COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE FABRICADAS CON RAP Y ESCORIAS DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

NUBY DANIELA HIGUERA MOJICA

JUAN DAVID MORALES PACHECO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA

TUNJA, BOYACÁ

2021

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE FABRICADAS CON RAP Y ESCORIAS DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

NUBY DANIELA HIGUERA MOJICA

JUAN DAVID MORALES PACHECO

Trabajo para optar por el título de

Ingeniero civil

DIRECTOR

M.Sc. Ing. HÉCTOR MAURICIO SÁNCHEZ ABRIL.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA, BOYACÁ

2021

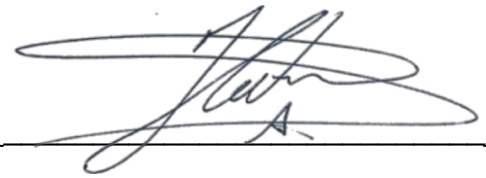
ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

Nota de aceptación

_____

_____

_____



_____

Firma director

_____

Jurado 1

_____

Jurado 2

Tunja, Boyacá. Febrero de 2021

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

ÍNDICE DE CONTENIDO

Pág.

RESUMEN 13
ABSTRACT 14
INTRODUCCIÒN 15
1. GENERALIDADES 16
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 16
1.1.1. Descripción del problema 16
1.1.2. Pregunta de investigación 16
1.1.3. Antecedentes y justificación 16
1.2. OBJETIVOS 17
1.2.1. Objetivo General 17
1.2.1. Objetivos específicos 17
2. ESTADO DEL ARTE 19
3. MARCO TEÓRICO 26
3.1. PAVIMENTO ASFALTICO 26
3.2. CEMENTO ASFALTICO 26
3.2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA 26
3.2.2. Propiedades físicas 28
3.3. AGREGADO PÉTREO 28
3.4. MEZCLA ASFÁLTICA 29
3.5. PROPIEDADES EN EL DISEÑO DE MEZCLAS 30
3.6. FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES 32
3.7. PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (*Recycled Asphalt Paviment* (RAP)) 32
3.8. TÉCNICAS DE RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO 34
3.9. ENVEJECIMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS 35

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

3.10. ESCORIAS DE ACERO 36

3.10.1. Propiedades de las escorias 37

3.10.1.1. Propiedades físicas y mecánicas 37

3.10.1.2. Propiedades químicas 38

3.10.1.3. Usos e impacto ambiental 40

3.11. MATERIAL GRANULAR 41

3.12. MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC) 41

3.13. MÉTODO MARSHALL 43

4. METODOLOGIA DE INVESTIGACION 45

4.1. METODOLOGÍA 45

4.2. MATERIALES EMPLEADOS 47

4.2.1.1. Equivalente de Arenas de Suelos y Agregados Finos I.N.V E-133 47

4.2.1.2. Análisis granulométrico de agregados grueso y fino I.N.V.E-213 49

4.2.1.3. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la Máquina de los Ángeles I.N.V.E- 218 49

4.2.1.4. Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados I.N.V.E-227 52

4.2.1.5. Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras I.N.V.E – 230 53

4.2.1.6. Determinación de la Resistencia del Agregado Grueso a la Degradación por Abrasión, Utilizando el aparato Micro- Deval I.N.V.E – 238 55

5. FASE EXPERIMENTAL 56

5.1 PROCEDIMIENTO 56

5.1.1 Ensayo Marshall (I.N.V. E-748) concreto asfaltico 56

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....62

6.1 CARACTERIZACION MATERIAL GRANULAR 62

6.1.1. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores a 37.5mm (1½ ") por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218). 64

6.1.2. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval (INV.E-238). 64

6.1.3. Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV. E-133). 65

6.1.4. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos (INV.E-240) 65

ISO 9001 icontec SC4289-1
IQNet CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

6.1.5. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV. E-227) 65

6.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO 66

6.2.1. Curva granulométrica grava (tamaño máximo nominal ½") 66

6.2.2. Curva granulométrica escoria (tamaño máximo nominal ½") 67

6.2.3. Curva granulométrica agregado fino (escoria) 68

6.2.5. Curva granulométrica RAP 70

6.3. DISEÑO CURVA GRANULOMÉTRICA Y DOSIFICACIÓN ÓPTIMA 71

6.3.1. Curva granulométrica 71

6.4. Porcentaje de cambio óptimo de material granular, RAP y escorias de horno de arco eléctrico 74

6.5. PORCENTAJE DE CAMBIO DE AGREGADO GRUESO Y FINO CON PORCENTAJE DE ASFALTO DE 5%. 80

6.6. ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO CON 100% DE CAMBIO EN LOS AGREGADOS GRUESO Y FINO. 83

6.7. ANÁLISIS COMPARATIVO CON RELACIÓN DE ESTABILIDAD Y FLUJO EN LAS DIFERENTES MEZCLAS ASFÁLTICAS. 85

6.8. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA OBTENIDA CON RAP Y ESCORIAS DE HORNO DE ARCO ELECTRICO CON DOSIFICACIÓN ÓPTIMA Y LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONALES 87

7. CONCLUSIONES 89

8. RECOMENDACIONES 91

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 92

GLOSARIO 94

ANEXOS 96

ISO 9001 icontec SC4289-1
IQNet CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Granulometrías admisibles para reciclaje de pavimento asfaltico 30
Tabla 2. Propiedades físicas de las escorias de acero 34
Tabla 3. Propiedades Mecánicas Típicas de la Escoria de Acero 34
Tabla 4. Propiedades Químicas de la Escoria de Acero 35
Tabla 5. Verificación ensayo máquina de los ángeles. 58
Tabla 6. Verificación ensayo Micro-Deval 59
Tabla 7. Verificación Ensayo Equivalente De Arena 59
Tabla 8. Verificación porcentaje caras largas y planas 59
Tabla 9. Verificación partículas fracturadas 60
Tabla 10. curva granulométrica de diseño 64
Tabla 11. Dosificación de asfalto 65
Tabla 12. Porcentaje de cambio al 10% 67
Tabla 13. Porcentaje de cambio al 20% 67
Tabla 14. Porcentaje de cambio al 30% 68
Tabla 15. porcentaje de cambio al 40% 68
Tabla 16. porcentaje de cambio al 50% 69

ISO 9001 icontec SC4289-1
IQNet CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

INDICE DE GRAFICAS

Pág.

Gráfica 1. Usos escoria 40
Gráfica 2. Granulometría agregado grueso 66
Gráfica 3. Granulometría agregado grueso (escoria) 67
Gráfica 4. Granulometría agregado fino (escoria) 68
Gráfica 5. Verificación agregado fino (arena) 69
Gráfica 6. Curva granulométrica material RAP 70
Gráfica 7. Curva granulométrica de diseño 72
Gráfica 8. Estabilidad del porcentaje óptimo de asfalto por medio del ensayo Marshall... 73
Gráfica 9. Flujo del porcentaje óptimo de asfalto por medio del ensayo Marshall 74
Gráfica 10. Estabilidad del porcentaje de cambio de agregados por medio del ensayo Marshall 77
Gráfica 11. Flujo del porcentaje de cambio de agregados por medio del ensayo Marshall 78
Gráfica 12. Estabilidad de porcentaje de cambio de agregados con 5.0% de asfalto por medio del ensayo Marshall 80
Gráfica 13. Flujo de porcentaje de cambio de agregados con 5.0% de asfalto por medio del ensayo Marshall 81
Gráfica 14. Relación flujo de 4.5% & 5.0% 81
Gráfica 15. Relación flujo de 4.5% & 5.0% 81
Gráfica 16. Relación flujo de 4.5% & 5.0% 81
Gráfica 17. Relación flujo de 4.5% & 5.0% 82
Gráfica 18. Relación estabilidad de 4.5% & 5.0% 82
Gráfica 19. Estabilidad de escoria y RAP 83
Gráfica 20. flujo escoria y RAP 84
Gráfica 21. Estabilidad obtenida de cada mezcla asfáltica 85
Gráfica 22. Flujo obtenido de cada mezcla asfáltica 86
Gráfica 23. Comparación de estabilidad entre mezcla convencional y dosificación optima de RAP y escorias 87
Gráfica 24. Comparación de flujo entre mezcla convencional y dosificación optima de RAP y escorias 88

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Composición química del asfalto. 24
Figura 2. Esquema de componentes de mezcla asfáltica y representación de los volúmenes presentes. 26
Figura 3. Granulometrías típicas para mezclas densas en caliente 38
Figura 4. Tipo de asfalto a emplear en mezclas asfálticas en caliente 39
Figura 5. Fase dos de la metodología de investigación 42
Figura 6. Preparación material Equivalente de Arenas 44
Figura 7. Maquina Agitadora 44
Figura 8. Tamizado material
Figura 9. Lavado de materia 45
Figura 10. Máquina de los Ángeles 46
Figura 11. Carga 46
Figura 12. Granulometrías Muestra de Ensayo 47
Figura 13. Esferas de acero 47
Figura 14. Masa de la Muestra de Ensayo 48
Figura 15. Calibrador de Longitudes
Figura 16. Calibrado de Espesores 49
Figura 17. Adición de esferas cilíndricas 50
Figura 18. Granulometría Material 52
Figura 19. Clasificación material granular 52
Figura 20. Clasificación material granular 53
Figura 21. Calentamiento del Asfalto 53
Figura 22. Peso muestra con asfalto 54
Figura 23. Mezcla del material 54
Figura 24. Muestra de briqueta con mezcla convencional 55
Figura 25. Baño María Briquetas 55
Figura 26. Maquina Marshall 56
Figura 27. Briquetas Falladas con la Maquina Marshall 56
Figura 29. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua 57
Figura 30 . Franjas granulométricas INVIAS 64
Figura 31. Criterios de diseño según el método Marshall 71

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

INDICE DE ANEXOS

Pág.

