específico del material bituminoso.



Fuente: Elaboración propia

6.5. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico mediante el ensayo Marshall.

Este proyecto se basó en el diseño de un tipo de muestra densa en caliente MDC-19, cumpliendo con los parámetros e indicaciones estipulados en el art 450-13 (mezclas asfálticas en caliente de gradación continua) de las especificaciones técnicas de la norma INVIAS año 2013.

La muestra densa en caliente MDC-19 se realizó con una serie de indicaciones propuestas en la tabla No. 10. Tabla 450-6 del art 450-13 de la norma INVIAS año 2013. Las cuales fueron:

La serie de tamices a utilizar en la gradación y los promedios de los porcentajes de agregado que pasaron en cada granulometría.

Tabla 10. Tabla 450-6 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente.

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm/ U.S. Standard)										
	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,18	0,075	
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200	
% PASA											
DENSА	MDC- 25	100	80- 95	67- 85	60- 77	43- 59	29-45	14-25	8-17	4-8	
	MDC- 19		100	80- 95	70- 88	49- 65	29-45	14-25	8-17	4-8	
	MDC- 10				100	65- 87	43-61	16-29	9-19	5-10	
SEMIDENSА	MSC- 25	100	80- 95	65- 80	55- 70	40- 55	24-38	9-20	6-12	3-7	
	MSC- 19		100	80- 95	65- 80	40- 55	24-38	9-20	6-12	3-7	
GRUESА	MGC- 38	100	75- 95	65- 85	47- 67	40- 60	28- 46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC- 25		100	75- 95	55- 75	40- 60	28- 46	17-32	7-17	4-11	2-6
ALTO MODULO	MAM- 25	100	80- 95	65- 80	55- 70	40- 55	24-38	10-20	8-14	6-9	
TOLERANCIAS EN PRODUCCION SOBRE LA FORMULA DE TRABAJO (+-)											
				4%					3%	2%	

Fuente: INVIAS año 2013

Para poder determinar el porcentaje óptimo de asfalto se realizaron los siguientes ensayos propuestos en la norma INVIAS año 2103:

6.5.1. Estabilidad de flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall INV E 748-13.

6.5.1.1. Elaboración de las probetas.

Se realizaron briquetas con varios porcentajes de mezcla asfáltica con el fin de encontrar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico cumpliendo con los parámetros interpuestos en la norma INVIAS año 2013. Los porcentajes que se utilizaron fueron de: 4,0%, 4,5%, 5,0 %, 5,5% y 6,0 %.

Para cada porcentaje de cemento asfáltico se fabricaron tres (3) briquetas, por consiguiente, se hicieron quince (15) briquetas en total para poder determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

Como se mencionó anteriormente, se realizó un tipo de muestra densa en caliente MDC-19 el cual tenía que cumplir con los requisitos en cuanto a la granulometría (serie de tamices e intervalos de porcentajes que pasa por cada tamiz) estipulados en la tabla 6. Tabla 450-6 del artículo 450-13 de la norma INVIAS año 2013.

Para poder hallar el porcentaje óptimo de asfalto se necesitaron 1200 gr (1,2 kg) de agregado proveniente de la arenera Chicamocha por cada briqueta, en total se necesitaron 18000 gr (18 kg) de agregado.

En cuanto a la preparación de la muestra, los agregados provenientes de la arenera Chicamocha se secaron a una temperatura constante de 105°C y 110°C (220 y 230°F). Posteriormente, se le realizaron las respectivas granulometrías para poder clasificarlo por porcentajes de cemento asfáltico.

La temperatura a la cual se calentó la mezcla asfáltica fue de 140°C, y la temperatura del agregado fue de 150°C. Mientras el material bituminoso y el agregado llegaban a la temperatura deseada, era necesario calentar en el horno los moldes y el collarín a una temperatura de 110°C. Una vez terminado estos procesos, se procedió a

mezclar el agregado y la mezcla asfáltica procurando llegar a una temperatura deseada de 150°C para poder empezar el proceso de compactación. Previamente se sacaron los moldes y collarines del horno y se instalaron en el lugar adecuado de la maquina compactadora. Luego se le coloco el papel filtro a los moldes y se vertió la mezcla de agregado y mezcla asfáltica sobre los moldes y se procedió a encender la máquina para iniciar el proceso de compactación del material. Por cada cara, a cada briqueta se le propinaron 75 golpes.

Luego del proceso de compactación se dejaron las briquetas a temperatura ambiente durante un periodo de 24 horas para luego proceder a fallarlas.

En las imágenes 15 y 16 se puede evidenciar el proceso de calentamiento del agregado y del asfalto. En la imagen 17 se realizó la mezcla entre el agregado y el cemento asfáltico.

Imagen 15. Proceso de calentamiento del agregado proveniente de la arenera Chicamocha.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 16. Proceso de calentamiento del cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 17. Proceso de mezclado entre el agregado y el asfalto.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 18. Máquina de compactación mecánica.



Fuente: Elaboración propia

6.5.1.2. Ensayo de estabilidad y flujo.

El ensayo de estabilidad y flujo se realizó 24 horas después de la compactación de las probetas. Se colocaron las briquetas en un baño maría por un periodo de tiempo de 30 a 40 minutos a una temperatura de 60°C. Luego, se limpiaron y se lubricaron las mordazas.

Luego de tener el equipo listo para fallar las probetas, se retiraron las briquetas del baño maría y se les retiró el exceso de agua con una toalla. Se adecuaron las probetas en la mordaza inferior centradamente y se le aplicó la carga a una tasa de deformación constante sobre la mordaza superior, hasta que ocurrió la falla. El procedimiento de sacar la probeta del baño maría y luego fallarla en el equipo no superó los 30 segundos.

Imagen 19. Baño de agua María.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 20. Prensa ensayo Marshall



Fuente: Elaboración propia

Antes de la ejecución del ensayo de estabilidad y flujo se realizaron los siguientes ensayos estipulados en la norma INVIAS año 2013, necesarios para el óptimo desarrollo del proyecto:

6.5.2. Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos INV E 733-13.

Una vez se dejó reposar la briqueta a temperatura ambiente se procedió a retirar todos los excesos de material extraño tales como capas de sello, riegos de liga, imprimaciones, materiales de fundación, papeles u hojas. Posteriormente, se tomaron los diámetros y alturas de cada espécimen fabricado para luego empezar a tomar el peso de cada briqueta bajo tres condiciones, las cuales fueron: peso de la muestra seca en el aire, peso de la muestra sumergida en agua y peso de la muestra superficialmente seca.

Para tomar el peso de la briqueta seca en el aire, se procedió solo a pesar está en una balanza y tomar el dato de su masa.

Para tomar el peso de la briqueta sumergida en agua, se sumergió el espécimen en agua a temperatura ambiente y luego se pesó en una balanza para determinar la masa de esta.

Una vez se tomó la masa del espécimen sumergido en agua, con una toalla se secó superficialmente la briqueta para luego determinar su masa en la balanza.

La gravedad específica bulk del espécimen se calculó por medio de esta expresión:

Fórmula 1. Ecuación para hallar la gravedad específica Bulk.

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Fuente: INVIAS año 2013

Dónde: A: Masa del espécimen seco en el aire, g;

B-C: Masa del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25°C;

B: Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco (SSS), g;

C: Masa del espécimen sumergido en agua, g.

Imagen 21. Determinación del peso de la briqueta sumergido en agua.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 22. Determinación del peso de la muestra seca en el aire.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 23. Determinación del peso de la muestra superficialmente seca.



Fuente: Elaboración propia

6.5.3. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas INV E 736-13.

Este ensayo se realizó bajo el mismo procedimiento estipulado en la norma INV E 733-13 de la norma INVIAS año 2013.

Una vez se realizó este procedimiento se calculó el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica compactada mediante esta fórmula:

Fórmula 2. Ecuación para hallar el porcentaje de vacíos con aire de las mezclas asfálticas.

$$VA = \left[1 - \frac{Gmb}{Gmm} \right] \times 100$$

Fuente: INVIAS año 2013

Dónde: VA: Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada respecto del volumen del espécimen;

Gmm: Gravedad específica máxima;

Gmb: Gravedad específica bulk del espécimen compactado.

6.5.4. Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos INV E 735-13.

Una vez la briqueta fue fallada en el ensayo de estabilidad y flujo se calentó en el horno a una temperatura de 110°C. Cuando la muestra se secó y mientras aun estuvo tibia, sobre un mesón se procedió a separar con la mano las partículas de la muestra de asfalto y agregado. Se dejó enfriar las partículas lo necesario a temperatura ambiente. Luego, se determinó la masa de la muestra en la balanza y se vertió en el picnómetro.

Posteriormente, se agregó la cantidad suficiente de agua para cubrir la muestra por completo. Seguido, se colocó el picnómetro con la muestra y agua sobre una máquina de vibración. Luego, se encendió el sistema de vibración durante 17 minutos y la bomba extractora de aire a una presión de 2.8 Bar para lograr extraer las burbujas de aire en la muestra. Una vez se terminó el tiempo de vibrado, se apagó la bomba extractora de aire y se procedió a llenar de nuevo el picnómetro con agua a la altura indicada y se repitió el mismo proceso anterior.

Finalmente, se llenó totalmente de agua el picnómetro y se determinó la masa del picnómetro con la muestra y el agua.

Imagen 24. Proceso de extracción de burbujas de aire de la muestra.



Fuente: Elaboración propia

Finalizado todo el proceso de fabricación de las briquetas convencionales se halló el porcentaje óptimo de asfalto de estas mediante las curvas generadas en las gráficas de densidad máxima vs porcentaje de asfalto, estabilidad máxima vs porcentaje de asfalto y valor medio del porcentaje de vacíos con aire permitido por las especificaciones.

6.6. Fabricación de las briquetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y modificadas con cemento portland.

En cuanto a la caracterización del agregado, cemento hidráulico y material bituminoso las briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con cemento portland se fabricaron de la misma manera que las briquetas convencionales a excepción de la norma INV E 213-13.

Para la ejecución de las briquetas con cemento asfáltico óptimo y modificadas con cemento portland se realizó una investigación para poder establecer cuáles serían los porcentajes de cemento portland apropiados para poder fabricarlas y obtener un buen comportamiento de estas. Mediante el artículo (Comportamiento de mezclas asfálticas cerradas mediante la aplicación del ensayo fénix) el cual consistía en el reemplazo de cemento por filler se llegó a la conclusión que los porcentajes de cemento portland apropiados para la correcta ejecución de las briquetas fueron de: 0%, 25%, 50%, 75% y 100%.

Una vez se estableció esto, se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje de cemento y al material retenido en el fondo de cada granulometría se procedió a agregarle el 0, 25, 50, 75 y 100% de cemento portland para poder verificar su comportamiento mecánico y dinámico.

Respecto a los ensayos de estabilidad de flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall (Elaboración de probetas, Ensayo de estabilidad y flujo),

Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas, Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas y Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos;. Las briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con cemento portland se fabricaron de la misma manera que las briquetas convencionales a excepción del proceso de elaboración de probetas ya que anteriormente se había hallado su porcentaje óptimo de asfalto, que fue de 5,5 % y de esta manera las 15 briquetas se fabricaron con este porcentaje ideal de asfalto.

Imagen 25. Briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con cemento portland



Fuente: Elaboración propia

6.7. Módulos dinámicos.

Como último objetivo a cumplir en este proyecto de grado, a continuación se realiza la determinación experimental de los módulos dinámicos de las muestras asfálticas modificadas con Cemento Portland.

Para la realización del ensayo de módulos dinámicos, se utilizaron dos equipos esenciales para la obtención de los resultados; Se utilizó el compactador giratorio y el equipo DTS-30.

6.7.1. Compactador giratorio.

En cuanto a la preparación de la muestra, se utilizaron 2800 gr de agregado para la fabricación de las briquetas, una por cada porcentaje de cemento Portland (0%, 25%, 50%, 75% y 100%).

La temperatura a la cual se calentó el asfalto fue de 140°C, y la temperatura del agregado fue de 150°C. Previamente, se configuró y se le suministraron los datos necesarios a la máquina de compactación giratoria, para la correcta elaboración de las briquetas. Una vez la mezcla asfáltica logró la temperatura ideal, se vertió está dentro del molde del compactador giratorio y se instaló el molde en el lugar adecuado para el inicio del ensayo. La idea de este ensayo fue lograr que las alturas de las briquetas fueran de 150 mm y diámetros de 100 mm.

Una vez se cumplieron los ciclos necesarios para llegar a densidad ideal de las probetas, se procedió a sacar del molde con el sistema de presión de aire, y dejarlas reposar a temperatura ambiente para que no sufrieran ningún tipo de daño.

Finalmente, se tomó el dato de densidad de la probeta y los ciclos que se necesitaron para llegar a la altura de 150 mm.

Imagen 26. Compactador giratorio



Fuente: Elaboración propia

En la imagen No. 27 se puede ver el proceso de extracción de la briqueta mediante el sistema de aire a presión que genera el compactador giratorio.

Imagen 27. Extracción de las briquetas del compactador giratorio.



Fuente: Elaboración propia

6.7.2. Equipo DTS-30.

Una vez se fabricaron las briquetas, se procedió a la calibración del equipo DTS - 30 con las frecuencias estipuladas en el manual. Para temperaturas menores a 30,0°C se debía encender el condensador.

Se trabajó cada briqueta para distintas temperaturas, la temperatura de 4,4°C no se empleó para determinar los módulos, por seguridad del equipo y debido a la condensación que genera el frío, cuando se trabaja a una temperatura de 4,4°C, la maquina produce agua la cual puede afectar los sensores y los circuitos del equipo. Además, en el territorio colombiano, no tendríamos proyectos viales con estas condiciones de temperatura, y por recomendación del proveedor del equipo, por estas razones expresadas anteriormente, se consideró con el aval del director de este proyecto de grado, no emplear la temperatura de 4.4°C.

Se empezó trabajando con una temperatura de 21.1°C. luego, se esperó el tiempo necesario para que la temperatura se estabilizara. Se dejaron las briquetas dentro de la máquina para que todas al mismo tiempo adquirieran la misma temperatura, así que la primera en ensayar fue la de 0%, a la temperatura más baja (21.1°C). Se procedió a ajustar nuevamente los sensores y demás elementos para la siguiente briqueta que sería la de 25%, a la misma temperatura y así mismo con las demás. Después se procede a apagar el condensador y encender el foco para que la temperatura se incremente y se estabilice más rápido. Se trabajaron las demás temperaturas; 21.1°C, 37.8°C, y 54.4°C, para cada una de las briquetas. Cada temperatura arrojó un módulo dinámico para cada frecuencia.

Imagen 28. Equipo DTS-30



Fuente: Elaboración propia

Imagen 29. Ensayo de módulos dinámicos en ejecución mediante el equipo DTS-30.



Fuente: Elaboración propia

7. RESULTADOS

Tomando como referencia la norma INVIAS 2013 se desarrollaron una serie de ensayos que nos permitieron caracterizar el agregado, cemento portland y el material bituminoso. Los cuales arrojaron los siguientes resultados:

7.1. Briquetas convencionales (determinación del porcentaje óptimo de asfalto)

7.1.1. Caracterización del agregado

7.1.1.1. Granulometría del agregado grueso y fino.

Se realizó una granulometría por cada porcentaje de asfalto (4%, 4,5%, 5%, 5,5% y 6%). El procedimiento para realizar este ensayo está regido por la norma INV E 213-13.

En las tablas 11, 12, 13, 14 y 15 se muestran las granulometrías con su respectivo porcentaje de asfalto y los resultados del porcentaje de peso retenido, peso retenido y el porcentaje que pasa de muestra por cada serie de tamiz.

Tabla 11. Granulometría 4% de asfalto.

# Tamiz	W Pasa (%)	Promedio (%)	W retenido (%)	W retenido (gr)
3/4"	100	100	0	0
1/2"	(80-95)	87,5	12,5	144
3/8"	(70-88)	79	8,5	97,92
N°4	(49-65)	57	22	253,44
N°10	(29-45)	37	20	230,4
N°40	(14-25)	19,5	17,5	201,6
N°80	(8-14)	12,5	7	80,64
N°200	(4-8)	6	6,5	74,88
Fondo	6		6	69,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Granulometría 4,5% de asfalto.

PORCENTAJE CEMENTO ASFALTICO		4,50%		
PESO AGREGADO BRIQUETAS (gr)		1200		
W TOTAL (gr)		1146		
(PESO AGREGADO)(% CEMENTO ASFALTICO)		54		
# Tamiz	W Pasa (%)	Promedio (%)	W retenido (%)	W retenido (gr)
3/4"	100	100	0	0
1/2"	(80-95)	87,5	12,5	143,25
3/8"	(70-88)	79	8,5	97,41
N°4	(49-65)	57	22	252,12
N°10	(29-45)	37	20	229,2
N°40	(14-25)	19,5	17,5	200,55
N°80	(8-14)	12,5	7	80,22
N°200	(4-8)	6	6,5	74,49
Fondo	6		6	68,76

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Granulometría 5% de asfalto.

PORCENTAJE CEMENTO ASFALTICO		5,00%		
PESO AGREGADO BRIQUETAS (gr)		1200		
W TOTAL (gr)		1140		
(PESO AGREGADO)(% CEMENTO ASFALTICO)		60		
# Tamiz	W Pasa (%)	Promedio (%)	W retenido (%)	W retenido (gr)
3/4"	100	100	0	0
1/2"	(80-95)	87,5	12,5	142,5
3/8"	(70-88)	79	8,5	96,9
N°4	(49-65)	57	22	250,8
N°10	(29-45)	37	20	228
N°40	(14-25)	19,5	17,5	199,5
N°80	(8-14)	12,5	7	79,8
N°200	(4-8)	6	6,5	74,1
Fondo	6		6	68,4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Granulometría 5,5 % de asfalto.

PORCENTAJE CEMENTO ASFALTICO		5,50%		
PESO AGREGADO BRIQUETAS (gr)		1200		
W TOTAL (gr)		1134		
(PESO AGREGADO)(% CEMENTO ASFALTICO)		66		
# Tamiz	W Pasa (%)	Promedio (%)	W retenido (%)	W retenido (gr)
3/4"	100	100	0	0
1/2"	(80-95)	87,5	12,5	141,75
3/8"	(70-88)	79	8,5	96,39
N°4	(49-65)	57	22	249,48
N°10	(29-45)	37	20	226,8
N°40	(14-25)	19,5	17,5	198,45
N°80	(8-14)	12,5	7	79,38
N°200	(4-8)	6	6,5	73,71
Fondo	6		6	68,04

Fuente: Elaboración propia.

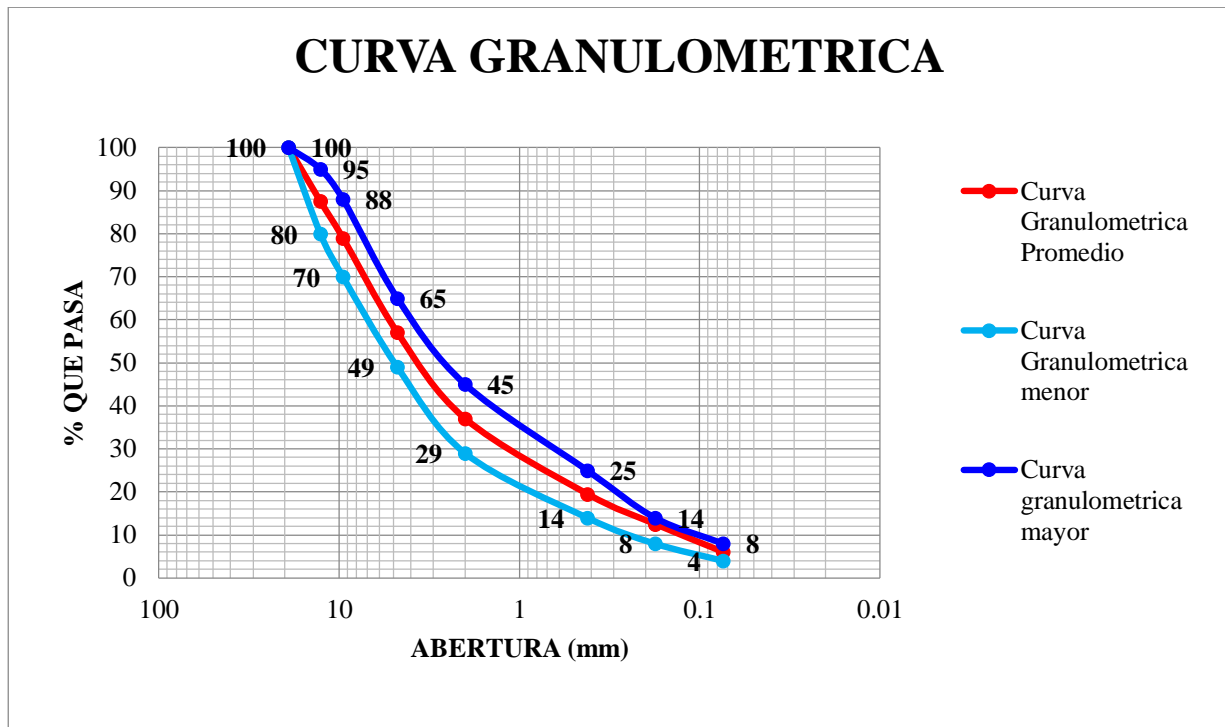
Tabla 15. Granulometría 6% de asfalto.

PORCENTAJE CEMENTO ASFALTICO		6,00%		
PESO AGREGADO BRIQUETAS (gr)		1200		
W TOTAL (gr)		1128		
(PESO AGREGADO)(% CEMENTO ASFALTICO)		72		
# Tamiz	W Pasa (%)	Promedio (%)	W retenido (%)	W retenido (gr)
3/4"	100	100	0	0
1/2"	(80-95)	87,5	12,5	141
3/8"	(70-88)	79	8,5	95,88
N°4	(49-65)	57	22	248,16
N°10	(29-45)	37	20	225,6
N°40	(14-25)	19,5	17,5	197,4
N°80	(8-14)	12,5	7	78,96
N°200	(4-8)	6	6,5	73,32
Fondo	6		6	67,68

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica No. 1 se puede observar la curva de los valores mayores y menores del intervalo de porcentaje que pasa por cada tamiz, también se evidencia la curva granulométrica promedio.

Gráfica 1. Curva granulométrica de los agregados.



Fuente: Elaboración propia

7.1.1.2. Resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los ángeles.

Se tomaron 2500 gr de agregado retenido en el tamiz de 1/2 “y 3/4 “respectivamente. Una vez se terminó el ensayo se tamizó el material desgastado por el tamiz No. 12, se tomaron los pesos y se determinó el porcentaje de desgaste del agregado. El procedimiento para realizar este ensayo está regido por la norma INV E 218-13.

Tabla 16. Porcentaje de desgaste por medio de la máquina de los ángeles.

MASA INICIAL DE LA MUESTRA (gr)	MASA FINAL DE LA MUESTRA (gr)	PORCENTAJE DE DESGASTE (%)
5000	3811,6	23,8

Fuente: Elaboración propia

7.1.1.3. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.

En la tabla No. 17 se puede apreciar el porcentaje de caras fracturadas por cada serie de tamiz. El procedimiento para realizar este ensayo está regido por la norma INV E 227-13.

Tabla 17. Porcentaje de caras fracturadas.

NUMERO DE TAMIZ	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS (%)
3/4 "	54
1/2 "	60,4
3/8 "	48,44

Fuente: Elaboración propia

7.1.1.4. Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados.

En la tabla No. 18 se puede apreciar el porcentaje de muestra que se retiene en cada tamiz. Este ensayo se realizó bajo lo estipulado en la norma INV E 230-13.

Tabla 18. Índice de aplanamiento y alargamiento.

ENSAYO	TAMIZ			
	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"
INDICE DE APLANAMIENTO (%)	23	4	10	10
INDICE DE ALARGAMIENTO (%)	0	33	30	25

Fuente: Elaboración propia

7.1.2. Caracterización del cemento portland.

7.1.2.1. Densidad del cemento hidráulico.

Este ensayo se realizó bajo los parámetros establecidos en la norma INV E 307-13. En la tabla No. 19 se puede apreciar la densidad del cemento hidráulico.

Tabla 19. Densidad del cemento Portland.

DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRAULICO	2,86 gr/cm ³
--	-------------------------

Fuente: Elaboración propia

7.1.3. Caracterización del material bituminoso.

Fue de mucha importancia conocer las propiedades y características que tienen los materiales bituminosos, debido a esto se realizaron los siguientes ensayos:

- Penetración a los materiales bituminosos INV E 706-13.
- Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) INV E 712-13.

- Método de ensayo para medir la recuperación elástica de materiales asfálticos utilizando ductilímetro INV E 702-13.
- Punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland INV E 709-13.
- Peso específico.

En la tabla No. 20 se pueden observar los resultados de la ejecución de todos los ensayos mencionados anteriormente.

Tabla 20. Resultados caracterización del material bituminoso.

ENSAYO	RESULTADOS	
PENETRACION PROMEDIO DE MATERIAL BITUMINOSO (mm)	47	
PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)	1° LECTURA 40	2° LECTURA 41
DUCTILIDAD (cm)	109.2	
PUNTO DE INFLAMACION Y COMBUSTION (°C)	TEMPERATURA CHISPA 300	TEMPERATURA LLAMA 305
PESO ESPECIFICO (gr/cm³)	1,03	

Fuente: Elaboración propia

7.1.4. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas empleando el equipo Marshall.

En la tabla No. 21 se puede apreciar todos los resultados en general de los ensayos de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas, gravedad específica Bulk, gravedad específica máxima y porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas.

Tabla 21. Tabla general de resultados

% ASFALTO	Volumen	PESO ESPECIFICO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD		FLUJO (pulg)	G. Bulk (Gmb)	GRAVEDAD ESPECIFICA MAXIMA (Gmm)	%		
			Medida	Corregida				DE VACIOS DE MEZCLA ASFALTICA		
4	517,8	2,279	3549,73	3549,73	0,188	2,30	A	1178	Gmb	2,26
4	531,1	2,220	2789,88	2678,28	0,197	2,24	D	19720	Gmm	1,97
4	520,3	2,251	2686,47	2686,47	0,173	2,25	E	20300		
PROMEDIO	523,1	2,250	3008,7	2971,5	0,186	2,26	Gmm	1,97	%	14,9
4,5	516,2	2,294	3324,9	3324,9	0,197	2,33	A	1172	Gmb	2,33
4,5	519,8	2,283	3758,8	3758,8	0,182	2,33	D	19720	Gmm	2,29
4,5	523,0	2,270	3140,6	3015,0	0,189	2,32	E	20380		
PROMEDIO	519,7	2,282	3408,1	3366,2	0,189	2,33	Gmm	2,29	%	1,6
5	496,7	2,378	3012,4	3132,9	0,190	2,33	A	1171	Gmb	2,35
5	506,3	2,337	4017,3	4178,0	0,221	2,37	D	19720	Gmm	2,29
5	508,1	2,352	3430,6	3567,8	0,177	2,36	E	20380		
PROMEDIO	503,7	2,356	3486,8	3626,3	0,196	2,35	Gmm	2,29	%	2,7
5,5	511,1	2,326	3927,4	3927,4	0,206	2,37	A	1184	Gmb	2,38
5,5	516,4	2,298	3826,2	3826,2	0,227	2,38	D	19720	Gmm	2,26
5,5	511,5	2,317	3531,7	3531,7	0,174	2,38	E	20380		
PROMEDIO	513,0	2,314	3761,8	3761,8	0,202	2,38	Gmm	2,26	%	5,1
6	517,8	2,279	3057,4	3057,4	0,205	2,38	A	1184	Gmb	2,38
6	516,4	2,295	3219,3	3219,3	0,197	2,37	D	19720	Gmm	2,22
6	516,2	2,303	3025,9	3025,9	0,214	2,38	E	20370		
PROMEDIO	516,8	2,292	3100,9	3100,9	0,205	2,38	Gmm	2,22	%	7,2

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto (4%, 4,5%, 5%, 5,5% y 6%) con el fin de determinar el porcentaje óptimo de asfalto en las briquetas convencionales.

Los resultados de los ensayos de estabilidad y flujo se pueden apreciar en la tabla No. 22, donde se pueden ver las variaciones en cada porcentaje de asfalto.

Tabla 22. Resultados de estabilidad y flujo promedio de cada porcentaje de asfalto.

% ASFALTO	ESTABILIDAD (Lb)	FLUJO (pulgadas)
4	2971,5	0,186
4,5	3366,2	0,189
5	3626,3	0,196
5,5	3761,8	0,202
6	3100,9	0,205

Fuente: Elaboración propia

7.1.5. Gravedad específica Bulk

Se tomaron los pesos con una balanza de las briquetas en el aire, sumergidos en agua y superficialmente seco (SSS) para luego determinar la gravedad específica Bulk. Este ensayo se realizó mediante la norma INV E 733-13.

Tabla 23. Gravedad específica BULK.

% ASFALTO	GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (Gmb)
4	2,26
4,5	2,33
5	2,35
5,5	2,38
6	2,38

Fuente: Elaboración propia

7.1.6. Gravedad específica máxima (Gmm)

En la tabla No. 24 se puede evidenciar los valores de gravedad específica máxima (Gmm) por cada porcentaje de asfalto.

Tabla 24. Gravedad específica máxima (Gmm).

% ASFALTO	GRAVEDAD ESPECIFICA MAXIMA (Gmm)(kg)
4	1,97
4,5	2,29
5	2,29
5,5	2,26
6	2,22

Fuente: Elaboración propia

7.1.7. Porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas.

Este ensayo se realizó siguiendo lo estipulado en la norma INV E 736-13.

Tabla 25. Porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas.