Anexo 1. Planta Asfáltica 96
Anexo 2. Recolección RAP en el Municipio de Duitama..... 96
Anexo 3. Rehabilitación vía de Duitama..... 97
Anexo 4. Recolección cemento asfaltico..... 97
Anexo 5. Trituración RAP..... 98
Anexo 6. Escoria de acero..... 98
Anexo 7. Extracción Briquetas 99
Anexo 8. Cuarteo Material Granular..... 99
Anexo 9. Briquetas..... 100
Anexo 10. Comparación briquetas cambiando totalmente material natural 100
Anexo 11. Carta de solicitud material Gerdau Diaco..... 101
Anexo 12. Carta radicada solicitud material Gerdau Diaco..... 102
Anexo 13. Cronograma de actividades ejecutadas 103

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios porque me dio fuerzas para luchar por este sueño que inicio hace unos años; a mis padres Fabio Ramiro Higuera y Vilma Nuby Mojica que fueron mi motor desde el día uno para hacer realidad este sueño de ser ingeniera civil, agradecida eternamente por ser tan incondicionales y esforzarse trabajando fuertemente para darme lo mejor siempre, solo me queda decirles que los amo y espero ser un motivo de orgullo para ellos; a mi hermana Leidy Fernanda Higuera por haberme apoyado cuando estuve a punto de rendirme en este proceso de crecimiento profesional y personal, a mis abuelos. También a cada uno de los ingenieros docentes por haber aportado sus conocimientos durante la formación profesional, donde influyo de manera positiva cada uno de los consejos y experiencias, ayudando así a superar los retos que nos encontraremos en el camino; a mi tutor el ingeniero Héctor Mauricio Sánchez por haber aportado sus conocimientos para el correcto desarrollo del presente trabajo y al laboratorista Fredy Hernández por su atenta colaboración en el desarrollo practico de la investigación; a mis amigos que también fueron de gran ayuda en el crecimiento personal y profesional durante la carrera, finalmente a mi compañero y amigo Juan David Morales por haber estado conmigo en los momentos más difíciles a lo largo de estos años y con quien logre culminar el presente trabajo de investigación.

Daniela Higuera.

Le agradezco primeramente a Dios por guiarme y darme la sabiduría para poder culminar esta etapa y lograr mi sueño de ser Ingeniero Civil, sé que seguirá acompañándome a lo largo de mi vida en el cumplimiento de mis proyectos y metas a futuro; a mi Mamá Mery Lucero Pacheco Suarez por ser mi motor y mi guía para no desistir en los momentos más difíciles, por ser mi fortaleza y brindarme su apoyo incondicional, gracias a su ejemplo aprendí el valor de la responsabilidad y entrega total a lo que verdaderamente me apasiona. A mi Papá Lisnardo Morales Serrano, por darme su apoyo sin importar la distancia, por sus sabios consejos para continuar con mi desarrollo profesional. A mis abuelos Cesar Alberto Pacheco y Raquel Suarez, que, aunque ya no estén conmigo en este mundo, siempre van a estar presentes en mi vida y en mi corazón, gracias por acogerme con amor como un hijo más y creer en mí, pues este logro es también por ustedes. A la familia Sánchez Pacheco y Fonseca Pacheco, por acompañarme en este proceso de formación integral y profesional, por estar en los momentos cuando más los necesite y confiar en que culminaría esta gran etapa. A la universidad Santo Tomas, por darme las herramientas y los conocimientos necesarios para desempeñarme como Ingeniero Civil en el ámbito profesional; a los docentes de la Facultad por formarme e inculcarme los valores de un Tomasino, es mi deber llevar en alto el nombre la Universidad; al Ingeniero Héctor Mauricio Sánchez Abril, por guiarme con su conocimiento en el desarrollo del Proyecto; al laboratorista Fredy Hernández, por su atenta colaboración para poder realizar la fase practica del Proyecto de Investigación. A mis amigos y compañeros, quienes con su apoyo me alentaron para seguir adelante, en especial a mi amiga Tania Molano Rodríguez, por su incondicionalidad y lealtad. Por último, agradezco a Daniela Higuera Mojica mi amiga y compañera, porque juntos logramos con eficiencia llegar hasta aquí y culminar nuestro Proyecto de Grado.

Juan David Morales.

RESUMEN

Con el pasar de los años ha sido notorio que las diferentes técnicas de construcción y rehabilitación de vías usadas comúnmente generan elevados costos y daños ambientales; por eso se ha buscado implementar métodos que reduzcan dichos factores, entre estos se encuentra: el reciclado de pavimentos asfálticos (*Recycled Asphalt Paviment (RAP))* y escorias de horno de arco eléctrico los cuales son empleados en el diseño de mezclas densas en caliente analizando el comportamiento mecánico que influyen en estas.

De acuerdo con lo anterior, el reciclado de pavimentos asfalticos (*Recycled Asphalt Paviment (RAP)*) es usado diariamente en nuevas mezclas asfálticas considerando que es un material que tiene gran heterogeneidad; este es producido a partir del fresado de las carpetas asfáltica; por otro lado, las escorias de horno de arco eléctrico son los desechos que se obtienen de la fabricación del acero donde su materia prima fundamental es la chatarra, este material es óptimo para las mezclas asfálticas por sus características físicas, composición y granulometría.

La investigación se realizó en la Universidad Santo Tomas de la ciudad de Tunja, en donde inicialmente se realizó una caracterización de los agregados gruesos y agregados finos de la mezcla asfáltica densa en caliente, cumpliendo los requisitos impuestos por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Posterior a la caracterización, se realizaron 51 briquetas para obtener la estabilidad (kN) y flujo (mm) de la mezcla optima de diseño empleando el equipo Marshall.

Finalmente se obtuvo una mezcla optima con adición del nuevo material de 30 %, tanto de agregado grueso como agregado fino y 4.5% de asfalto, comprobando que los resultados cumplen con los requisitos que la norma INVIAS presenta.

Palabras clave: asfalto, comportamiento, escoria, reciclado, granulometría, mezcla, pavimento, Marshall

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

ABSTRACT

Over the years it has been noticed that the different road construction and rehabilitation techniques commonly used generate high costs and environmental damage. for this reason, methods have been sought to reduce these factors. among these are: the recycling of asphalt pavements (RAP) and Electric Arc Furnace Slags (EAF-Slags), which are used in the design of hot dense mixtures by analyzing the mechanical behavior that influences them.

According to the above, recycled asphalt pavement (RAP) is used daily in new asphalt mixtures, considering that it is a material that has great hetereogeneity. it is produced from the milling of asphalt layers; on the other hand, Electric Arc Furnace Slags (EAF-Slags) are the waste obtained from the manufacture of steel, which main raw material is scrap metal; this material is optimal for asphalt mixtures due to its physical characteristics, composition and granulometry.

The research was carried out at the Santo Tomás University in the city of Tunja, where initially a characterization of the coarse aggregates and fine aggregates of the hot dense asphalt mix was performed, complying with the requirements imposed by the National Roads Institute. (INVIAS). After the characterization, 51 briquettes were made to obtain the stability (kN) and flow (mm) of the optimum design mix using the Marshal equipment.

Finally, an optimum mix was obtained with the addition of the new material of 30% of both coarse aggregate and fine aggregate and 4.5% of asphalt, proving that the results comply with the requirements of the INVIAS standard.

Keywords: asphalt, behaviour, slag, recycled, granulometry, mix, paviment, Marshall

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

INTRODUCCIÒN

Dentro de los tipos de pavimentos existentes, el flexible es uno de los más utilizados; se denomina pavimento flexible aquellos que son construidos con capas de mezcla asfáltica donde su superficie se apoya sobre varias capas que ayudan así a soportar las cargas, este proporciona una superficie segura y de comodidad para quien lo usa, donde las capas de la estructura soportan la mayor parte de las cargas de los vehículos y lo restante queda en el terreno o subrasante.

En Colombia se debe tener en cuenta los cambios climáticos puesto que estos inciden en el deterioro que sufre la superficie de rodadura del pavimento, los cambios son; temperatura, erosión, lluvias, escorrentías entre otros, por ende, el pavimento está expuesto a presentar fallas antes del tiempo de diseño establecido. Teniendo en cuenta lo anterior, nace la necesidad de realizar modificaciones en las mezclas asfálticas, buscando mejorar el comportamiento mecánico de las mismas.

En el presente trabajo se aborda la mezcla asfáltica como principal insumo para la conformación de su estructura, implementando materiales reciclables como lo es reciclado de pavimentos asfálticos (*Recycled Asphalt Paviment (RAP))* y escorias de horno de arco eléctrico en mezclas densas en caliente (MDC-19); se optó por realizar el estudio con el fin de obtener una mezcla asfáltica optima con la adición de los materiales mencionados anteriormente, garantizando así un buen comportamiento mecánico gracias al ensayo de laboratorio Marshall que especifica el Instituto Nacional De Vías (INVIAS) en la sección 748 cuyo objetivo es determinar la estabilidad y flujo de la mezcla.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

1. GENERALIDADES

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.1. Descripción del problema

Desde un principio ha sido notorio que las mezclas asfálticas contienen materiales de origen natural, esto redunda en un impacto ambiental negativo. Agregando materiales nuevos que son reutilizables ayuda tanto al medio ambiente, como a economizar y sobre todo ayuda en la mejora de la duración de los pavimentos evitando el deterioro en el que actualmente se encuentran las vías en Colombia, de acuerdo al Instituto Nacional de Vías (INVIAS), este actualiza permanentemente a nivel nacional el estado de la red vial, clasificándose en vías pavimentadas y no pavimentadas instaurando así su condición. Justificando lo anteriormente mencionado surge la siguiente pregunta a la problemática presentada.

1.1.2. Pregunta de investigación

¿Cuál es la dosificación óptima de RAP y escoria de horno de arco eléctrico al fabricar mezclas asfálticas en caliente y cuál es su comportamiento mecánico?

1.1.3. Antecedentes y justificación

Es notorio que en los últimos años, el flujo vehicular ha incrementado de manera descontrolada y los cambios climáticos quebrantan directamente en el campo de la infraestructura vial puesto que se requiere construir vías que satisfagan las necesidades actuales, que cumplan con la vida útil de diseño requerida; lo anterior obliga a buscar materiales que mejoren las características de la mezclas asfálticas pero no antes es importante saber que las mezclas asfálticas tienen un amplio uso

ya que se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Estas están constituidas aproximadamente por un 95% de agregados y otro 5% de ligante asfáltico. Estos componentes son de gran importancia para el adecuado funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto, de ahí entra la importancia de estudiar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas en caliente fabricada con reciclado de pavimentos asfálticos (*Recycled Asphalt Paviment (RAP))* y escorias de horno de arco eléctrico, ya que están siendo usadas por los beneficios que estas traen consigo; también su debido estudio es de gran importancia para saber si son adecuadas, de acuerdo a los resultados que estas arrojan al momento de realizar ensayos de laboratorio identificando sus propiedades y comportamiento mecánico; tales como estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas en caliente, conforme a lo establecido en el método Marshall.

Con esta investigación se requiere demostrar que el uso de asfaltos modificados es una solución viable frente al problema de baja durabilidad que se presentan en los pavimentos, buscando realizar una mezcla asfáltica densa en caliente modificada, analizar estabilidad y flujo mediante el ensayo de laboratorio mencionado anteriormente por el método Marshall, encontrando la dosificación optima con la adición de estos materiales granulares.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Identificar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente fabricadas con reciclado de pavimentos asfálticos (*Recycled Asphalt Paviment (RAP))* y escorias de horno de arco eléctrico de acuerdo a su dosificación óptima y especificaciones de la normatividad.

1.2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar el reciclado de pavimentos asfálticos (RAP) y escorias de arco eléctrico como agregado en las mezclas asfálticas en caliente.

- Diseñar una mezcla MDC19 (mezclas densas en caliente) óptima con materiales nuevos mediante ensayos laboratorio.

- Evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica resultante fabricada con reciclado de pavimentos asfálticos (RAP) y escorias de arco eléctrico.

- Analizar la comparación de los resultados obtenidos del comportamiento mecánico de mezclas densas en caliente convencionales con las fabricadas con reciclado de pavimentos asfálticos (RAP) y escorias de arco eléctrico de acuerdo a las especificaciones de la normatividad.

2. ESTADO DEL ARTE

En las mezclas asfálticas se tiene una combinación en proporciones exactas que es el asfalto y el agregado, donde se determinan las propiedades físicas de la mezcla y el desempeño que esta presenta como pavimento terminado. Se han realizado diferentes investigaciones donde la mayor intención es perfeccionar estas mezclas con la adición de distintos materiales, dichas investigaciones son una base teórica muy esencial en el planteamiento de la investigación, se presentará una reseña de las más relevantes en cuanto a la temática que se trabajará en el proyecto investigativo.

(Segura Anlly, 2016). Este proyecto se planteó con el fin de estudiar el comportamiento físico y mecánico del asfalto; con materiales reutilizables en el campo constructivo como la escoria de Acero. Al realizar diferentes muestras, se obtuvo la muestra 5,5% en porcentaje de asfalto para efectuar los diseños y evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica. La escoria de horno es un subproducto derivado de la fabricación del arrabio (materia prima para la elaboración del acero), la cual se genera en hornos de siderurgias. Es utilizada como material en la construcción de carreteras y en otras aplicaciones como concreto hidráulico. Se caracterizó la escoria y el agregado; la mezcla con 100% agregado tradicional se utilizó como parámetro de comparación para conocer las diferencias entre las mezclas con escoria y las que utilizan agregados tradicionales. Para el diseño de mezclas se utilizó el método Marshall (INV. E-748-13)), la mezcla que presentó mejor comportamiento fue la que combina agregados tradicionales con escoria.

La selección del porcentaje óptimo de asfalto se realizó bajo los parámetros establecidos por el INVIAS (2013) para las mezclas densas en caliente tipo 2 MDC-25 por el método del instituto del asfalto, en cuanto a estabilidad, flujo y relación estabilidad flujo. Se estableció que el contenido de asfalto que deberían contener las muestras elaboradas con AC 60-70 sería del 5,5%. Con este valor se cumplen los parámetros de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos para un nivel de tránsito pesado. Los resultados obtenidos en el proyecto, indican que el tipo de aditivo mejora las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales, en cuanto a estabilidad de la muestra compactada, flujo y rigidez Marshall. Cuando la escoria se combina con agregados tradicionales, el contenido de asfalto disminuye conforme aumenta el porcentaje de escoria en la mezcla. Las mezclas con escoria presentan valores más altos de estabilidad Marshall que las

mezclas con agregados tradicionales. Al realizar modificación en la mezcla asfáltica con escoria se presenta alta resistencia, lo cual mejoraría la deformación por ahuellamiento. Debido a que las mezclas con escoria presentan valores más altos de estabilidad, las mismas son más resistentes a la deformación causada por el tráfico. El método de diseño Marshall es adecuado para diseñar mezclas con escoria, no presentó ningún problema en su aplicación a dicho material.

(Buitrago & González, 2016). En esta investigación se realizó la caracterización del RAP encontrado en la ciudad de Bogotá D.C., se identifican sus propiedades y se establece las principales variaciones que se presentan entre diferentes muestras. Posteriormente se identifica la influencia del contenido y grado de envejecimiento del asfalto presente en el material reciclado, en una mezcla asfáltica nueva en caliente con diferentes porcentajes de adición del mismo. Se tomaron 6 muestras de RAP, 3 del acopio en planta y 3 de tramos de diferentes vías, y se realizó la extracción de asfalto, el análisis granulométrico de los agregados pétreos extraídos, la recuperación del asfalto por destilación con el rotavapor y se aplicaron ensayos para conocer el grado de oxidación del mismo. Posteriormente se fabricó RAP en el laboratorio controlando el contenido de asfalto y se llevó a dos grados de envejecimiento diferentes de forma que se representarán resultados similares a los obtenidos en la caracterización inicial. Se diseñó una mezcla óptima MDC-19 de control por el método Marshall y se elaboraron mezclas con adición del RAP simulado en diferentes porcentajes. Finalmente se evaluó su comportamiento en comparación con la mezcla óptima.

La caracterización realizada muestra un alto grado de heterogeneidad en el RAP y una influencia del contenido de asfalto y su grado de envejecimiento significativo en el comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente en que se adicione, obteniendo que mezclas asfálticas en caliente con adición de RAP con contenidos de asfalto elevados o cercanos al usado en la mezcla óptima, no cumplen con la norma INVIAS, mientras que con contenidos de asfalto en el RAP cercanos al promedio obtenido en la caracterización realizada al RAP (6.74%) se cumplen todos los requisitos y se presentan las mejores condiciones mecánicas. A demás en esta investigación se demuestra que el cloruro de metileno (disolvente permitido por el INVIAS para recuperación de asfalto) presenta efectos sobre el asfalto recuperado, disminuyendo su rigidez y aumentando su fluidez. Se demuestra también que los procedimientos STOA (Short Term Oven Aging) y LTOA (Long Term Oven Aging) permiten obtener mezclas envejecidas con condiciones similares a las reales. En conclusión, los resultados obtenidos en este trabajo de investigación sirven como guía para que, basados en determinadas propiedades del RAP, se puedan elegir las proporciones adecuadas de materiales nuevos y de reciclado, con el fin obtener

mezclas resultantes con buenos comportamientos mecánicos y que cumplan con los requisitos de la norma INVIAS.

Los resultados que se obtuvieron en la etapa de caracterización de las muestras de RAP permitieron establecer que este material es heterogéneo ya que las propiedades y características del asfalto y la granulometría varían de muestra en muestra, también cuando se relacionan el porcentaje de asfalto según las muestras con RAP, la variación en la ductilidad del asfalto, variación en la penetración del asfalto, también en el punto de ablandamiento del asfalto, evaluación de la influencia del cloruro de metileno en el asfalto.