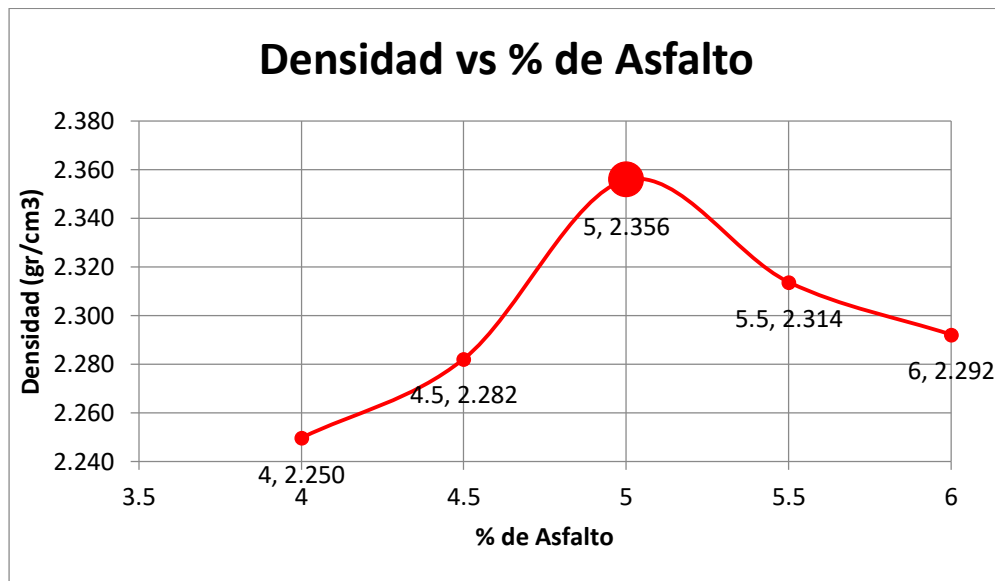
% ASFALTO	PORCENTAJE DE VACIOS DE LA MEZCLA ASFALTICA (%)
4	14,9
4,5	1,6
5	2,7
5,5	5,1
6	7,2

Fuente: Elaboración propia

Una vez se obtuvieron todos estos resultados se calculó el porcentaje de asfalto óptimo. El porcentaje óptimo de asfalto se determinó con las gráficas de densidad máxima vs porcentaje de asfalto, estabilidad máxima vs porcentaje de asfalto y valor medio del intervalo de porcentajes de vacíos con aire estipulado en la tabla 450-10 de la norma INVIAS año 2013.

En la gráfica No. 2 se puede apreciar que la densidad máxima se dio en las briquetas fabricadas con el 5% de asfalto.

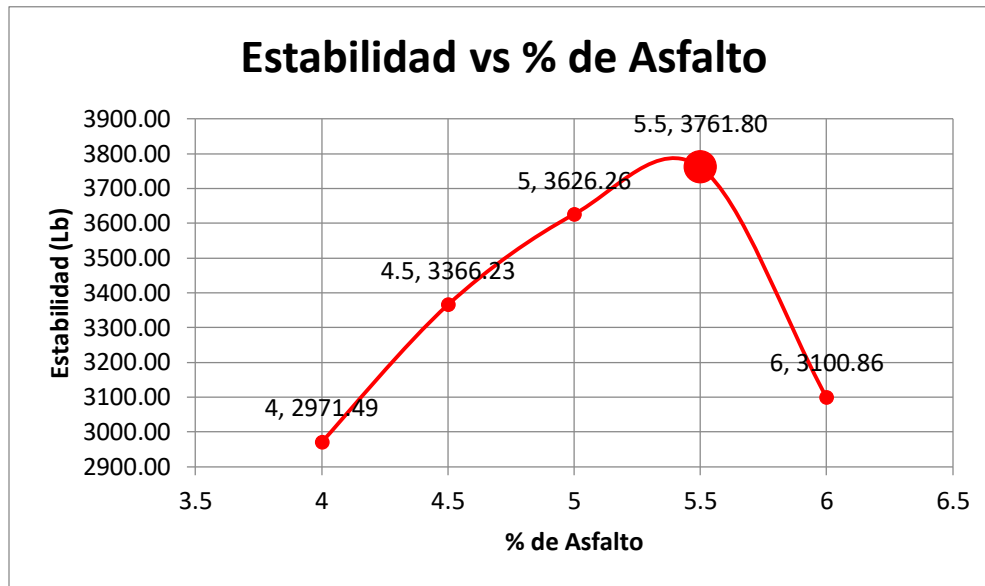
Grafica 2. Densidad máxima vs porcentaje de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 3 se puede evidenciar que la estabilidad máxima se dio en las briquetas fabricadas con el 5,5% de asfalto.

Grafica 3. Estabilidad máxima vs porcentaje de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

En la tabla No. 26 se puede apreciar el intervalo de porcentaje de vacíos estipulado por la norma INVIAS. Se tomó el intervalo de 3-8% de porcentaje de vacíos con aire de la mezcla asfáltica y se le sacó el promedio, lo cual dio un resultado de 5,5%.

Tabla 26. Tabla 450-10. Criterios para la mezcla preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.

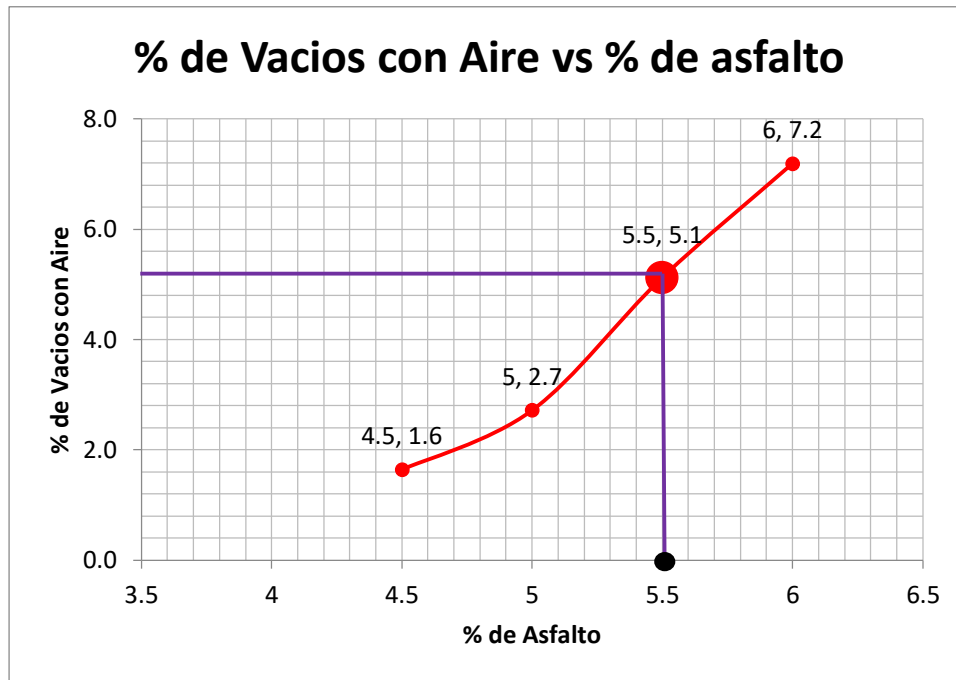
CARACTERISTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLAS DE ALTO MODULO
		CATEGORIA DE TRANSITO			
		NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		50	75 (112)	75 (112)	75
Estabilidad mínima (N)		5000	7500 (16875)	9000 (33750)	15000
Flujo (mm) (nota 2)	E-748 (E-800)(Nota 1)	2 a 4	2 a 4 (3 a 6)	2 a 3,5 (3,5 a 5,3)	2 a 3
Relación estabilidad/ Flujo (KN/mm)		2 a 4	3 a 5 (4,5 a 7,5)	3 a 6 (4,5 a 9)	
Rodadura		3 a 5	3 a 5	4 a 6	NA

Vacíos con aire (Va), % (Nota 3)	Intermedia Base	E-736 o E- 799	4 a 8 NA	4 a 7 5 a 8	4 a 7 5 a 8	4 a 6 4 a 6
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Max. 38 mm	E-799		13,0		
	T. Max. 25 mm			14,0		14,0
	T. Max. 19 mm			15,0		
	T. Max. 10 mm			16,0		
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %		E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75
Relación llenante / Ligante, valor máximo		E-799		0,8 a 1,2		1,2 a 1,4
Concentración de llenante, valor máximo		E-745			Valor crítico	
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Balley					Reportar	
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo μm		E-741			7,5	

Fuente: Elaboración propia

Una vez se halló el promedio del intervalo del porcentaje de vacíos con aire de una mezcla asfáltica (5,5%) se procedió a ingresar este valor a la gráfica No. 4 para hallar el porcentaje de asfalto y así poder determinar el porcentaje óptimo de asfalto.

Grafica 4. Porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de asfalto de la máxima densidad fue de 5%, el porcentaje de asfalto de la estabilidad máxima fue de 5,5% y el porcentaje de asfalto del porcentaje de vacíos con aire fue del 5,5%. Sacando el promedio de estos tres porcentajes de asfalto dio como resultado 5,33% el cual se aproximó a 5,5% y se estipuló como el porcentaje óptimo de asfalto.

Una vez determinado el porcentaje óptimo de asfalto se procedió a fabricar las briquetas modificadas con cemento Portland.

7.2. Briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con cemento portland.

En la tabla No. 27 se puede apreciar todos los resultados en general de los ensayos de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas, gravedad específica Bulk, gravedad específica máxima y porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas.

Tabla 27. Tabla general de resultados.

% CEMENTO PORTLAND	Volumen	PESO ESPECIFICO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (lb)		FLUJO (pulg)	G. BULK (Gmb)	GRAVEDAD ESPECIFICA MAXIMA (Gmm)		% DE VACIOS DE MEZCLA ASFALTICA	
			Medida	Corregida						
0	499,1	2,369	3574,46	3717,44	0,168	2,34	A	1182	Gmb	2,35
0	501,5	2,360	4066,79	4229,47	0,157	2,35	D	19720	Gmm	2,18
0	505,0	2,356	3907,18	4063,47	0,261	2,38	E	20360		
PROMEDIO	501,9	2,362	3849,5	4003,5	0,195	2,35	Gmm	2,18	%	7,94
25	502,5	2,353	3394,6	3530,4	0,229	2,36	A	1183	Gmb	2,37
25	507,7	2,358	3740,8	3890,5	0,154	2,37	D	19720	Gmm	2,22
25	502,7	2,368	4206,2	4374,4	0,221	2,39	E	20370		
PROMEDIO	504,3	2,360	3780,5	3931,8	0,201	2,37	Gmm	2,22	%	6,97
50	497,5	2,381	3320,4	3453,2	0,232	2,39	A	1193	Gmb	2,39
50	504,1	2,337	3700,4	3848,4	0,238	2,38	D	19720	Gmm	2,20
50	507,4	2,361	3657,6	3803,9	0,156	2,39	E	20370		
PROMEDIO	503,0	2,360	3559,5	3701,9	0,209	2,39	Gmm	2,20	%	8,71
75	497,0	2,379	3324,9	3457,9	0,182	2,38	A	1196	Gmb	2,39
75	501,7	2,355	3286,7	3418,2	0,148	2,39	D	19720	Gmm	2,19
75	509,8	2,355	3163,1	3163,1	0,162	2,41	E	20370		
PROMEDIO	502,8	2,363	3258,2	3346,4	0,164	2,39	Gmm	2,19	%	9,30
100	500,6	2,373	3516,0	3656,7	0,163	2,40	A	1181	Gmb	2,41
100	485,5	2,371	3421,6	3729,5	0,141	2,41	D	19720	Gmm	2,22
100	516,4	2,284	3731,8	3731,8	0,184	2,41	E	20370		
PROMEDIO	500,8	2,342	3556,5	3706,0	0,163	2,41	Gmm	2,22	%	8,14

Fuente: Elaboración propia

7.2.1. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas empleando el equipo Marshall.

Los resultados de los ensayos de estabilidad y flujo se pueden apreciar en la tabla No. 28, donde se pueden ver las variaciones en cada porcentaje de cemento portland.

Tabla 28. Resultados de estabilidad y flujo promedio de cada porcentaje de asfalto.

% CEMENTO PORTLAND	ESTABILIDAD (Lb)	FLUJO (pulgadas)
0	4003,5	0,195
25	3931,8	0,201
50	3701,9	0,209
75	3346,4	0,164
100	3706,0	0,163

Fuente: Elaboración propia

7.2.2. Gravedad específica Bulk.

Tabla 29. Gravedad específica Bulk.

% CEMENTO PORTLAND	GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (Gmb)
0	2,35
25	2,37
50	2,39
75	2,39
100	2,41

Fuente: Elaboración propia

7.2.3. Gravedad específica máxima (Gmm)

Tabla 30. Gravedad específica máxima (Gmm).

% CEMENTO PORTLAND	GRAVEDAD ESPECIFICA MAXIMA (Gmm)
0	2,18
25	2,22
50	2,20
75	2,19
100	2,22

Fuente: Elaboración propia

7.2.4. Porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas.

Tabla 31. Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica.

% CEMENTO PORTLAND	PORCENTAJE DE VACIOS DE LA MEZCLA ASFALTICA (%)
0	7,9
25	7,0
50	8,7
75	9,3
100	8,1

Fuente: Elaboración propia

7.3. Módulos dinámicos.

7.3.1. Resultados compactador giratorio.

Tabla 32. Resultados densidad del compactador giratorio.

% CEMENTO PORTLAND	ALTURA (mm)	CICLOS	DENSIDAD (gr/cm³)
0	149,96	51	1,987
25	149,921	27	2,378
50	149,994	26	2,377
75	149,872	29	2,379
100	149,897	28	2,378

Fuente: Elaboración propia

7.3.2. Resultados equipo DTS-30.

Tabla 33. Resumen general resultados de ensayo de módulos dinámicos.

% DE CEMENTO PORTLAN D	FRECUENCIA [Hz] TEMPERATUR A [°C]	MÓDULO DINÁMICO [Mpa]					
		0,1	0,5	1	5	10	25
		0%	21,1°	1675	2934	3787	7006
	37,8°	669	957	1197	2141	2966	4130
	54,4°	378	406	431	584	647	878
25%	21,1°	1740	3039	3867	6593	8242	10975
	37,8°	664	1041	1283	2241	3104	5013
	54,4°	267	385	469	746	986	1531
50%	21,1°	1517	3045	4119	7788	9910	13646
	37,8°	598	989	1281	2459	3373	5191
	54,4°	203	271	315	459	594	938
75%	21,1°	1368	2456	3176	5547	6804	8510
	37,8°	593	931	1195	2264	3053	4590
	54,4°	246	355	432	709	943	1417
100%	21,1°	1674	2970	3774	6399	7992	10521
	37,8°	989	1722	2204	3875	4955	7047
	54,4°	398	674	892	1802	2561	3935

Fuente: Elaboración propia

8. ANALISIS DE RESULTADOS

8.1. Briquetas convencionales (determinación del porcentaje óptimo de asfalto).

A continuación se puede apreciar los datos y resultados obtenidos de los ensayos realizados, en donde se va a analizar la variación y el comportamiento de las briquetas convencionales.

8.1.1. Ensayo de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas empleando el equipo Marshall.

Tabla 34. Estabilidad vs porcentaje de asfalto.

% ASFALTO	ESTABILIDAD (Lb)
4	2971,5
4,5	3366,2
5	3626,3
5,5	3761,8
6	3100,9

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 5 se puede evidenciar que cada vez que se le fue aumentando el porcentaje de asfalto a las briquetas, estas fueron creciendo progresivamente en su estabilidad hasta cuando se le suministro el porcentaje óptimo de asfalto que fue del 5,5%. Luego de que la curva alcanzo su mayor estabilidad en el porcentaje óptimo de asfalto, la estabilidad empezó a disminuir considerablemente.

También se puede afirmar que la resistencia de las briquetas se incrementó de manera progresiva cada vez que se le aumento el porcentaje de asfalto y que la mayor capacidad a la resistencia de este diseño de probetas se dio en el porcentaje óptimo de asfalto.