(Daguerre, Larsen, Williams, Frígoli & Uguet, 2019). Para este estudio del comportamiento en laboratorio de mezclas asfálticas tibias con incorporación de RAP, inicialmente se realizó la caracterización individual de los áridos graníticos, RAP y asfalto donde se realizaron cuatro proporciones de las mezclas. Los cuatro asfaltos que se usaron fueron uno convencional CA30 utilizado como referencia para la mezcla control, los otros Tibios, poseen aditivos tensioactivos, mejoradores de adherencia y han sido en parte mezclados con el asfalto proveniente del RAP, siendo identificados como: T, TB 20R Y TC 40R. los análisis que se efectuaron sobre los asfaltos vírgenes, aditivos y mezclados con el asfalto aportado por el RAP en diferentes concentraciones, luego fueron oxidados en forma acelerada en RTFOT y finalmente fueron comparados y fueron extraídos de dichas probetas ensayadas.

Como conclusiones de los laboratorios realizados la metodología Marshall pudo ser utilizada para determinar los diferentes parámetros mecánicos y volumétricos, según la evaluación de la mezcla se logró obtener un 4% de vacíos de diseño, los ligantes tibios en las mezclas asfálticas presentaron en general buena respuesta frente a los ensayos mecánicos a los que fue sometido, con las mezclas de los asfaltos tibios con 40% de RAP, presentaron un comportamiento más rígido, pero concluyeron que deben seguirse haciendo estudios para asegurar una buena performance en el tiempo, mientras que la incorporación de asfaltos tibios con RAP hasta un 20% presentaron que poseen similar comportamiento a fatiga que las mezclas asfálticas convencionales y estas superan al rendimiento de estas cuando poseen RAP.

(Granados, 2017). En esta investigación su principal meta fue mejorar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica mediante la incorporación de caucho, a fin de ofrecer una alternativa de solución a los problemas que afectan al asfalto y consecuentemente a la carpeta asfáltica, se realizaron ensayos de compresión- inmersión a la mezcla modificada para así determinar la temperatura

y tiempo de digestión, así mismo como ensayos Marshall donde lo hacían sobre la mezcla asfáltica convencional y modificada con caucho a fin de evaluar su comportamiento mecánico, luego de tener los diseños óptimos de ambas mezclas, siguieron con el paso de evaluar su comportamiento mediante los ensayos de caracterización y desempeño, donde se determina la resistencia a la compresión diametral, resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido a la humedad, el ensayo de cántabro de pérdida por desgaste, ahuellamiento por medio de la rueda de Hamburgo y módulo resiliente.

También se nombró sobre el grado de aporte de la incorporación de granos de caucho en la mejora de las propiedades de las mezclas, depende de varios factores, dentro de los cuales pueden incluir la tecnología de la incorporación, la naturaleza del caucho, su granulometría y el tamaño de la partículas, el porcentaje de adición y el tiempo de reacción para el proceso húmedo y para el caso de dicha incorporación mediante el proceso de la vía seca, su finalidad siempre fue contribuir con el mejoramiento de las mezclas asfálticas con la incorporación del material ya antes nombrado. Los resultados obtenidos en la investigación muestran mejoras en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada, lo que permitió llegar a la conclusión de que la incorporación del caucho es una mezcla asfáltica presenta grandes ventajas como lo son la menor pérdida de resistencia por efecto del agua, mayor resistencia a la deformación, mayor cohesión y resistencia al esfuerzo cortante, mayor resistencia al ahuellamiento y menor daño por humedad, también mejora el comportamiento elástico y así incrementar la vida útil del pavimento.

Se demostró que para la mezcla asfáltica convencional, se determinó el contenido óptimo de asfalto de 5,5% con el cual se logró el mejor comportamiento mecánica de la mezcla, cumpliendo los requerimientos de diseño de acuerdo al Manual que se guiaron que tiene como nombre Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013, donde se obtuvo los principales rendimientos de Estabilidad con 1350 kg, flujo con valores entre 13.3 – 0.01”, densidad de 2.384 gr/cm3, resistencia retenida de 88.5%, resistencia conservada de 84.9% y una resistencia a la compresión de 3.0 Mpa, por otro lado para las mezclas modificadas con el material nuevo que fue el caucho, se determinó el contenido óptimo de asfalto de 5.5% e incorporación de caucho del 0.5$, con el que se logró observar que había un mejor comportamiento mecánico de la mezcla, cumpliendo con los criterios establecidos por el instituto del asfalto (1982) y las especificaciones técnicas generales para construcción EG- 2013 con los resultados de: estabilidad de 2175 kg, flujo entre 13.8 – 0.01”, densidad de 2.352 gr/cm3,

resistencia retenida de 97.4%, resistencia conservada de 93.7% y resistencia a la compresión de 4.4 Mpa. En cuanto al comportamiento de la mezcla en función de las propiedades de los ensayos de caracterización y desempeño, de la mezcla modificada con la incorporación de granos de caucho mediante el proceso de vía seca se tiene los siguientes datos, la resistencia a la compresión diametral la mezcla modificada con respecto a la convencional es significativamente superior un 53%, la resistencia de mezclas asfálticas al daño inducido por humedad, la mezcla modificada es superior un 47% respecto a la convencional, la Resistencia de mezclas asfálticas al daño inducido por humedad, la mezcla modificada fue superior un 63% respecto a la convencional, la Pérdida por desgaste de la mezcla modificada fue ligeramente mayor 3% con respecto a la convencional, el Módulo Resiliente a 20°C y 25° de la mezcla modificada que a la convencional fue significativamente superior en 45% y 50% respectivamente, el ahuellamiento de la mezcla modificada respecto a la convencional es menor en 32%, también los autores nombraron que es fundamental determinar los parámetros de tiempo y temperatura de digestión ya que este debe cumplir con un mínimo necesario para que el caucho interactuara con el caucho con el asfalto, en la investigación se llevó a cabo una temperatura de 170° por un tiempo de digestión de 2 horas y así se logró tener un mejor comportamiento de la mezcla modificada respecto a la convencional.

(González, 2015), en esta tesis doctoral se realizaron una serie de ensayos que determinan las propiedades mecánicas de los hormigones siderúrgicos, donde se obtuvo que son similares o superiores a las medidas para los hormigones convencionales y en todos los casos estudiados son significativamente mayores en comparación con los hormigones baríticos, aunque son más bajos sus coeficientes, se obtuvo que las diferencias en términos de espesor de pared equivalente son relativamente pequeñas y se constató también que los hormigones siderúrgicos presentan resistencias al deslizamiento similares y resistencias a la abrasión mayores que la de los convencionales, y también se logró concluir que tienen un comportamiento similar en términos de durabilidad.

(Rondón, Muniz & Reyes, 2018). En el artículo se presenta una revisión del estado del conocimiento del empleo de escorias de alto horno (BFA) y acero (SS), donde describieron y definieron los materiales, ya que muestran un punto de vista ambiental respecto a la problemática de la contaminación que se genera impactos negativos, también se estudió cómo han sido estudiados estos materiales para así ser usados como agregados pétreos de mezclas asfálticas, también gracias a la revisión bibliográfica realizada se logró llevar adecuadamente a cabo la realización del artículo que se está citando. Se nombró que, por lo general, los agregados

pétreos conforman más del 90% y del 75% de la masa y del volumen de las mezclas asfálticas, respectivamente y esto ha llevado a que en los últimos años se quieran reemplazar los materiales granulares naturales. Como conclusión se tiene que en la mayoría de los estudios, ambas escorias cumplieron los requisitos mínimos de calidad exigidos por cada especificación particular empleada, y presentaron propiedades deseables en proyectos viales como son partículas predominantemente redondeadas con caras angulares, fracturadas y escaso contenido de partículas alargadas y aplanadas, por otro lado en términos generales no se reportan riesgos ambientales o toxicológicos por usar BFS o SS, sin embargo se deben revisar la concentración de algunos elementos que pueden ser nocivos para los seres humanos como son el vanadio, el cromo y el aluminio. Por otro lado, se obtuvo que la principal limitación de uso de las BFS en proyectos viales es su baja resistencia a la abrasión, mientras que en el caso de las SS es su potencial de expansión. Así mismo, otra desventaja reportada es que, debido a su mayor porosidad y rugosidad superficial en comparación con agregados naturales, las mezclas que emplean BFS o SS tienden a necesitar mayor cantidad de asfalto, es por eso que no se recomiendo sustituir totalmente los agregados naturales por escorias BFS o SS.

(Reyes, Troncoso & Camacho, 2006). En este artículo de investigación se estudió el comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes de una mezcla asfáltica con granulometría 0/10 y asfalto CA60 /70. Lo primero que se realizó fue la caracterización del material granular, cenizas volantes y asfalto, también se determinó el porcentaje óptimo de asfalto mediante el proceso Marshall, de ahí la importancia de tomar el articulo como referencia bibliográfica ya que se realizó el ensayo Marshall y construyeron muestras para los ensayos mecánicos y de ahuellamiento con el reemplazo de llenante mineral por ceniza volante en este caso. En este caso los ingenieros utilizaron diferentes porcentajes de reemplazo de llenante mineral por ceniza volante entre el 15% y el 100%, en los resultados que se obtuvieron se determinó un incremento de la resistencia del 19% para un reemplazo del 20%, mientras que la deformación permanente disminuyó 10% y 38% para el reemplazo de 20% y 45%, respectivamente, en el cálculo de la rigidez Marshall y la velocidad de deformación se obtuvo un porcentaje de adición favorable de ceniza volante de 25% con respecto al peso que se usó del llenante mineral.

(Sánchez H, 2014). En el artículo que hace referencia al estado del arte sobre las escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos, el ingeniero Héctor Sánchez hace un gran hincapié en las escorias y que estas son

desechos de la fabricación del acero cuya materia principal es la chatarra, nombrando que dichas escorias en Colombia presentan una alta producción, ya que aproximadamente de cada tonelada que se produce de acero se genera de 0,1 a 0,3 toneladas de escoria. Hablando nacionalmente se indica que, en el 2012, en Paz del Rio se produjeron 350000 toneladas, de Diaco 480000 toneladas, de Sidenal 190000 toneladas, de Acasa 144000 toneladas y Sidoc 102000 toneladas. Ese fue el total que se produjo en el país, donde se ha pretendido darle un uso técnico y sostenible adecuado, teniendo en cuenta que dichas escorias generan impactos ambientales sobre el suelo, sin ignorar que estas son usadas altamente en construcción de carreteras. El articulo tiene como principal objetivo analizar más de 30 artículo de investigación y trabajos de tesis de pregrado, maestría y doctorado en el marco de investigación que se viene adelantando para optimizar el uso de escorias negras colombianas en pavimentos.

Como conclusión después de haber realizado una previa lectura e investigación tanto de los artículos nacionales e internacionales que las escorias negras vienen siendo usadas en carreteras desde 1956 en casos específicos, muchas de las escorias negras pueden tener algo de potencial expansivo lo que debe generar procesos de control de la misma, no posee buenas propiedades de resistencia al desgaste por abrasión inferior al 35% y CBR superiores al 100%, para usar las escorias de horno de arco eléctrico se da para incluirla en capas granulares mezclado, solo en algunos casos y para capas asfálticas e inclusive para mezclas de concreto hidráulico para pavimentos, también con lo que se investigó el algunos artículos se pudo evidenciar que la escoria cumple con la normativa estipulada para usarlas en mezclas asfálticas y que los resultados de expansión no superan el 1% después de los 7 días de inmersión.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. PAVIMENTO ASFALTICO

Los pavimentos son estructuras construidas por capas de diversos materiales seleccionados, superpuestas, colocadas y compactadas sobre la superficie del terreno. La estructura de un pavimento está concebida especialmente para la circulación del tráfico automotor, por lo que es una solución económica y eficaz. El desarrollo del automóvil a principios de siglo produjo una rápida evolución de las carreteras a nivel mundial. En Colombia la construcción de carreteras se inició prácticamente hacia 1930 y la pavimentación de vías hacia 1945. [1]

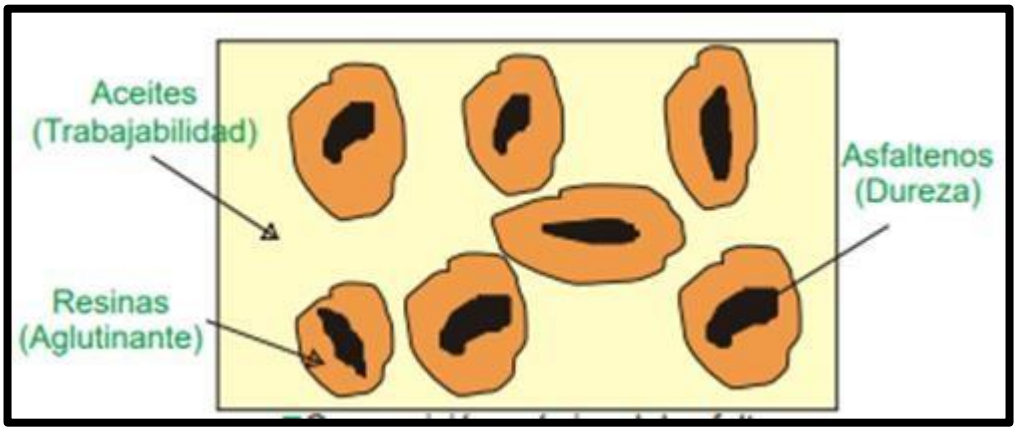
3.2. CEMENTO ASFALTICO

El asfalto es un material que se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales o puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo. Posee unas características muy específicas que lo hacen ideal para los trabajos de pavimentación, principalmente la cohesión y la adhesión con materiales granulares. Tiene una consistencia sólida, al calentarse se ablanda y se vuelve líquido, lo que le permite cubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente. El asfalto cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Es más duro a bajas temperaturas y más blando a altas, por esto, se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente dependiendo del clima del sitio de colocación. [2]

3.2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

El asfalto está compuesto por asfáltenos, resinas, aromáticos y saturados. Los asfáltenos proporcionan la dureza del asfalto, las resinas son las que aglutinan los asfáltenos, brindando la capacidad de liga. Los aromáticos y saturados son aceites, que le dan la consistencia para que sean trabajables. [3]

Figura 1. *Composición química del asfalto.*



Fuente: ASOPAC. Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia. Cartilla del pavimento asfáltico. Pág. 10

- Asfáltenos

Son aquellos que suministran la dureza del asfalto y componen su esqueleto. Los asfáltenos proporcionan la resistencia mecánica de los asfaltos y les dan la consistencia. [4]

- Resinas

Son originadas por la condensación de anillos aromáticos suplantados por cadenas alifáticas cortas y contienen heteroátomos en proporciones pequeñas. Se considera que las resinas son el producto de una transición entre los compuestos polares y las fracciones relativamente no polares. Las resinas son responsables de proporcionar al asfalto sus propiedades cementantes y proceden como peptizantes de los asfáltenos. Además, incrementan la susceptibilidad térmica, el punto de ablandamiento y en especial la ductilidad, reducen la penetración y el índice de penetración. [5]

-Aceites

Este tipo de hidrocarburos contiene entre 20 y 70 átomos de carbonos de hidrocarburos normales y de cadena ramificada, hidrocarburos saturados cíclicos y en una presencia pequeña de hidrocarburos aromáticos. En general, los saturados presentan pesos moleculares entre 300 y 800, y dentro de todas sus funciones se pueden mencionar algunas como: la disminución de la viscosidad y la susceptibilidad térmica, elevan la penetración, actúan como antioxidantes e impermeabilizantes y ocasionan deformación en el asfalto, entre otros. [6]

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

3.2.2. Propiedades físicas

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

- Durabilidad

Indica qué tanto permanecen en un cemento asfáltico sus características cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

- Adhesión y cohesión

Adhesión es la capacidad del cemento asfáltico para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del cemento asfáltico de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

- Susceptibilidad al endurecimiento y envejecimiento

El endurecimiento del asfalto es causado por la combinación con el oxígeno (oxidación) o por volatilización. La oxidación y el endurecimiento más severo ocurren durante el mezclado, pues el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas.

- Susceptibilidad a la temperatura

Esta es una de las propiedades más importantes del asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia. [7]

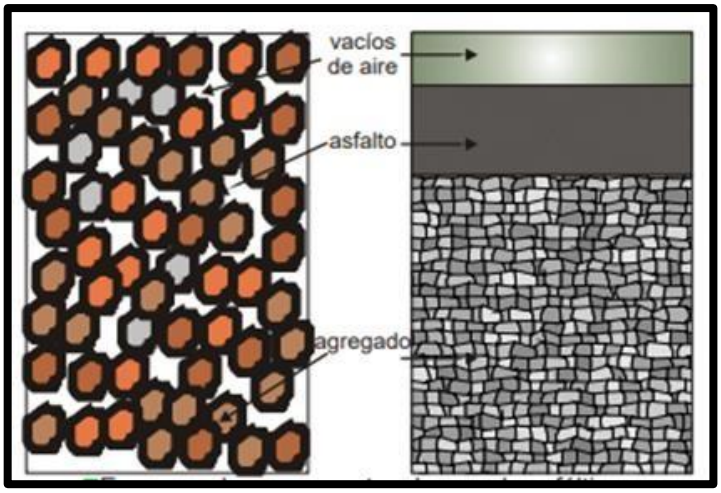
3.3. AGREGADO PÉTREO

Un agregado pétreo es un material mineral duro e inerte, usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento flexible. Los agregados se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de la mezcla asfáltica. El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento. [8]

3.4. MEZCLA ASFÁLTICA

La mezcla asfáltica es una combinación de cemento asfáltico y agregados pétreos en proporciones exactas y previamente especificadas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades y características de la mezcla. Las mezclas asfálticas se pueden fabricar en caliente o en frío, siendo más comunes las primeras, por lo que se enfocará el estudio hacia las mezclas asfálticas en caliente. Existen distintos procedimientos para calcular las cantidades de cada material en la mezcla en caliente. Entre ellos tenemos el procedimiento Marshall y el procedimiento Hveem, que tienen una larga trayectoria de uso a nivel mundial. El contenido de asfalto es el componente más importante. Debe ser determinado en laboratorio y controlado en obra. Mientras más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

***Figura 2**. Esquema de componentes de mezcla asfáltica y representación de los volúmenes presentes.*



Fuente: ASOPAC. Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia. Cartilla del pavimento asfáltico. Pág. 21

Existen distintos tipos de mezcla asfáltica, dependiendo del tipo de asfalto, la proporción de agregados en la mezcla, la granulometría del agregado y el proceso de fabricación. Las mezclas se pueden fabricar en caliente en central de mezcla o en frío in-situ. Según su granulometría o gradación, se pueden usar como bases o como capas de rodadura Cada mezcla tiene un uso específico que vendrá determinado en el diseño mismo de la mezcla. Es así como tenemos varios ejemplos: En las especificaciones generales de construcción de carreteras del