Grafica 5. Comportamiento de la estabilidad vs porcentaje de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

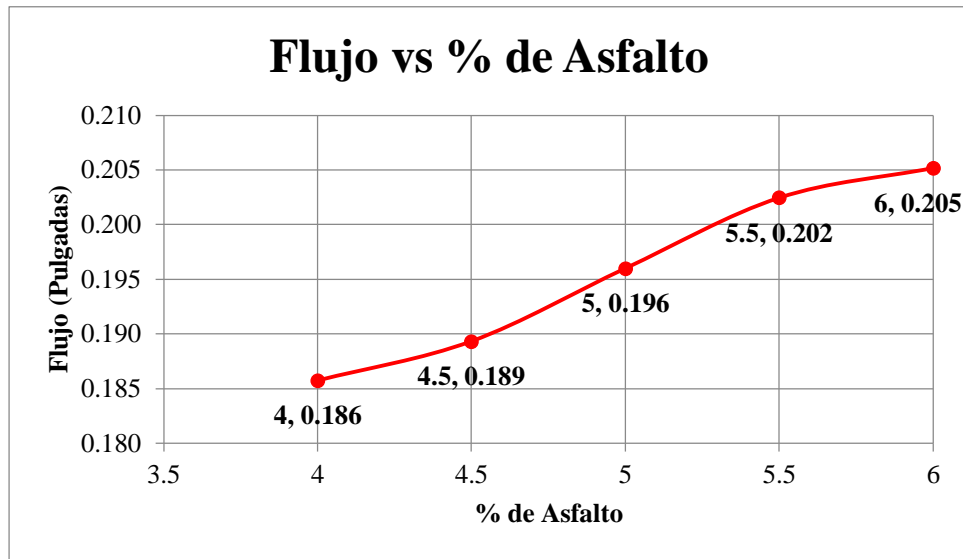
Tabla 35. Flujo vs porcentaje de asfalto.

% ASFALTO	FLUJO (pulgadas)
4	0,186
4,5	0,189
5	0,196
5,5	0,202
6	0,205

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 6 se puede observar que en las briquetas que se fabricaron con 6% de asfalto se dio el valor más alto de flujo. Cada vez que se le aumento el porcentaje de asfalto, el valor del flujo se incrementó de forma progresiva.

Grafica 6. Comportamiento del flujo vs porcentaje de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

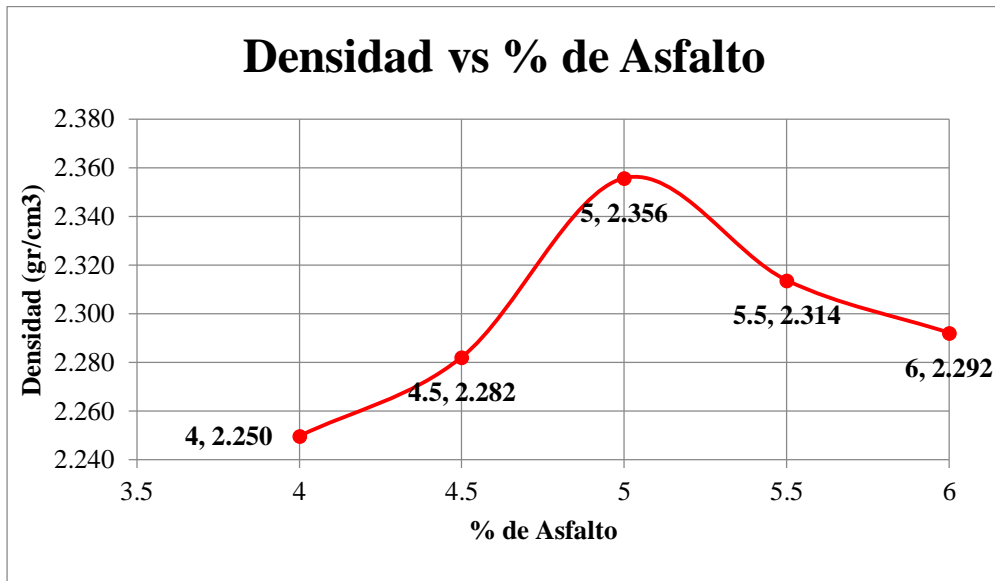
Tabla 36. Densidad vs porcentaje de asfalto.

% DE ASFALTO	DENSIDAD (gr/cm ³)
4	2,26
4,5	2,32
5	2,36
5,5	2,37
6	2,37

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 7 se puede apreciar que cada vez que se le aumento el porcentaje de asfalto a las briquetas la densidad creció gradualmente hasta llegar a su pico más alto que fue en el 5% de asfalto y luego tuvo la tendencia a disminuir.

Grafica 7. Comportamiento densidad vs porcentaje de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de asfalto.

% DE ASFALTO	% DE VACIOS CON AIRE
4	14,9
4,5	1,6
5	2,7
5,5	5,1
6	7,2

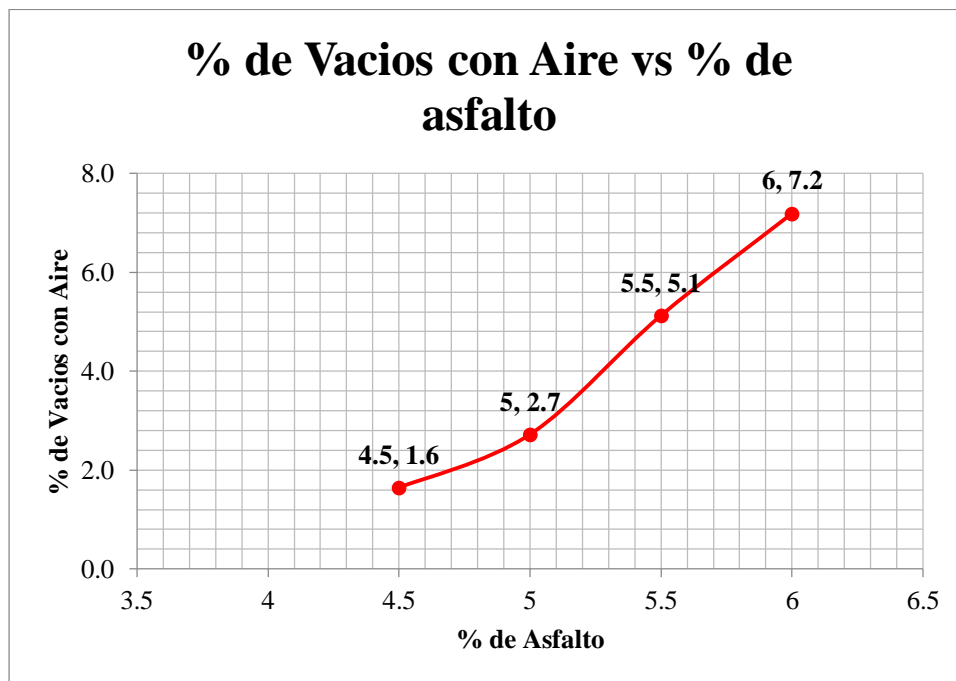
Fuente: Elaboración propia

En la tabla No. 37 se puede observar que las briquetas fabricadas con el 4% de asfalto, el valor del porcentaje de vacíos con aire es de 14,9 %, pero este valor esta fuera del rango promedio que nos exige la norma INVIAS 2013 en la tabla 450-10.

En la tabla 450-10 de la norma INVIAS 2013 se estipula que el rango promedio del porcentaje de vacíos con aire de las briquetas fabricadas debe estar entre el 3-8 % y como se puede apreciar en la tabla 31, el valor del porcentaje de vacíos con aire en el porcentaje de asfalto del 4% está por fuera de lo exige la norma, por lo tanto se optó por excluir este resultado y graficar los datos restantes.

En la gráfica No. 8 se puede evidenciar que en las briquetas fabricadas con el 6% de asfalto se encuentra el mayor porcentaje de vacíos con aire y que cada vez que se le incremento el porcentaje de asfalto a las probetas fabricadas, estas tuvieron el comportamiento de aumentar el porcentaje de vacíos gradualmente.

Grafica 8. Comportamiento del porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

8.2. Briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con cemento Portland.

8.2.1. Ensayo de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas empleando el equipo Marshall.

Tabla 38. Estabilidad vs porcentaje de cemento Portland.

% DE CEMENTO PORTLAND	ESTABILIDAD (Lb)
0	4003,5
25	3931,8
50	3701,9
75	3346,4
100	3706,0

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 9 se puede observar que el valor mayor de estabilidad se dio en las briquetas modificadas con el 0% de cemento Portland y cada vez que se le incremento el porcentaje de cemento Portland la estabilidad disminuyo progresivamente, para luego tener un leve crecimiento en las briquetas modificadas con el 100% de cemento Portland.

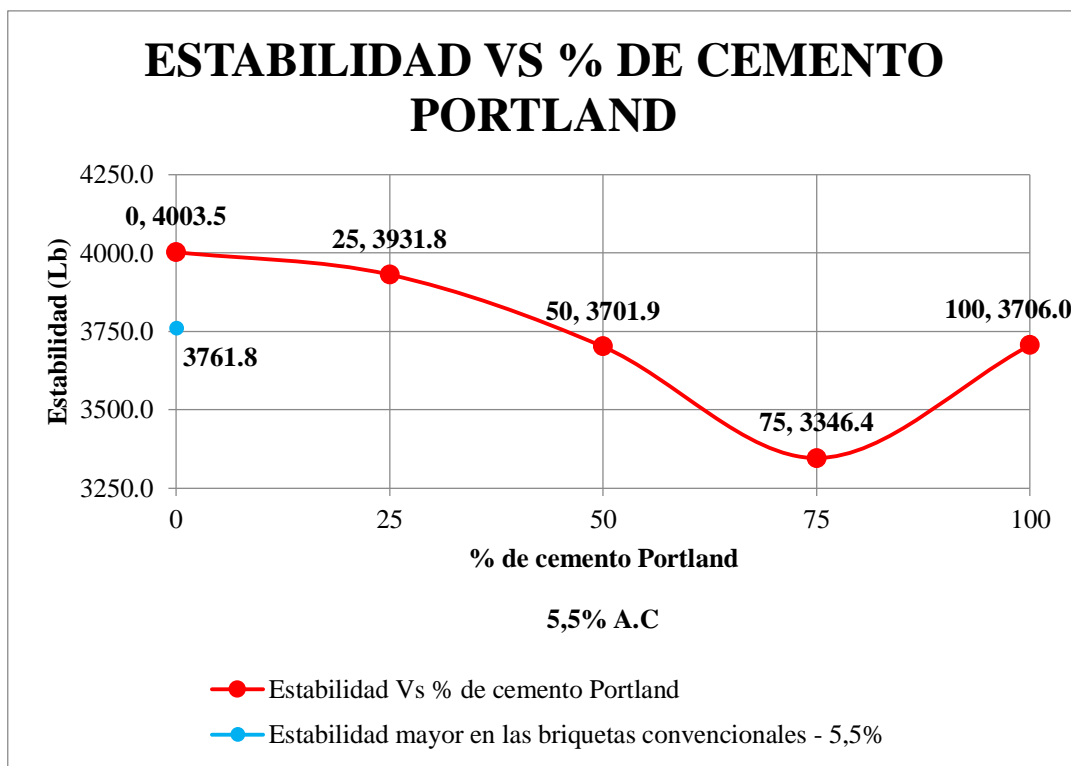
También se puede apreciar que la resistencia de las briquetas modificadas con cemento Portland, disminuyo gradualmente cada vez que se le aumento el porcentaje de cemento.

Se puede deducir que las briquetas modificadas con cemento portland no tienden a mostrar una mejoría en su capacidad de resistencia comparadas con las briquetas convencionales ya que las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto (5,5%) y modificadas con el 0% de cemento Portland, que por sus características son iguales a las briquetas convencionales, son las que tienen la mayor capacidad de resistencia y las briquetas modificadas con el 25,50 y 75% de

cemento Portland tienden a disminuir gradualmente y evidenciar que no hay mejoría en la estabilidad.

Se puede decir que la estabilidad de las briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con el 0% de cemento Portland es mayor a las briquetas convencionales fabricadas con el 5,5% de asfalto.

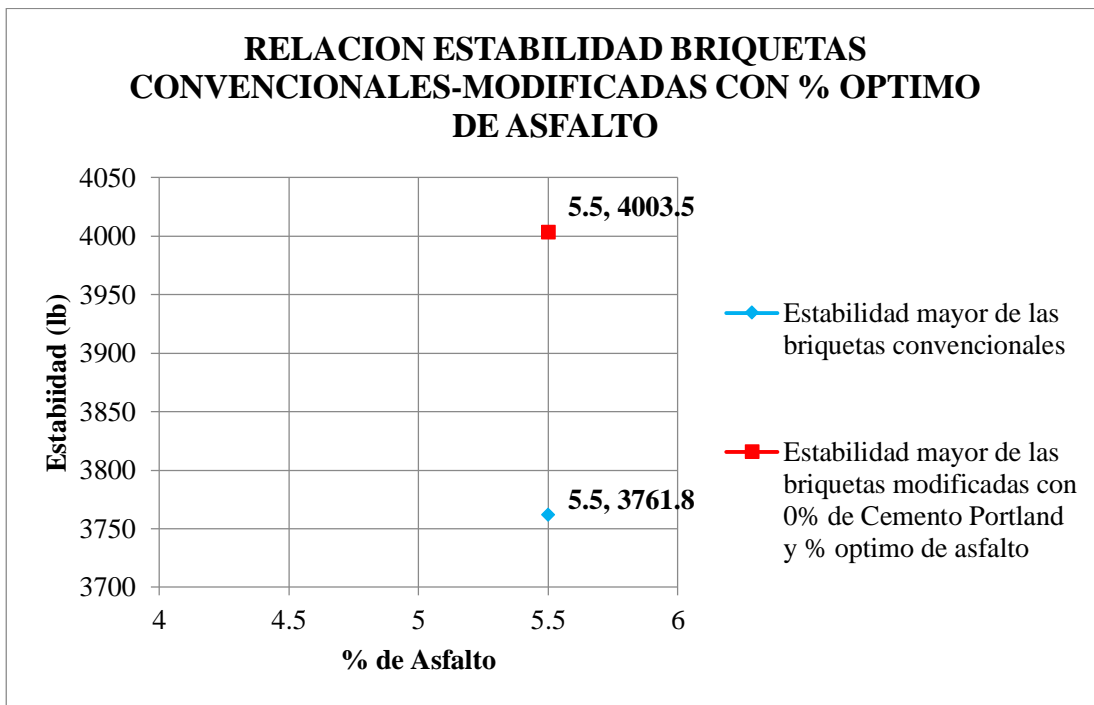
Grafica 9. Comportamiento de la estabilidad vs porcentaje de cemento Portland.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 10 podemos ver que las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con el 0% de cemento Portland tienen una mayor capacidad de resistencia que las probetas convencionales que fueron fabricadas con el 5,5 % de asfalto.

Grafica 10. Comportamiento de la relación de estabilidad de las briquetas convencionales-modificadas con cemento Portland y con él % óptimo de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Flujo vs porcentaje de cemento portland.

% DE CEMENTO PORTLAND	FLUJO (Lb)
0	0,195
25	0,201
50	0,209
75	0,164
100	0,163

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 11 se puede apreciar que el mayor valor de flujo se dio en las briquetas modificadas con el 50 % de cemento Portland.