INVIAS (Instituto Nacional de Vías) encontramos, entre otras, las siguientes posibilidades: Mezcla densa en frío, mezcla abierta en frío, mezcla densa en caliente, mezcla abierta en caliente, mezcla discontinua en caliente para capa de rodadura y mezcla drenante. [9]

3.5. PROPIEDADES EN EL DISEÑO DE MEZCLAS

Según el Instituto del Asfalto, las mezclas en caliente que son buenas trabajan adecuadamente debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se obtienen las propiedades que se desean. Existen unas propiedades que contribuyen a que la calidad de los pavimentos de mezclas en caliente sea adecuada, incluyendo así la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. Al hacer el diseño de una mezcla su objetivo principal es garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades, de ahí la importancia de saber a fondo que significa cada una de ellas, cómo es evaluada y por último que representa en términos de rendimiento del pavimento. [10]

- Estabilidad

Esta es la capacidad que tiene la mezcla para resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas del tránsito. Cuando un pavimento es estable, este es capaz de mantener su forma y estar liso bajo cargas repetidas, cuando es inestable este desarrollará ahuellamientos, ondulaciones y otras pistas que indiquen cambios en la mezcla. Se indica que para poder establecer la estabilidad se deben hacer análisis completos del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad del instituto del asfalto indican que esto depende el tránsito esperado, las especificaciones deben ser lo suficientemente altas para así poder acomodar adecuadamente el tránsito que se espera, cuando se tienen valores muy altos de estabilidad se produce un pavimento demasiado rígido y, por tanto, menos durable que lo deseado.

La fricción y la cohesión interna dependen para la estabilidad de la mezcla, la fricción está relacionada con las características del agregado tales como forma y textura superficial es decir que entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla. Por el lado de la cohesión, esta aumenta a medida que la viscosidad del

asfalto aumenta, a medida que la temperatura del pavimento disminuye, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta cuando los contenidos de asfalto suben. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, esto quiere decir que resulta en pérdida de fricción entre partículas.

- Durabilidad

Es la habilidad que tiene un pavimento para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto como lo puede ser la oxidación, y la separación de las películas de asfalto, todo esto puede ser a causa de cambios climáticos, del tránsito o una combinación de los dos.

Para poder mejorar la duración de una mezcla se puede usar mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad, también una graduación densa de agregado firme, duro, resistente a la separación, contribuye de manera efectiva la duración del pavimento.

- Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y de agua hacia el interior del mismo, o a través de él. Esta particularidad se relaciona con el contenido de vacíos, no importa si la cantidad de estos están conectados o no, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

- Flexibilidad

Es la capacidad que tiene un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que éste se agriete, a movimientos y asentamientos progresivos de la subrasante. Se desea comúnmente que la flexibilidad esté presente en todo pavimento asfáltico debido a que todas las subrasantes se asientan o se expanden.

- Trabajabilidad.

Está puntualizada por la habilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado y su granulometría.

3.6. FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

Se presentará en forma resumida, las causas que originan fallas en los pavimentos flexibles, analizando así las distintas capas que lo componen como lo es, la sub-base, base y carpetas de riego. [11]

- Sub- base

En la sub- base se presentan fallas cuando hay mala calidad del material que se utilizó, cuando hubo baja compactación, cuando hubo escasez de espesor, y cuando el material que se usó se contaminó.

- **Base**

En la base se presentan fallas así mismo como en la sub-base mala calidad del material que se usó, cuando hubo baja compactación, cuando hubo escasez de espesor, cuando hay falta de afinidad del material pétreo con el asfalto de impregnación, también cuando la superficie no está limpia al momento de impregnar y por defectos en la construcción o de acabados

- Carpetas de riego

Al igual que en las anteriores capas, la mala calidad de los materiales pétreos o granulométricos son causantes, también la falta de afinidad de los materiales pétreos con el asfalto, la cantidad escasa de materiales pétreos, materiales pétreos con exceso de humedad al momento de la aplicación, el tránsito también afecta, y los defectos de construcción de la carpeta.

3.7. PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (*Recycled Asphalt Paviment* (RAP))

Se denomina pavimento asfáltico reciclado a los materiales de pavimento los cuales están compuestos por cemento asfáltico y agregados los cuales son removidos y reprocesados, este tipo de pavimento tiene como finalidad ser implementado en el diseño de mezclas asfálticas. este material procede del fresado del pavimento el cual consiste en la remoción de asfalto de carreteras con características desfavorables (carreteras en mal estado, agrietado, agotado o fisurado).

El pavimento asfáltico reciclado es enviado a una planta trituradora donde se procede a la selección y separación entre materiales finos y gruesos para poder

determinar las granulometrías correspondientes, este tiene dos formas de caracterización diferentes [12]

- **Caracterización granulométrica del RAP (Recycled Asphalt Paviment)**

Consiste en compararlo con otros agregados que se utilizan en otro tipo de mezclas

- **Caracterización del Asfalto Recuperado del RAP (Recycled Asphalt Paviment)**

Consiste en establecer el grado de oxidación del asfalto de la mezcla, su resultado es conocer su envejecimiento de la mezcla al momento del fresado.

Tabla 1. *Granulometrías admisibles para reciclaje de pavimento asfáltico*

Tamiz		Porcentaje que pasa
[mm]	U.S. Estándar	(%)
37.5	1 ½ “	100
25.0	1”	75-100
19.0	¾”	65-100
9.5	3/8”	45-75
4.75	N° 4	30-60
2.00	N° 10	20-45
0.425	N° 40	10-30
0.075	N° 200	05-20

Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), Especificaciones técnicas. Artículo 450, Sección 454.1.

3.8. TÉCNICAS DE RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO

Las técnicas que se mencionan a continuación se basan en la reutilización de los materiales de pavimentos en malas condiciones a los cuales se les puede añadir elementos que actúan como agentes rejuvenecedores, mezcla bituminosa, entre otros.[13]

- Reciclado in situ en caliente

Se reutilizan los materiales de la estructura envejecida mediante un tratamiento a altas temperaturas en el lugar de la obra, se calienta mediante unos quemadores y este material se mezcla con agentes químicos rejuvenecedores y con nueva mezcla, que al final se extiende y compacta según el espesor requerido.

- Reciclado in situ en frío con cemento

Procedimiento que se fundamenta en el fresado en frío de un cierto grosor del pavimento envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico como el cemento utilizado normalmente. El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos.

- Reciclado in situ en frío con emulsiones bituminosas

Esta técnica, reutiliza la totalidad de los materiales extraídos del pavimento envejecido. El procedimiento usual y básico consiste en el fresado en frío de cierto espesor del pavimento, este material se mezcla con una proporción determinada de emulsión y otros aditivos. El nuevo material se extiende y se compacta, seguido del curado de la capa reciclada y por último la extensión de una capa delgada de rodadura a base de mezcla caliente.

- Reciclado en planta

Este procedimiento permite reciclar el conjunto o una cierta proporción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada. Al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales.

3.9. ENVEJECIMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

El tiempo de envejecimiento de las mezclas asfálticas en un gran fenómeno que afecta el deterioro de las mismas, su principal característica es el endurecimiento del asfalto. También intervienen otros mecanismos los cuales corresponden a cambios de orden mecánico, físico, químico entre otros. El envejecimiento de mezclas asfálticas se divide en envejecimiento a corto plazo y envejecimiento a largo plazo.[14]

- Envejecimiento a corto plazo

Se produce durante su fabricación, mezclado transporte e implantación de la mezcla asfáltica. Inicia en la preparación de la mezcla donde principalmente el betún asfáltico es el primero en envejecer. Se debe por el incremento de temperatura en el betún asfáltico para realizar la mezcla. El betún a altas temperaturas (160°C) al entrar en contacto con los áridos calientes de la mezcla (200-250°C) y cubriéndose con una película delgada, produce pérdidas de volátiles, la oxidación y el betún será atraído por los áridos, este proceso se denomina endurecimiento exudativo.

Cuando la mezcla es transportada puesta en obra, se realiza su debida compactación; estos procesos se producen, pero a un ritmo más lento. El envejecimiento se produce gradualmente hasta que el gradiente de envejecimiento y viscosidad del material se vuelve despreciable.

- Envejecimiento a largo plazo

Se denomina al proceso de oxidación del betún durante su vida útil en servicio. Su afectación se debe a factores ambientales como la temperatura, las condiciones del sector, humedad, la radiación Ultravioleta, la carga aplicada, entre otros.

El envejecimiento a largo plazo es generado por un incremento de viscosidad y rigidez de la mezcla asfáltica. La vida útil de las capas superiores de las mezclas asfálticas varía entre 7 a 10 años, y las capas base se espera un periodo de vida útil de 20 años.

Entre las variables que intervienen en el envejecimiento de las mezclas asfálticas se clasifican en variables intrínsecas y variables extrínsecas.

- Variables intrínsecas

Relacionadas con las características internas de la mezcla (materiales y características de fabricación).

- Variables según el material

Según el material se tiene betún asfáltico, agregado grueso y agregado fino.

- Variables según las características de fabricación

Espesor de la película de betún asfáltico y el contenido de huecos son las variables que se tienen.