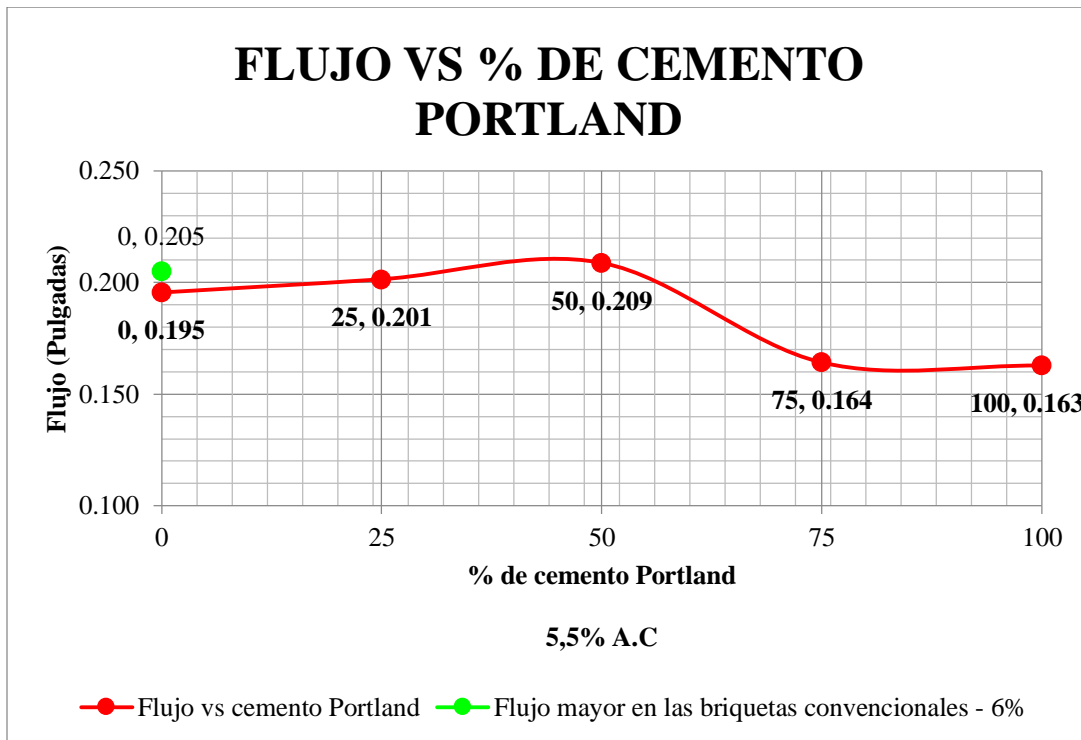
El flujo fue incrementándose a medida que se aumentó el porcentaje de cemento Portland, el incremento del flujo se dio hasta las briquetas modificadas con el 50% de cemento Portland. Luego, el valor del flujo empezó a disminuir considerablemente.

Se puede evidenciar que el flujo en las briquetas convencionales con un porcentaje de asfalto del 6% es mayor que el de las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con el 0% de cemento Portland. Pero, el flujo de las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con el 50% de cemento Portland es mayor al flujo de las briquetas convencionales fabricadas con el 6% de asfalto.

De lo anterior, se puede decir que las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con el 50% de cemento Portland, son las que tienden a presentar mayor deformación y las briquetas fabricadas con el 75 y 100% de cemento Portland son las que tienen el valor más bajo de deformación.

Finalmente, podemos afirmar que cuando se incrementa el porcentaje asfalto a las briquetas estas tienden a tener mayor capacidad para deformarse.

Grafica 11. Comportamiento del flujo vs porcentaje de cemento Portland.

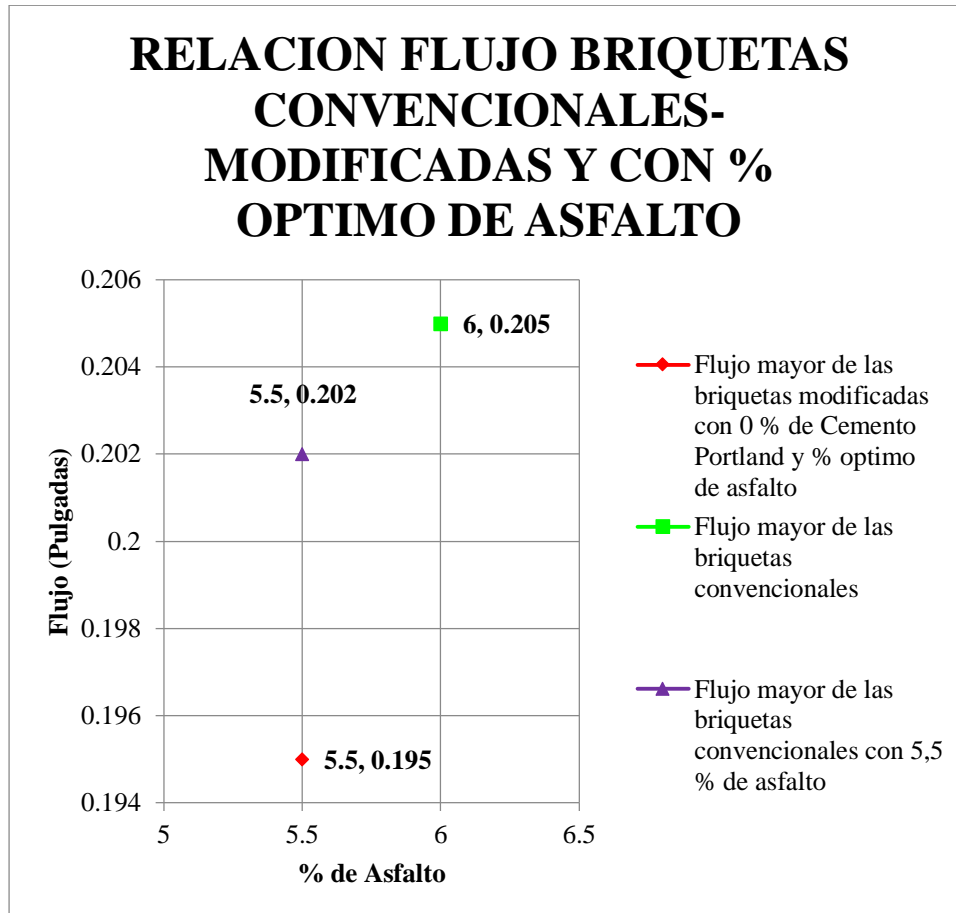


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 12 se puede observar que las briquetas convencionales fabricadas con un porcentaje de asfalto del 6% son las que tienden a deformarse más respecto a las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con el 0% de cemento Portland.

También podemos ver que las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto y modificadas con el 0% de cemento portland se deforman menos que las briquetas convencionales fabricadas con el 5,5% de asfalto.

Grafica 12. Comportamiento de la relación del flujo de briquetas convencionales-modificadas con cemento Portland y con él % óptimo de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

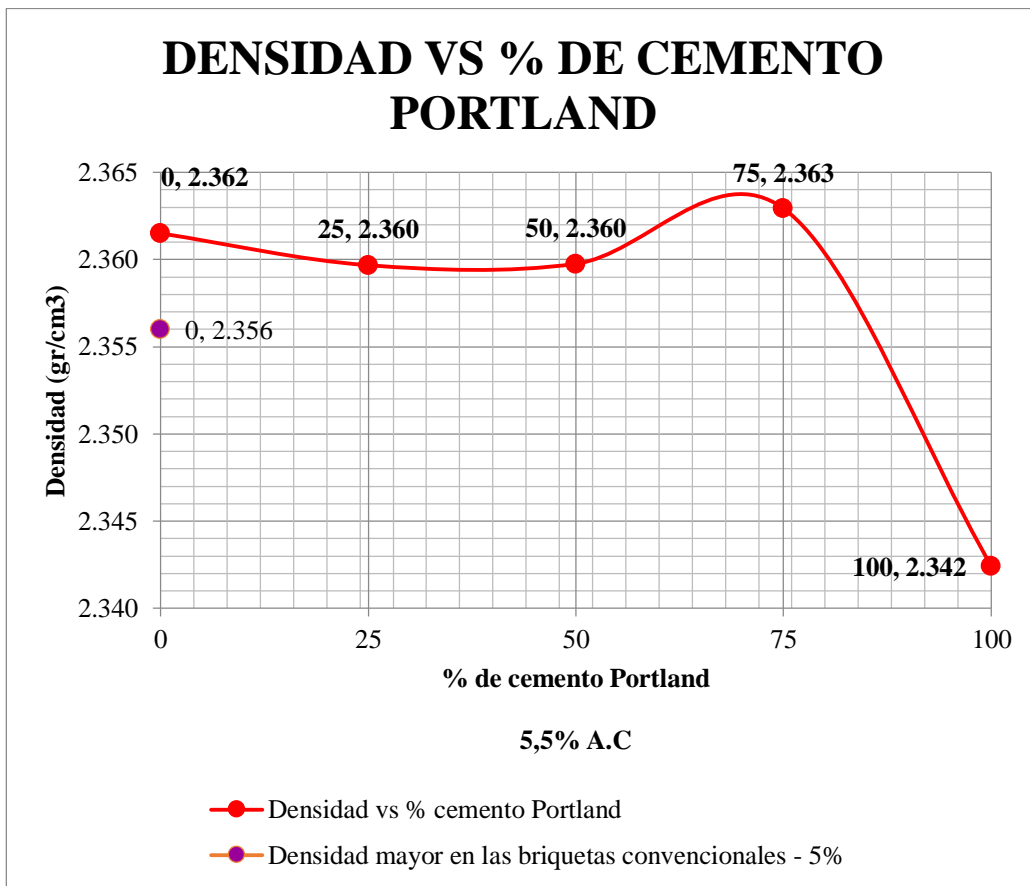
Tabla 40. Densidad vs porcentaje de cemento Portland.

% DE CEMENTO PORTLAND	DENSIDAD (gr/cm³)
0	2,362
25	2,360
50	2,360
75	2,363
100	2,342

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No.13 se evidencia que el mayor valor de densidad se dio en las briquetas fabricadas con el 75% de cemento Portland. La grafica muestra una variación en la densidad por cada porcentaje de cemento Portland. Cuando se aumentó el porcentaje de cemento Portland a 25% la densidad disminuyo respecto a las fabricadas con el 0% de cemento. Luego, la densidad se mantuvo estable con el aumento de un 25% más de cemento Portland. Seguidamente se incrementó el porcentaje de cemento a un 75% y se llegó al pico más alto de densidad.

Grafica 13. Comportamiento densidad vs porcentaje de cemento Portland.

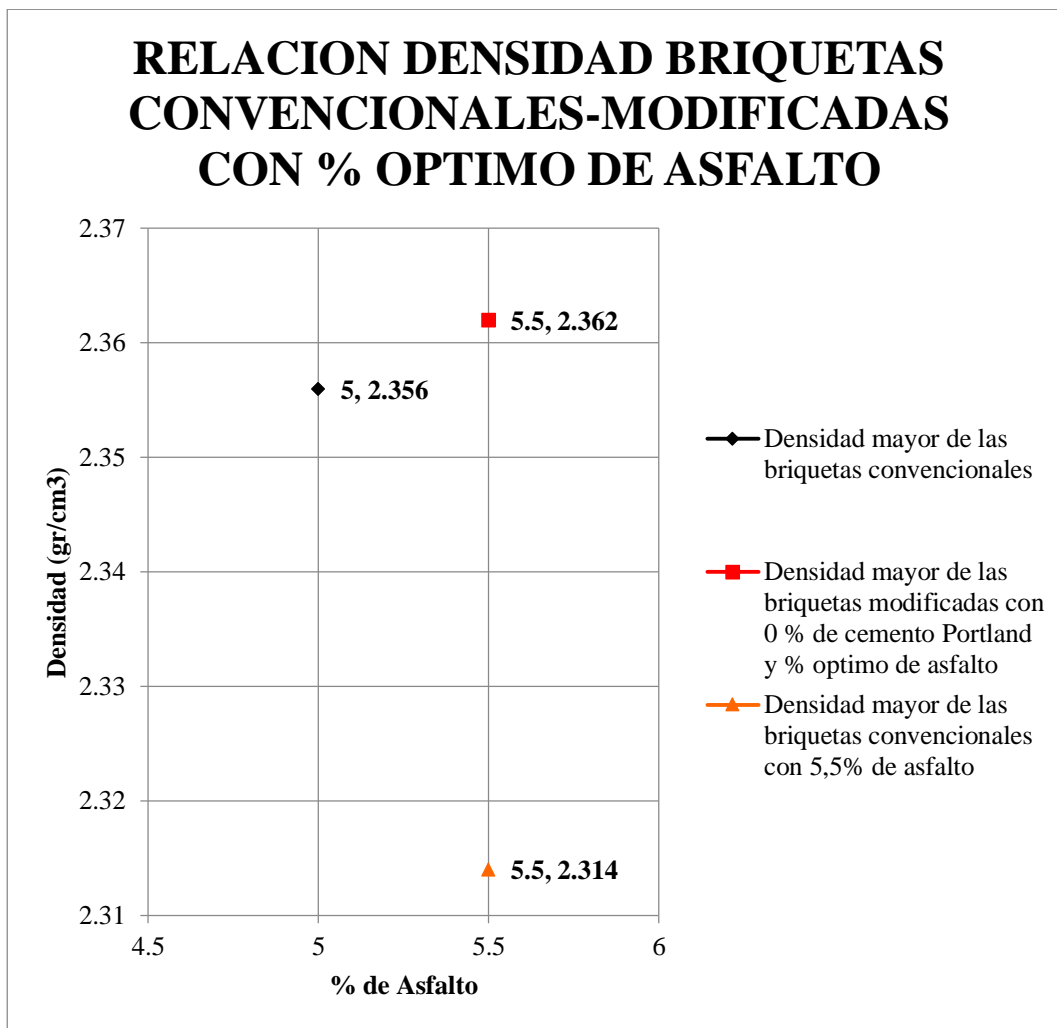


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 14 se puede apreciar que las briquetas modificadas con el 0% de cemento Portland y con porcentaje óptimo de asfalto de 5,5 % tienen la mayor densidad respecto a las probetas convencionales con 5% de asfalto.

También podemos decir que las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto de 5,5% y modificadas con el 0% de cemento Portland tienen una densidad más elevada que las briquetas convencionales fabricadas con 5,5% de asfalto.

Grafica 14. Comportamiento de la relación de la densidad de las briquetas convencionales-modificadas con cemento Portland y con él % óptimo de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de cemento Portland.