- Variables extrínsecas

Relacionadas con las características a las que está expuesta la mezcla asfáltica, factores ambientales, mecánicos, dinámicos, entre otros como la temperatura y la radiación solar.

Una carpeta asfáltica requiere de su remoción y cambio cuando presenta fallas como lo puede ser la piel de cocodrilo, las grietas entre otras afecciones, esto generalmente se debe a que el material es de mala calidad, a su envejecimiento y al mal diseño de la mezcla. De esa remoción nace la idea de reutilizarlo y estudiar su comportamiento mecánico puesto que este ayuda tanto económicamente como ambientalmente y también a la resistencia que puede tener al ser usado como un agregado que favorezca la mezcla asfáltica.

3.10. ESCORIAS DE ACERO

La escoria de acero es un material derivado de la fundición de chatarra en conjunto con mineral de hierro, pre-reducidos, ferroaleaciones, cal, espato-flúor, coke y oxígeno la cual es introducida en horno de arco eléctrico, posee grandes propiedades como agregados para implementar en las mezclas asfálticas. Es producida durante la separación del acero fundido de impurezas.

Las escorias de horno de arco eléctrico han sido implementadas principalmente en vías ya que presenta propiedades como su alto coeficiente de roce el cual ayuda a estabilizar y aumentar la fricción y agarre entre los neumáticos de los vehículos y el pavimento.[15]

3.10.1. Propiedades de las escorias

3.10.1.1. Propiedades físicas y mecánicas

La escoria negra de horno de arco eléctrico tiene un color gris oscuro debido al porcentaje de hierro presente en el material, existen tres métodos de extracción los cuales definen las características de la misma.

- El material se extiende directamente en el suelo y se adiciona agua para su solidificación la cual facilita su extracción y transporte. Presenta un aspecto poroso de tamaño pequeño y en estado vítreo.

- Se introduce en un cono de fundición el cual se coloca debajo del horno de arco eléctrico y se procede a su enfriamiento vertiéndose en una fosa. El material presenta un aspecto más liso y uniforme y a su vez cristalino.

- Su enfriamiento es directamente en el cono de fundición, el proceso de enfriamiento es más lento, su aspecto es cristalino, liso, se solidifica moldeándose a la forma del cono de fundición formando un sólido compacto.

El método de extracción más eficiente es por medio de enfriamiento por agua ya que su granulometría y su aspecto benefician su comportamiento, al ser más poroso en pequeñas fracciones aumenta su adherencia con otros agregados.[15]

***Tabla 2**. Propiedades físicas de las escorias de acero*

PROPIEDAD FÍSICA	VALOR
Gravedad específica	3.2 – 3.6
Peso unitario (kg/m3)	1600 – 1920
Absorción	3%

Fuente: Segura A.3.1 Características físicas de la escoria de Acería. Tabla 3, Pág. 36.

Tabla 3. *Propiedades Mecánicas Típicas de la Escoria de Acero*

PROPIEDAD MECÁNICA	VALOR
Abrasión máquina de los ángeles	20% – 25%
Desintegración sulfato de sodio	<12%
Angulo de fricción interna	40° - 50°
Dureza (escala de Mohs)	6 - 7
CBR	<3000

Fuente: Segura A,3.1. Características físicas de la escoria de acería, Tabla 4, Pág. 37.

3.10.1.2. Propiedades químicas

Su composición química se debe al tipo de chatarra utilizada, el material y sus porcentajes representados en la siguiente tabla.[16]

Tabla 4. *Propiedades Químicas de la Escoria de Acero*

COMPONENTE	%
CaO	22-60
SiO_2	11-37
FeO	0.5-4
Fe_2O_3	38

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

MgO	4-12
Cr_2O_3	1-8
TiO_2	0.6-2
MnO	1-4
AlO_3	2-8
P_2O_6	0-0.2

Fuente: Ficha técnica, Escorias de acería de horno de arco eléctrico, Tabla 2, composición química de la escoria de acería, Pág. 3.

USOS:

Mezclas asfálticas

Mejora el desempeño de la mezcla con respecto a los convencionales tales como la alta resistencia al deslizamiento durante su vida útil; la mezcla permanece con su color lo cual beneficia la visibilidad de la señalización vial; aumenta la retención de altas temperaturas lo cual beneficia su manipulación e implantación; aumento de la estabilidad Marshall, disminuye considerablemente la presencia de posibles fallas y ahuellamiento.

Tratamientos superficiales

Disminuye la posibilidad de patinaje ya que aumenta el roce, genera agarre de los neumáticos de los vehículos con el pavimento, su coloración no se opaca lo cual beneficia la visibilidad de la señalización vial, excelente adherencia ya que no genera desprendimiento del tratamiento ante las cargas y desgaste emitido por el tráfico; sus características son constantes como su forma irregular y su textura lo cual aumenta su resistencia al pulimento.

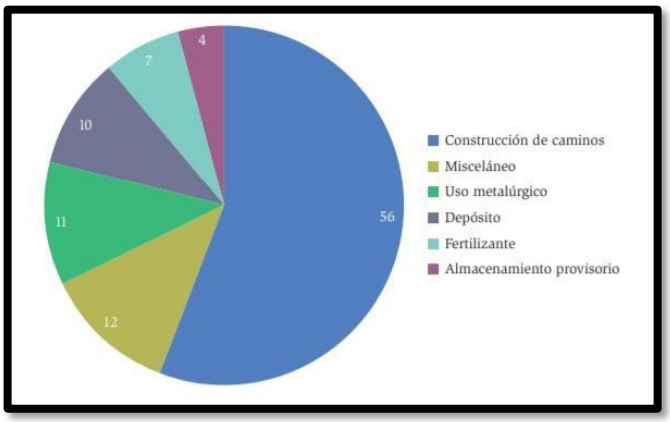
Bases granulares

De acuerdo a sus propiedades físicas, mecánicas y químicas, las escorias de acero de horno de arco eléctrico es el mejor agregado para implementarlo en bases granulares ya que el impacto económico es muy bajo a comparación con otros agregados; las escorias tienen un CBR de 150% a 300% lo cual genera mayor durabilidad por efecto de cargas a comparación de agregados pétreos convencionales los cuales tienen un CBR de 85% a 100%; su comportamiento es óptimo ante el efecto del agua donde no presenta fracción fina plástica; reduce el espesor de pavimentos asfálticos.

3.10.1.3. Usos e impacto ambiental

De acuerdo a diferentes investigaciones que se ha realizado respecto a la ingeniería sustentable, La industria siderúrgica genera unos 400 Mt/año de escoria (incluyendo la escoria de alto horno). En las acerías el mayor volumen corresponde a las escorias de convertidor; en segundo lugar, a las de los hornos eléctricos de arco. Inmediatamente se ubican las escorias de cuchara y las escorias de desulfuración de arrabio. La eficiencia en el uso de los materiales se basa en la reducción de los consumos específicos de materias primas y la generación de residuos y el uso eficiente de los coproductos y su reciclado interno (dentro de los procesos siderúrgicos) o externo (en otras industrias). Su uso refuerza la sustentabilidad de la industria, ya que ayuda a preservar los recursos naturales y reducir las emisiones de CO2. Algunas empresas informan sobre la utilización y/o reciclado de prácticamente la totalidad de estas escorias [17].

***Gráfica 1**. Usos escoria*



Fuente: Madías J. Reciclado de escorias de acería. Metallon, Argentina. Pág. 1.

Lo que indica el artículo la cantidad de escoria utilizada como fertilizante depende de las condiciones de mercado. Existen limitantes como las distancias para su transporte, debido a la fuerte competencia con los fertilizantes basados en piedras calcáreas. Las escorias con aplicación en la construcción de caminos con menos requerimientos sobre la calidad de los agregados (por ejemplo, capas no ligadas en calles y áreas de estacionamiento) compiten con otros productos industriales. Se requiere el desarrollo de nuevos procesos y mercados para que su utilización sea ya no como áridos, sino como elementos activos que pueden alcanzar propiedades puzolánicas (cementicos). El potencial de las escorias de acería aún no está totalmente explotado. El objetivo de los esfuerzos de los productores de acero es aumentar la utilización de la escoria mejorando sus propiedades y llevándola a ser un producto con características normalizadas, ya que todavía existe una cantidad de escoria que debe ser enviada a disposición final por diversas causas (tamaño, composición química) y que deberá ser minimizada en el futuro. [18]

3.11. MATERIAL GRANULAR

Los agregados pétreos son minerales inertes y duros, empleados en fragmentos para la construcción de pavimentos. Se utilizan también en la construcción de base y sub - base granular sirviendo como estructura de soporte a los pavimentos; a su vez, se combina en tamaños gruesos (gravas), tamaño fino (arenas) y una llenante mineral (filler). Se definen tres clases de capas granulares para base, que se denominan Clase A (BG_A), Clase B (BG_B) y Clase C (BG_C); también se definen tres clases de capas granulares para sub-base, que se denominan Clase A (SBG_A), Clase B (SBG_B) y Clase C (SBG_C). Los tipos (Base o Sub-base) y clases (A, B o C) de capas granulares por emplear en cada caso se establecerán en los documentos técnicos del proyecto, en función de la importancia de la vía, del nivel de tránsito, del tipo de pavimento y de la posición de la capa dentro de la estructura del pavimento. [19]

3.12. MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC)

Se define como mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante; este tipo de mezclas están conformadas por ligantes pétreos, ligante bituminoso, en algunos casos agua y

adiciones. Las cantidades de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla. Para el proceso de su fabricación se debe calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, una temperatura muy superior al ambiente, por último, esta mezcla es colocada en la obra donde se realiza re parcheo o donde se va a poner una mezcla asfáltica. Esta puede ser colocada como capa de base o de rodadura; la última capa tiene como responsabilidad brindar mayor durabilidad, comodidad y seguridad a los usuarios y además es la que va a soportar de manera completa las cargas aplicadas tanto verticales como las horizontales. Estas son usadas en muchas partes del mundo, debido a su flexibilidad, duración, uniformidad, resistencia a la fatiga y económicamente tiene gran beneficio, generando por ende investigaciones como el presente proyecto donde se desarrollan mejoras en sus propiedades mecánicas y dinámicas. Muchos de los procesos adelantados se han enfocado en el proceso constructivo de las carpetas de rodadura que la conforman, es por eso que se usan equipos costosos que mantienen la temperatura constante en el proceso de extendido y compactación de la misma.