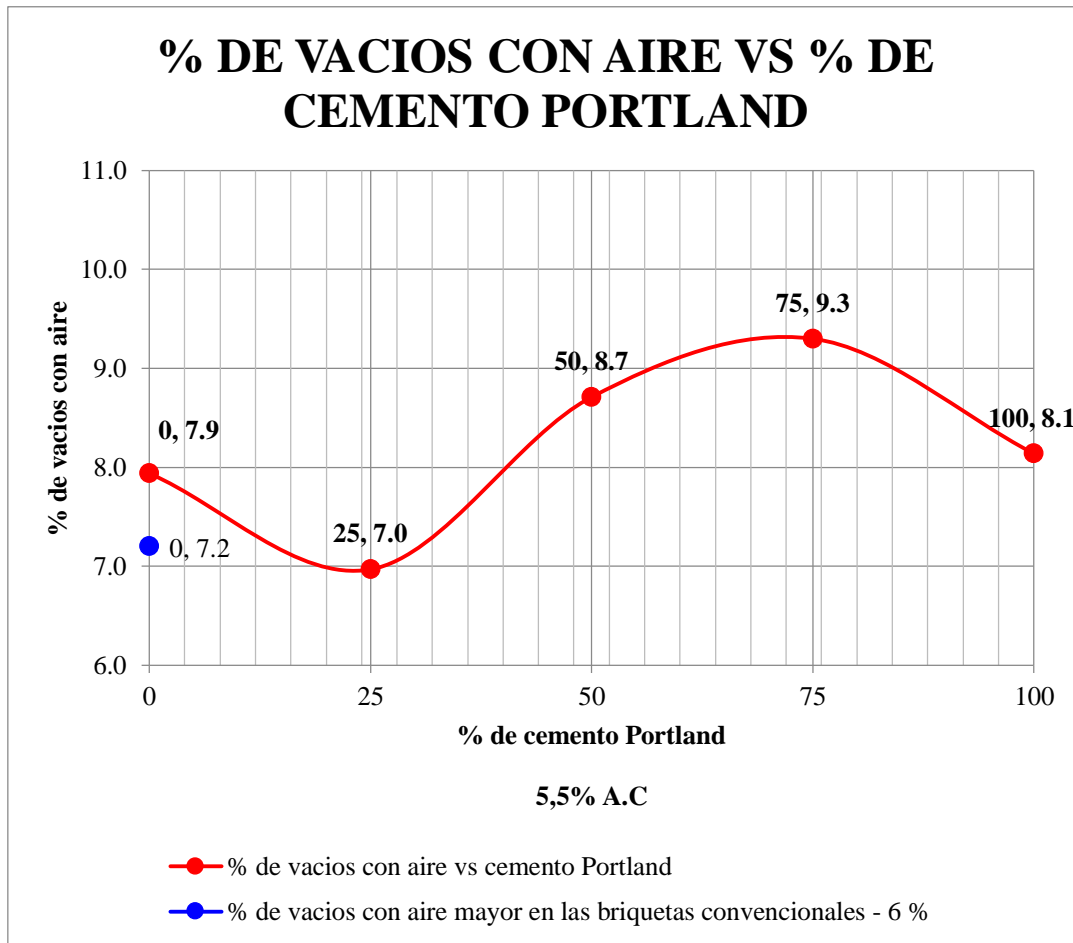
% DE CEMENTO PORTLAND	% DE VACIOS CON AIRE
0	7,9
25	7,0
50	8,7
75	9,3
100	8,1

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 15 se puede apreciar que las briquetas modificadas con el 75% de cemento Portland son las que alcanzaron el valor más alto del porcentaje de vacíos con aire.

Las probetas con el porcentaje óptimo de asfalto de 5,5% y modificadas con el 0% de cemento Portland son las que tienen mayor porcentaje de vacíos con aire respecto a las probetas convencionales que fueron fabricadas con un porcentaje de 6% de asfalto. Lo que quiere decir que el porcentaje de vacíos con aire de las mezclas asfálticas no aumenta, si se incrementa el porcentaje de asfalto.

Grafica 15. Comportamiento porcentaje de vacíos con aire vs porcentaje de cemento portland.

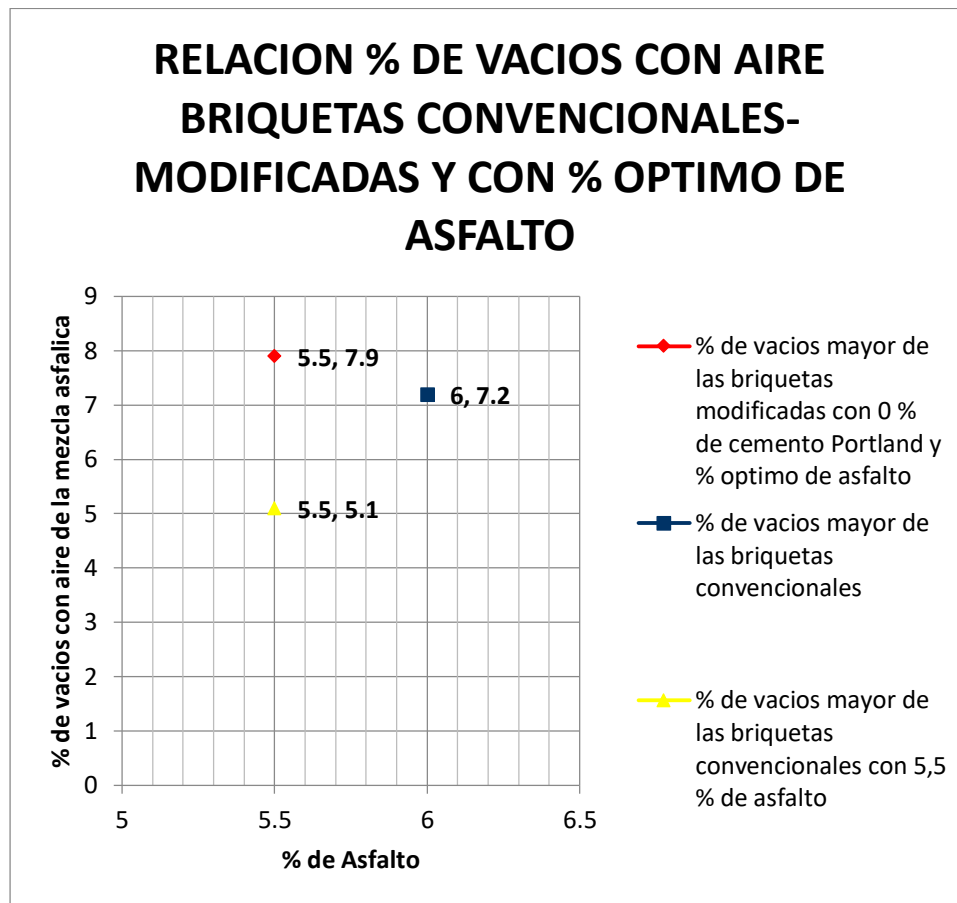


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica No. 16 podemos evidenciar que las briquetas convencionales con un porcentaje de asfalto de 6%, superior a las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto de 5,5% y modificadas con el 0% de cemento Portland, presentan un porcentaje de vacíos con aire inferior, lo que quiere decir que a menor porcentaje de asfalto, mayor porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica.

También podemos decir que las probetas con el porcentaje óptimo de asfalto de 5,5% y modificadas con el 0% de cemento Portland tienen mayor porcentaje de vacíos con aire respecto a las briquetas convencionales que fueron hechas con el 5,5 % de asfalto.

Grafica 16. Comportamiento de la relación de la densidad de las briquetas convencionales-modificadas con cemento Portland y con él % óptimo de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

8.3. Módulos dinámicos.

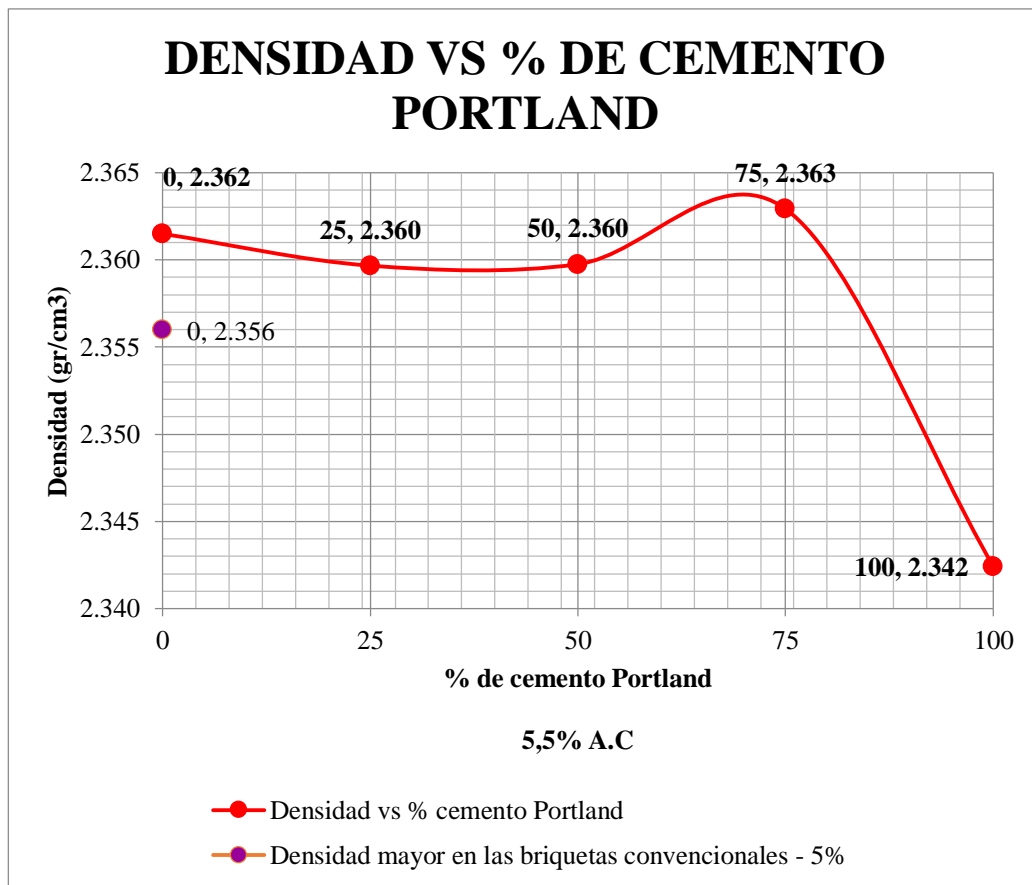
8.3.1. Compactador giratorio.

En la gráfica No. 17 se puede observar que las briquetas convencionales modificadas con el 0% de cemento Portland tuvieron un valor bajo de densidad comparado con el resto de porcentajes. También, se puede evidenciar que las briquetas modificadas con el 25% de asfalto tuvieron un crecimiento muy elevado de densidad respecto a las briquetas modificadas con el 0% de cemento. Luego, las briquetas modificadas con el 50, 75 y 100% de cemento Portland tuvieron

una tendencia a disminuir y a aumentar en su valor de densidad, en donde las briquetas modificadas con el 75% de cemento Portland fueron las que tuvieron el valor más elevado de densidad.

Cuando se aumenta el porcentaje de cemento Portland a las briquetas, la densidad empieza a aumentar para luego estabilizarse y mostrar tendencia a aumentar y disminuir significativamente.

Grafica 17. Comportamiento de la densidad vs porcentaje de cemento Portland en el compactador giratorio.



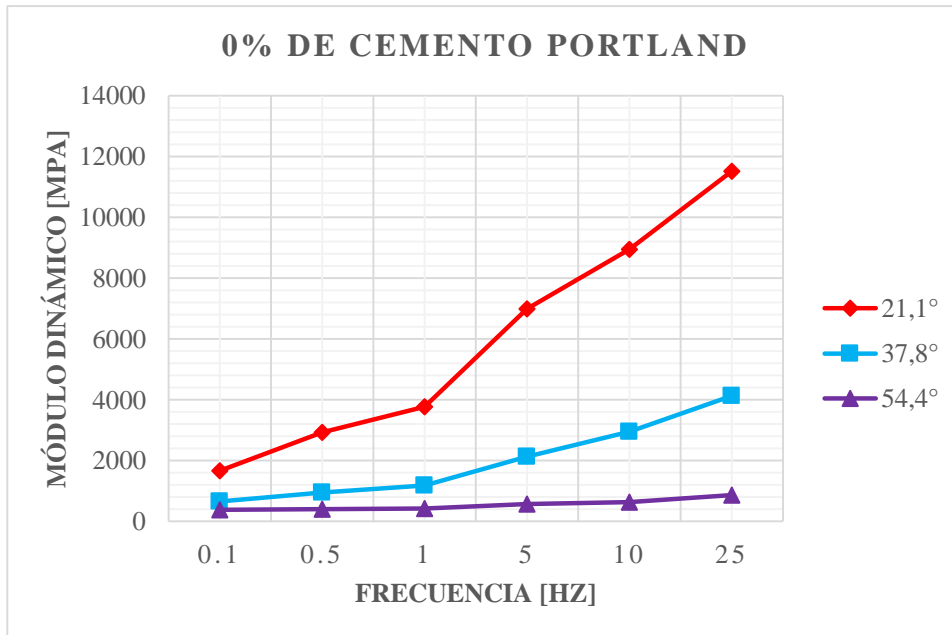
Fuente: Elaboración propia

8.3.2. Equipo DTS-30.

En la gráfica No. 18 se puede observar que el valor más alto de módulo dinámico se dio a una frecuencia de 25 Hz con una temperatura de 21,1°C y el valor más bajo de módulo dinámico se dio a una frecuencia de 0,1 Hz con una temperatura de 54,4°C.

Al aumentar la frecuencia el valor de los módulos dinámicos se incrementa considerablemente. También, a menor temperatura los valores de módulos dinámicos se elevan progresivamente.

Grafica 18. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 0% de cemento Portland.

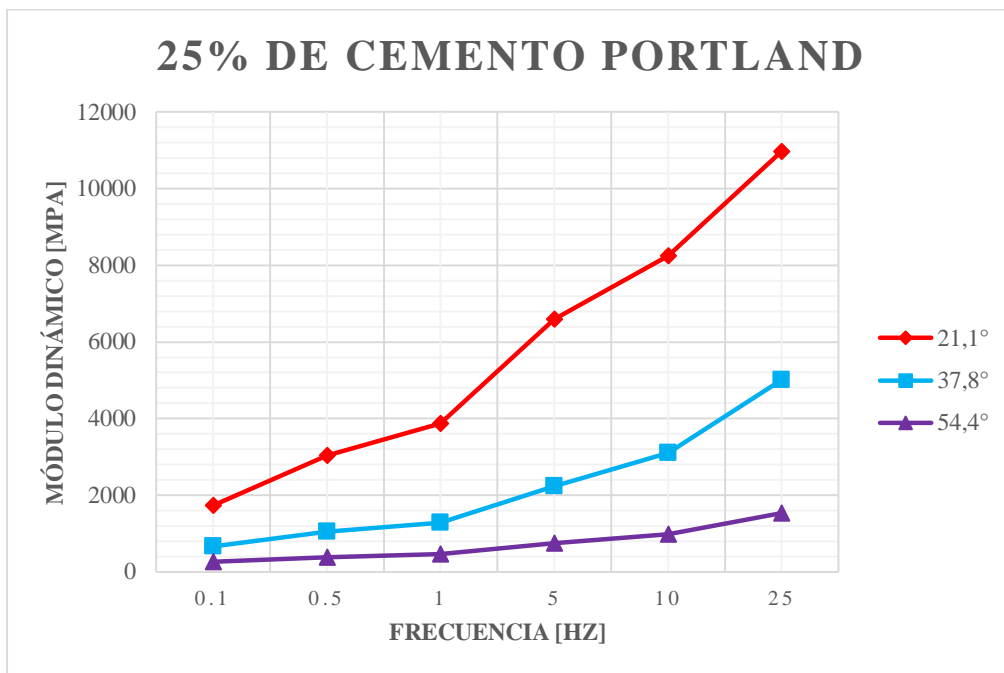


Fuente: Elaboración propia

En las gráficas No. 19, 20, 21 y 22 se puede observar que el comportamiento de los módulos dinámicos vs frecuencia es igual a la gráfica anterior. Por la tanto, se puede observar que el valor más alto de módulo dinámico se dio a una frecuencia de 25 Hz con una temperatura de 21,1°C y el valor más bajo de módulo dinámico se dio a una frecuencia de 0,1 Hz con una temperatura de 54,4°C.

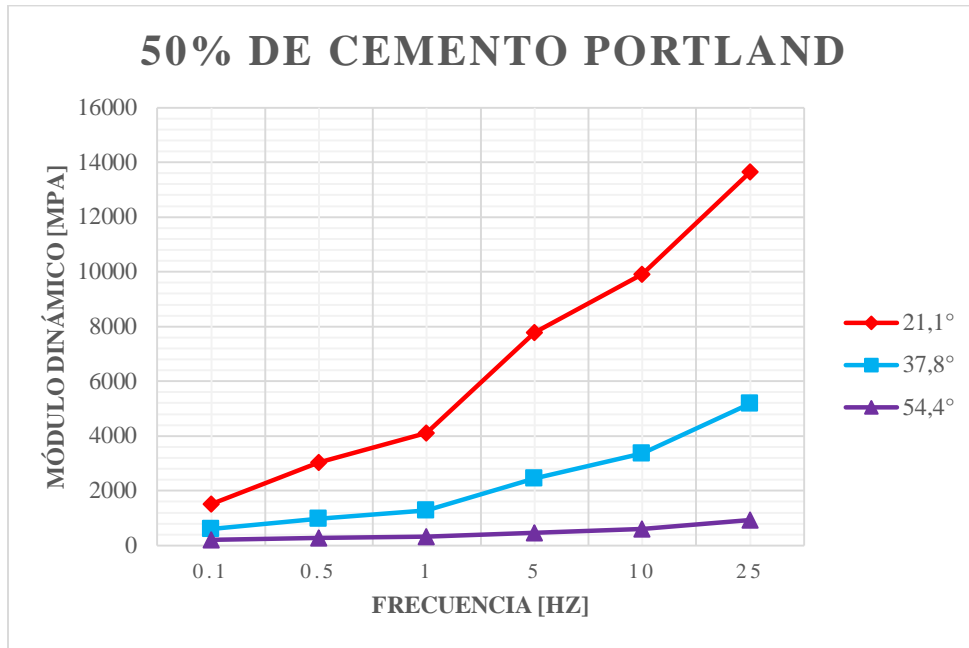
Al aumentar la frecuencia el valor de los módulos dinámicos se incrementa considerablemente. También, a menor temperatura los valores de módulos dinámicos se elevan más si los comparamos con las otras temperaturas de 37,8 y 54,4°C..

Grafica 19. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 25% de cemento Portland.



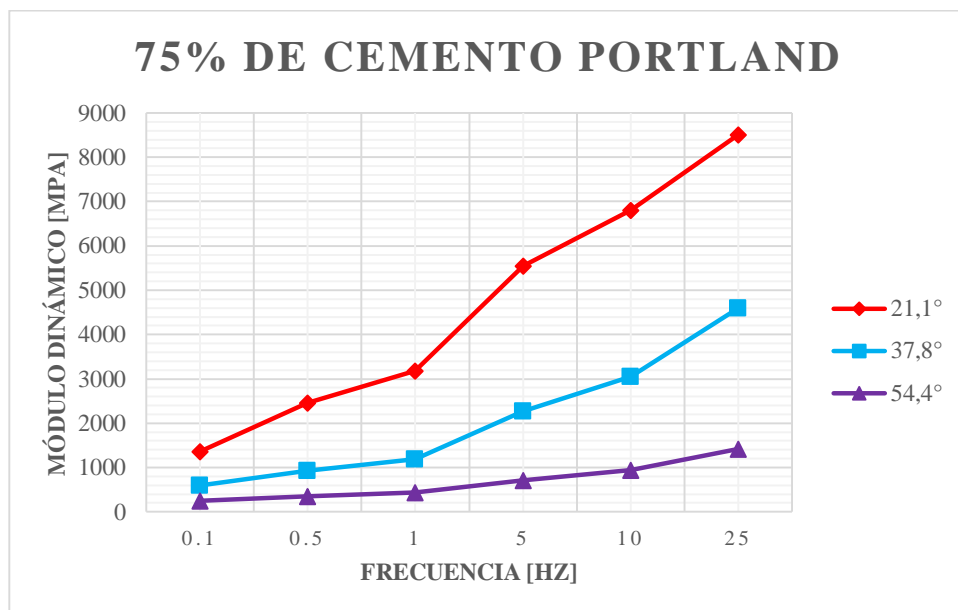
Fuente: Elaboración propia

Grafica 20. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 50% de cemento Portland.



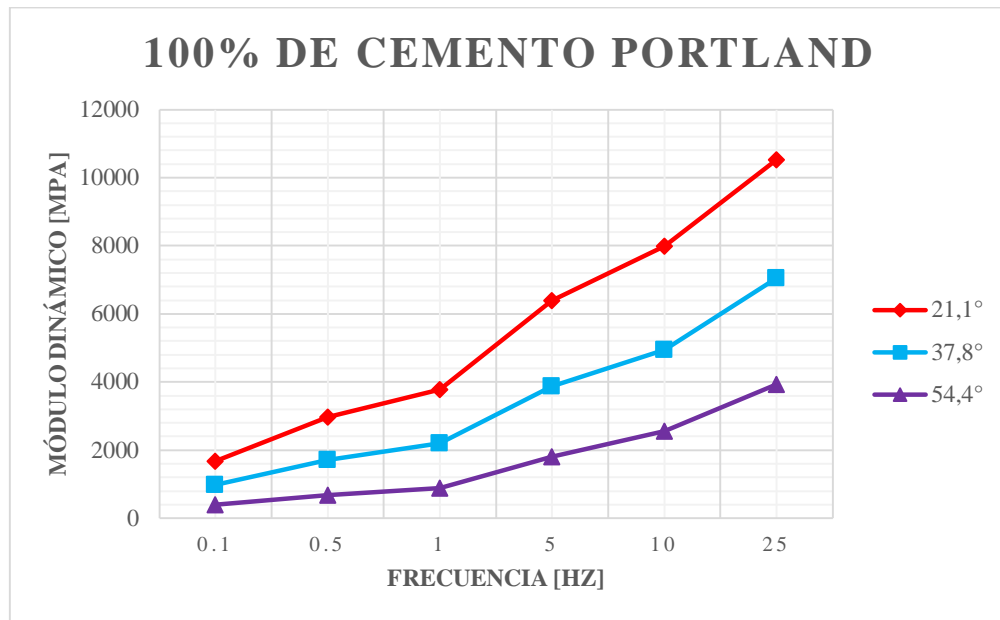
Fuente: Elaboración propia

Grafica 21. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 75% de cemento Portland.



Fuente: Elaboración propia.

Grafica 22. Comportamiento módulo dinámico vs frecuencia con 100% de cemento Portland.

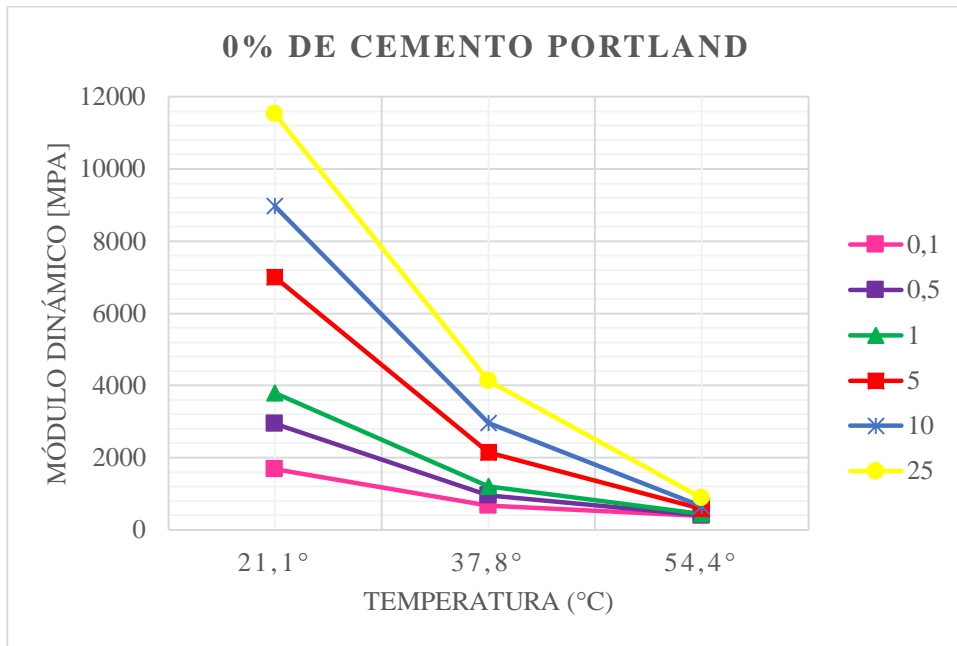


Fuente: Elaboración propia

En las gráficas No.23, 24, 25, 26 y 27 se puede evidenciar que los valores más altos de módulos dinámicos se dieron en la temperatura de 21,1°C con una frecuencia de 25 Hz y los valores más bajos de módulos dinámicos se dieron a una temperatura 54,4°C con una frecuencia de 0,1 Hz.

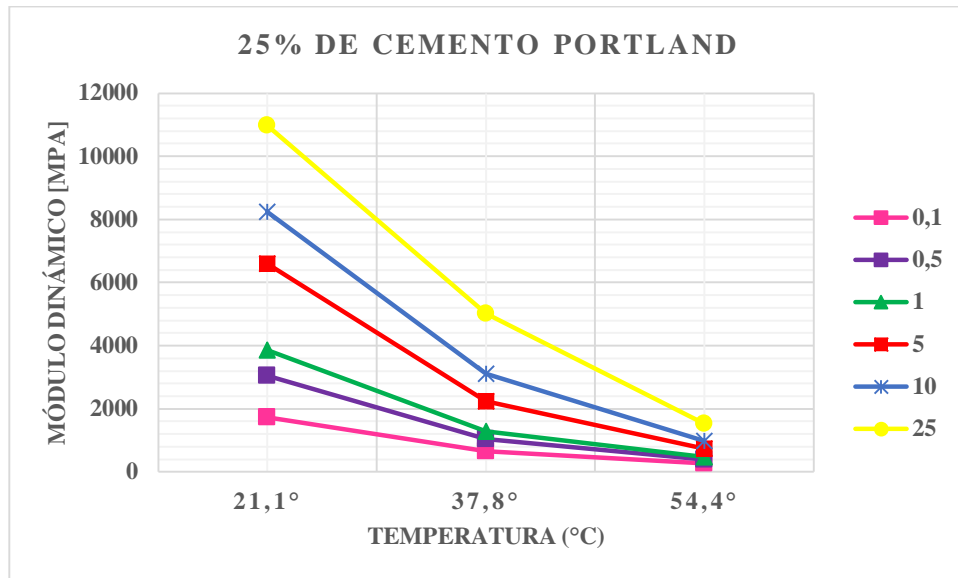
A medida que se aumenta la temperatura los valores de módulos dinámicos empiezan a decrecer progresivamente. También se puede decir que a mayor frecuencia se aumenta el valor de los módulos dinámicos.

Grafica 23. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 0% de cemento Portland.



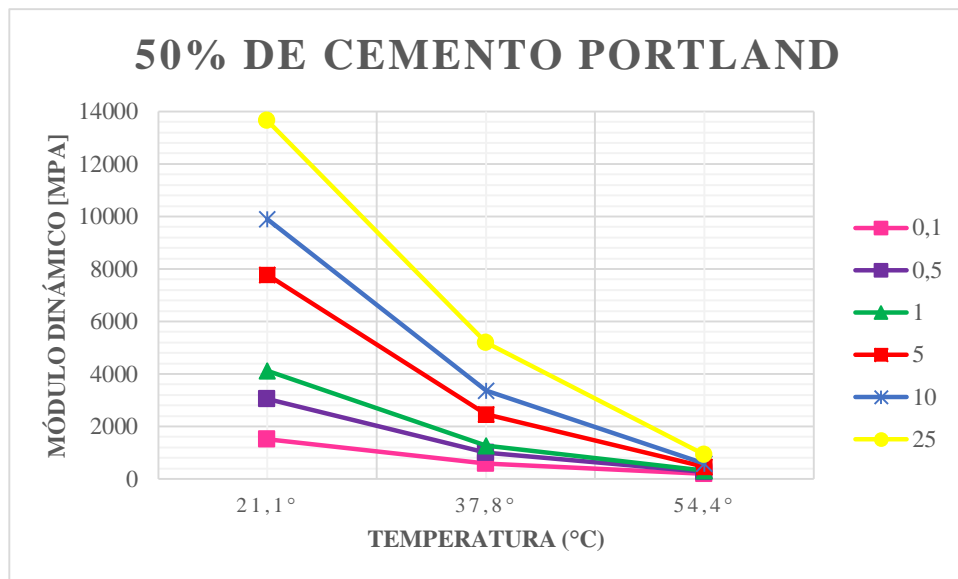
Fuente: Elaboración propia

Grafica 24. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 25% de cemento Portland.



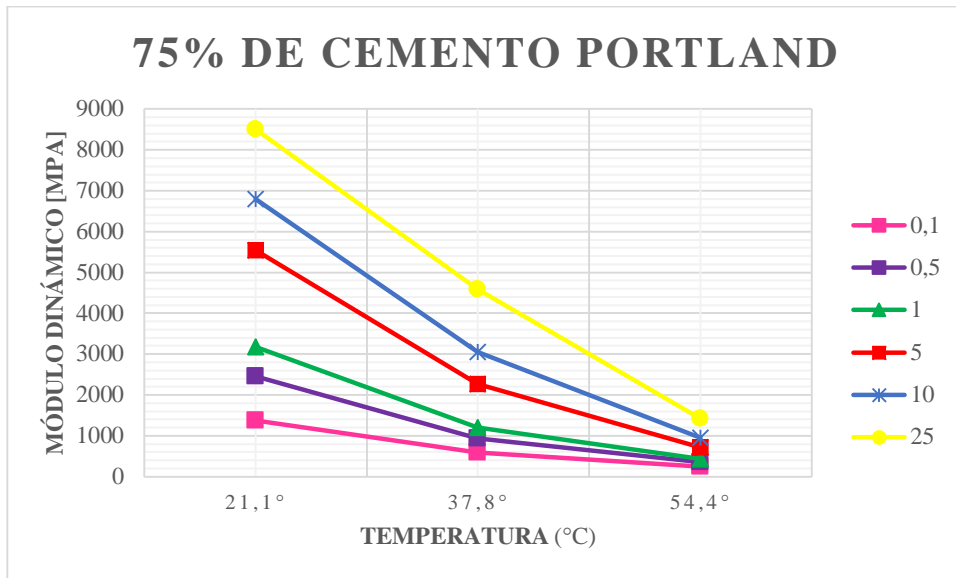
Fuente: Elaboración propia

Grafica 25. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 50% de cemento Portland.



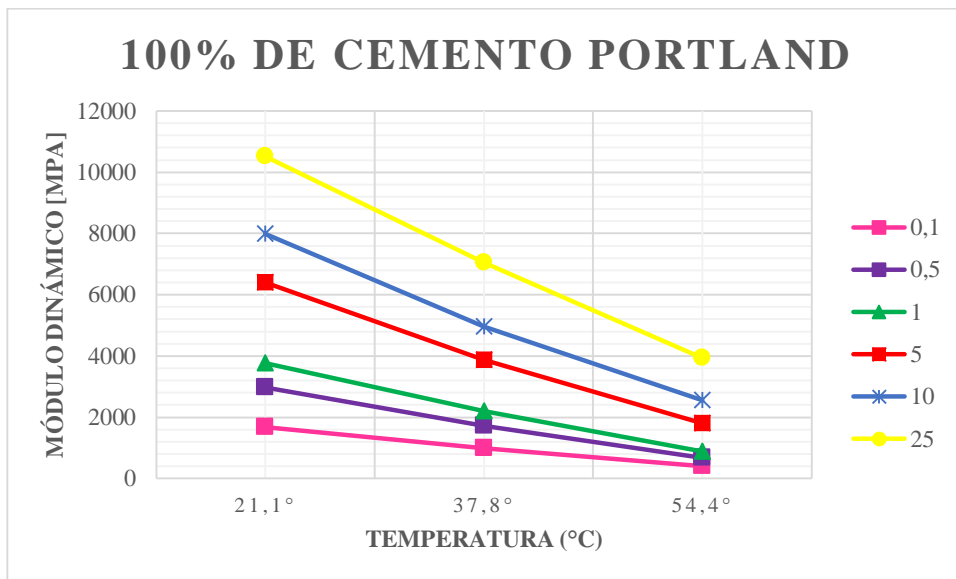
Fuente: Elaboración propia

Grafica 26. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 75% de cemento Portland.



Fuente: Elaboración propia

Grafica 27. Comportamiento módulo dinámico vs temperatura con 100% de cemento Portland.



Fuente: Elaboración propia

8.4. Verificación resultados de caracterización del material bituminoso y agregado.

En la tabla No. 42 podemos se puede observar los resultados de cada ensayo de caracterización del material bituminoso y verificar si cumple o no con lo estipulado en la norma INVIAS año 2013.

Tabla 42. Resumen de resultados de caracterización del material bituminoso.

ENSAYO	NORMA	RESULTADOS		ESTADO
		DISEÑO	REQUISITOS	
PENETRACION DEL MATERIAL BITUMINOSO	INV E 706	47 mm	Mínimo 60 mm Máximo 70 mm	NO CUMPLE
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	INV E 712	41 °C	Mínimo 48 °C Máximo 54 °C	NO CUMPLE
DUCTILIDAD	INV E 702	109,2 cm	Mínimo 100 cm	CUMPLE
PUNTO DE INFLAMACION Y COMBUSTION	INV E 709	Punto de inflamación 300°C Punto de combustión 305°C	Mínimo 230°C	CUMPLE
PESO ESPECIFICO		1,03 gr/cm ³		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla No. 43 se puede apreciar los resultados de cada ensayo de caracterización del agregado y verificar si cumple o no con lo estipulado en la norma INVIAS año 2013.

Tabla 43. Resumen de resultados de caracterización del agregado.

ENSAYO	NORMA	RESULTADOS		ESTADO
		DISEÑO	REQUISITOS	
GRANULOMETRIA DEL AGREGADO GRUESO Y FINO	INV E 213	Granulometría MDC- 19	Granulometría MDC- 19	CUMPLE
MAQUINA DE LOS ANGELES (%)	INV E 218	23,8	Máximo: 25%	CUMPLE
INDICE DE PARTICULAS FRACTURADAS EN EL AGREGADO GRUESO	INV E 227	54,3	Máximo: 75%	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

9. CONCLUSIONES

- Mediante la caracterización del agregado y material bituminoso podemos decir que el agregado extraído de la arenera Chicamocha localizada en la finca “el tamarindo” corregimiento Pescadero, vía Bucaramanga - san gil y el cemento asfáltico donado por MULTINSA S.A. cumplen con los parámetros exigidos en el capítulo 4, en los artículos 450 y 410 respectivamente de la norma INVIAS año 2013.
- La estabilidad en las briquetas convencionales se incrementó progresivamente cada vez que se aumentó el porcentaje de asfalto, en el porcentaje óptimo de asfalto que es de 5,5% se dio el valor más alto de estabilidad. La estabilidad en las briquetas modificadas con cemento Portland alcanzo su valor más elevado en las probetas modificadas con el 0% de cemento Portland. Luego, la estabilidad empezó a disminuir gradualmente cada vez que se elevó el porcentaje de cemento Portland, hasta que en las briquetas modificadas con el 75% de cemento, se empezó a ver un crecimiento en la estabilidad. De lo anterior, se puede decir que al modificar las briquetas convencionales con cemento Portland estas no muestran una mejoría en su capacidad de resistencia.
- El flujo en las briquetas convencionales aumento de manera considerable. Cada vez que se incrementaba el porcentaje de asfalto. Su mayor valor se dio en las briquetas fabricadas con el 6% de asfalto. En las briquetas modificadas con cemento Portland, el flujo se incrementó progresivamente justo antes de las briquetas modificadas con el 50% de cemento. Luego, estas empezaron a disminuir hasta que en las probetas modificadas con el 100% de cemento Portland se dio el menor valor de flujo. Dicho esto, se puede concluir que al reemplazar el material fino (Filler) en su totalidad por cemento Portland, la deformación de la briqueta será menor.

- El valor más elevado de flujo se dio en las briquetas modificadas con el 50% de cemento Portland mientras que el menor valor de flujo se dio en las briquetas modificadas con el 100% de cemento Portland. Las probetas modificadas con el 75% de cemento Portland se encuentran muy cerca al valor mínimo de flujo. Por lo tanto se puede concluir que el valor de flujo ideal está en el promedio del rango de 50 a 75% de cemento Portland ya que se debe buscar en las mezclas asfálticas un equilibrio en la capacidad de deformación porque si la deformación tiene valores pequeños quiere decir que la mezcla es muy rígida y va a fracturarse con facilidad, pero si la mezcla arroja resultados altos de deformación, con la aplicación de cargas la mezcla se deformara pero va a tener la característica de recuperar su estado inicial.
- Las briquetas que fueron modificadas con el 75 y 100% de cemento Portland mostraron valores bajos de deformación, de lo anterior podemos decir que al incrementar considerablemente los porcentajes de cemento Portland, las probetas van a tener una baja capacidad de deformación. También podemos decir, que cuando se aumentó el porcentaje de cemento las briquetas no tuvieron una buena capacidad de resistencia.
- La densidad en las briquetas convencionales se fue incrementando a medida que el porcentaje de asfalto se aumentaba. En las probetas modificadas con cemento Portland la densidad tuvo la tendencia a crecer hasta las briquetas fabricadas con el 50% de cemento, luego se empezó a disminuir el valor de densidad considerablemente. El mayor valor de densidad en las briquetas convencionales se dio en las probetas que fueron fabricadas con el 5% de asfalto. En las briquetas elaboradas con el porcentaje óptimo de asfalto (5,5%) y modificadas con el 0% de cemento Portland, que en pocas palabras son las mismas briquetas convencionales, el valor de la densidad es más elevado comparado con las probetas mencionadas anteriormente. Se puede decir que al aumentar el porcentaje de asfalto, la densidad en la mezcla asfáltica se incrementara.
- A medida que se aumentó el porcentaje de asfalto, se incrementó el valor del porcentaje de vacíos con aire en las briquetas convencionales. El mayor valor de porcentaje de vacíos con aire en las briquetas convencionales se dio en las probetas fabricadas con el 6% de

asfalto. En las briquetas fabricadas con el porcentaje óptimo de asfalto que es de 5,5% y modificadas con el 0% de cemento Portland el valor de porcentaje de vacíos con aire es más elevado comparado con las probetas anteriores. De las probetas modificadas, se puede decir que el aumento del porcentaje de asfalto, no aumenta el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica.

- El valor más elevado de porcentaje de vacíos con aire se dio en las briquetas modificadas con el 75% de cemento Portland mientras que el menor valor de porcentaje de vacíos con aire ocurrió en las probetas modificadas con el 25% de cemento. Cuando el porcentaje de vacíos con aire es muy elevado la mezcla asfáltica tiende a deformarse mucho, pero cuando el porcentaje de vacíos con aire es bajo la mezcla asfáltica será muy rígida. De lo anterior, se puede decir que es necesario encontrar el equilibrio en la relación de porcentaje de vacíos con aire para que la mezcla asfáltica tenga un mejor funcionamiento. El porcentaje donde se encuentra el valor idóneo de porcentaje de vacíos con aire se encuentra en las briquetas modificadas con el 50% de cemento Portland ya que es el punto medio entre el valor mayor y menor de porcentaje de vacíos.
- Se puede decir concluir que a medida que se aumenta la frecuencia en el ensayo de módulos dinámicos, la capacidad de resistencia de las briquetas se incrementara de considerablemente. También, se puede decir que las briquetas que fueron falladas con la temperatura menor de 21,1°C son las que mostraron mejor capacidad a la resistencia y las que fueron falladas con la temperatura de mayor valor son las que muestran menor capacidad a la resistencia.
- Las gráficas de módulos dinámicos vs frecuencia y módulos dinámicos vs temperatura tienen el mismo comportamiento, pues al aumentar la frecuencia se incrementa la resistencia y a menores temperaturas la resistencia será mayor.
- Existen diferentes métodos para la determinación de módulos dinámicos en una mezcla asfáltica, cada uno tiene características que hacen que el valor de los módulos de un valor

distinto, de igual forma son una alternativa ideal porque simulan temperaturas del entorno y se obtienen resultados confiables.

- Se puede concluir que las briquetas modificadas con el 50% de cemento Portland con una frecuencia de 25 Hz se dio el mayor valor de resistencia en los módulos dinámicos y en las probetas mencionadas anteriormente con una frecuencia de 0,1 Hz se dio el menor valor de resistencia.

10. RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar todos los implementos de seguridad que se exigen para poder realizar cualquier ensayo en el laboratorio (bata, botas de seguridad, pantalón, guantes y tapabocas), ya que en la mayoría de ensayos nuestra integridad física está en peligro.
- Se debe procurar trabajar con los mismos instrumentos y equipos de trabajo desde el inicio del proyecto de grado para poder obtener resultados idóneos.
- Es recomendable usar guantes especiales para trabajo a altas temperaturas ya que a la hora de la fabricación de las briquetas es necesario transportar el asfalto a 140°C para poderlo integrar con el agregado y así poder llevar a cabo el proceso de compactación.
- En la fabricación de las probetas es necesario usar un tapaboca de calidad ya que al momento de calentarse el asfalto este empieza a producir un humo que puede ser peligroso para el sistema respiratorio humano y ocasionar secuelas importantes en el cuerpo humano.
- Para la correcta fabricación de las briquetas, se recomienda tamizar todo el agregado y después clasificar el material retenido en cada tamiz en bolsas con su respectivo número de tamiz.
- Se recomienda a la UPB (Facultad de ingeniería civil) dar de baja a ciertos equipos e instrumentos necesarios para el desarrollo de este proyecto de grado ya que están en un mal estado y son muy peligrosos para la integridad física de los estudiantes que los utilizan (cocina para el calentamiento de agregado y asfalto).
- Se recomienda a la UPB (Facultad de ingeniería civil) tener un mejor control de los equipos del laboratorio de geotecnia y pavimentos ya que se tuvieron muchos inconvenientes para la realización del ensayo de módulos dinámicos, porque el equipo DTS-30 no se encontró configurado y en condiciones óptimas en el momento indicado de realizar el ensayo.

- Es recomendable tener claras normas (INVIAS año 2103), para la realización correcta de los ensayos ya que al no tener claro la metodología se puede llegar a tener resultados erróneos por no cumplir con lo estipulado en dicha norma.
- En cuanto al mejoramiento del asfalto, modificándolo con cemento Portland, se recomienda seguir investigando para que se encuentren mejores procesos o métodos que nos lleven a una mejor solución de mejoramiento en las propiedades y características de la mezcla asfáltica.

11. BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Goma, EL CEMENTO PORTLAND Y OTROS AGLOMERANTES, TECNICOS ASOCIADOS S.A..
- [2] H. Botasso, Rivera, J.J., Soengas, C. y Rebollo, O., «MODIFICACIÓN DE CEMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE CON,» 2013. [En línea]. Available: http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2013/11/2013_Modif.Asf.con-Emulsion-SBR_CILA.pdf.
- [3] A. M. Rodriguez Alloza, Una nueva mezcla asfáltica, doblemente respetuosa con el medio ambiente, UPM, 2015.
- [4] C. A. Vides Bautista, Analisis comparativo de una mezcla asfáltica convencional y modificada con un 4% de PVC, Universidad Pontificia Bolivariana.
- [5] H. Rondón y F. Reyes, Pavimentos Materiales, construcción y diseño, Bogotá: Ecoe Ediciones, 2015.
- [6] A. Fonseca, Ingeniería de pavimentos para carreteras, Bogotá: Universidad católica de Colombia , 2002.
- [7] O. Coronado, Mezcla asfáltica con cal hidratada, Bucaramanga, Colombia: Universidad industrial de Santander, 2007.
- [8] H. Aguilera, Uso de emulsiones en pavimentos asfálticos; Asfaltos calientes y frios, Valdivia - Chile: Universidad Austral de Chile, 2003.
- [9] A. Rodríguez, Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista, México D.F.: Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech, 2004.
- [10] V. Mejía, Aprovechamiento de limadura metálica para el diseño de mezcla asfáltica, Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana, 2011.
- [11] O. Hernández, Comportamiento de las mezclas asfálticas a diferentes niveles de compactación., México D.F.: Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2014.
- [12] «Aditivos asfálticos,» 20 Abril 2016. [En línea]. Available: www.aditivosasfálticos.com/olasitio.html.
- [13] E. Moura, «Movimiento de terra e pavimentacao.,» 2011. [En línea]. Available: <http://docplayer.com.br/9473410-Transportes-e-obras-de-terra.html>.

- [14] L. Dueñas y M. Romero, Influencia de las características granulométricas y mineralógicas del filler sobre la rigidez de las mezclas asfálticas, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [15] Invias-e-450, Diseño de mezcla, Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2013.
- [16] C. Perez y B. Garcia, Propuesta de diseño de mezcla asfáltica en frío de graduación densa como alternativa para el mantenimiento de pavimentos flexibles, Managua, Nicaragua: Universidad Centroamericana, 2013.
- [17] P. Morales, Construcción y conservación de vías., Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería., 2015.
- [18] Y. González y L. Durán, Comportamiento del módulo dinámico de la mezcla asfáltica para diferentes fuentes de agregado, Bucaramanga : Universidad Pontificia Bolivariana, 2010.
- [19] T. Clyne, X. Li, M. Marasteanu y E. Skok, Dynamic and Resilient Modulus of Mn/dot asphalt mixtures., Minnesota: University of Minnesota, 2003.
- [20] I. Villacorta, Estudio del módulo dinámico complejo de mezclas asfálticas desarrollo de curvas maestras. 1Ra parte, Costa Rica: Universidad de Costa Rica., 2003.
- [21] INV-E-745, Módulo dinámico de mezclas asfálticas, Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2013.
- [22] Cemento., «Scribd,» 25 Enero 2017. [En línea]. Available: <https://es.escribd.com/doc/190906195/El-cemento-es-un.conglomerante-formado-a-partir-de-una-mezcla-de-caliza-y-arcilla-calcinadas-y-posteriormente-molidas>.