Estas mezclas densas en caliente son utilizadas normalmente como carpeta de rodadura. Esto se obtiene por medio de una composición de agregados gruesos triturados, agregado fino y llenante mineral, uniformemente mezclados en caliente, con cemento asfáltico, en una planta que esté especializada, con métodos que permiten controlar y asegurar la correcta dosificación de los componentes, y por último en laboratorio para determinar así sus cualidades, existen diferentes tipos de mezcla que es densa, semidensa, gruesa, de alto módulo en el caso de la presente investigación se usarán densas que está dividida en MDC-25, MDC-19 y MDC-10. [20]

Figura 3. *Granulometrías típicas para mezclas densas en caliente*

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 ½"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
		% PASA									
DENSA	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

Fuente: Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Artículo 450. Mezclas asfálticas. Pág. 239.

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) define los tipos de mezclas densas en caliente, donde también a su vez especifica que se deben tener diferentes adiciones de agregados pétreos. También la selección del cemento asfáltico que se va a utilizar en una mezcla asfáltica en caliente está condicionada a dos parámetros de diseño que son; las características climáticas de la zona que se tiene y las condiciones de operación de la vía, estos son:

Figura 4. *Tipo de asfalto a emplear en mezclas asfálticas en caliente*

TIPO DE CAPA	NT 1			NT 2			NT 3		
	TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA REGIÓN (° C)								
	> 24	15-24	< 15	> 24	15-24	< 15	> 24	15-24	< 15
Rodadura e Intermedia	60-70	60-70 u 80-100	80-100	60-70	60-70 u 80-100	80-100	40-50 60-70 o Tipo II (a o b) o Tipo III	40-50 60-70 o Tipo II (a o b)	60-70 80-100 o Tipo IIb
Base	NA			60-70 u 80-100	60-70 u 80-100	80-100	60-70	60-70 u 80-100	80-100
Alto Módulo	NA			NA			Tipo V		

Fuente: Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 450. Pavimentos asfálticos. Tabla 450-8. Pág. 240.

El Instituto Nacional de Vías, establece como método para el diseño de mezclas densas en caliente el método de diseño de Marshall (I.N.V.E-748), se debe tener en cuenta los valores límites a los que están sujetas las características propias de las mezclas en caliente y así mismo se debe tener en cuenta el nivel de tránsito y el tipo de mezcla.

3.13. MÉTODO MARSHALL

El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejora y adiciona ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

diseño de mezclas. El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5"), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. [21]

El Método de diseño Marshall está regulado por la norma INVIAS 2013(I.N.V.E - 748 – 13), medidas que se refieren al procedimiento que debe emplearse para fijar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas para la pavimentación.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto- agregado (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad-análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.

4. METODOLOGIA DE INVESTIGACION

4.1. METODOLOGÍA

• Fase 1: Planear: Formulación del anteproyecto.

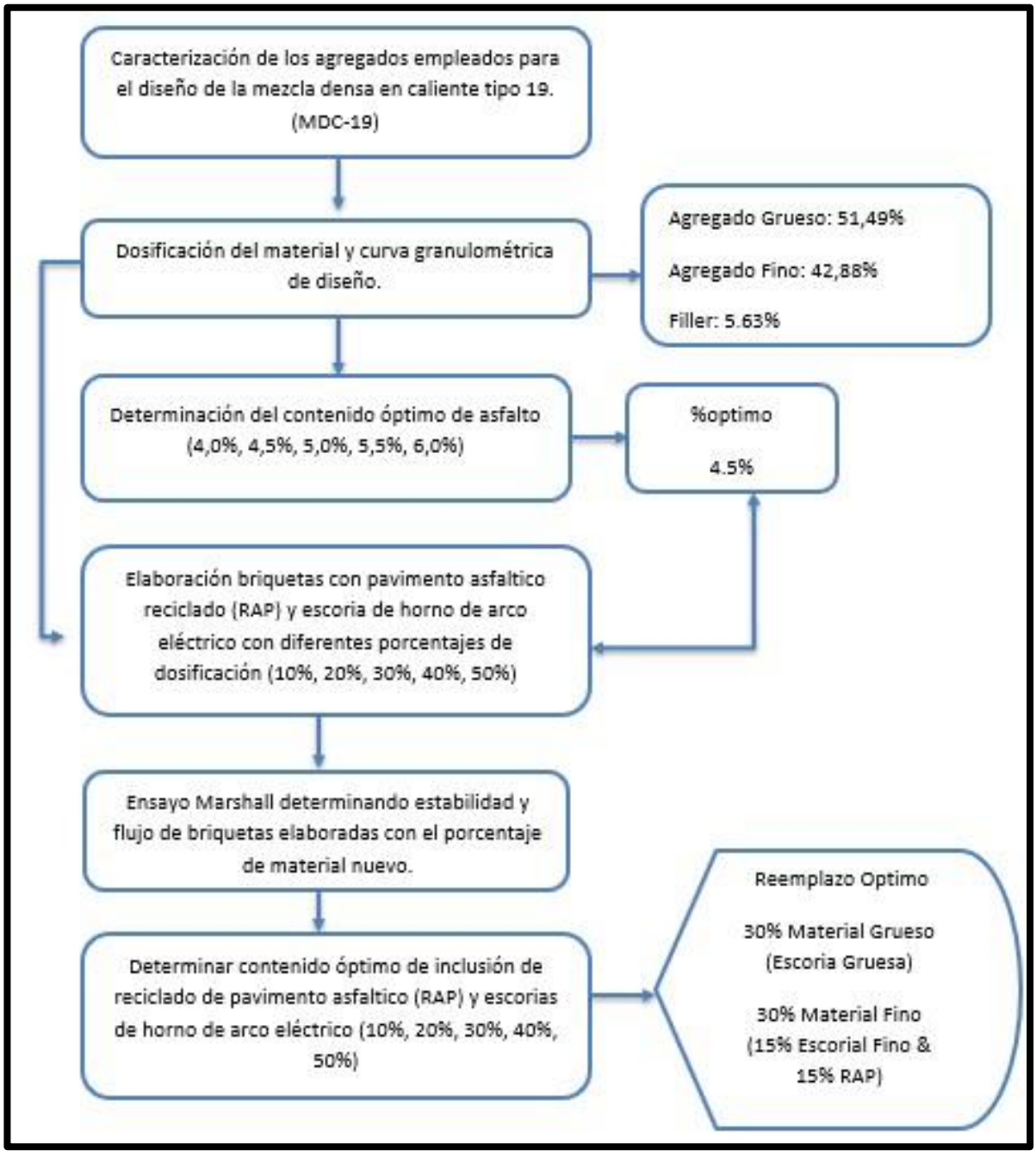
• Fase 2: Hacer: Ejecutar el cronograma.

• Fase 3: Verificar y Actuar: Verificar e interpretar los resultados, alcanzar los objetivos.

La metodología a trabajar en el desarrollo de la investigación se divide en tres etapas principales, en la primera etapa se realizó una recolección de la información y respectiva revisión bibliográfica que permitió la contextualización del tema para establecer el estado de arte oportuno al tema que se estudió.

En la segunda etapa se implementó una fase práctica donde se llevaron a cabo una serie de laboratorios que consisten en la determinación de la resistencia a la deformación plástica de especímenes de mezclas asfálticas para pavimentación, dicho procedimiento nombrado anteriormente se puede emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas, el método descrito es el que se indica en la sección 700 y 800- materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos INVE-748-13 que tiene como nombre estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo MARSHALL, el método también consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica las cuales son sometidas a curado en un baño de agua o en horno, y luego a carga en la prensa de Marshall bajo condiciones normalizadas, determinando su estabilidad y deformación, como la información que se obtiene con este ensayo es para ser empleado en el diseño de mezcla asfáltica, los resultados de estabilidad y flujo se deben obtener promediando los valores que se obtienen con un mínimo de tres especímenes para cada contenido de ligante asfáltico [22].

Figura 5. *Fase dos de la metodología de investigación*



Fuente: Autores

Finalmente, en la tercera etapa se analizarán los resultados obtenidos y se evaluará la influencia que tiene la variación del contenido de asfalto en el comportamiento mecánico de una mezcla densa en caliente fabricada con RAP y escorias de arco eléctrico.

4.2. MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales empleados en el presente proyecto de investigación son provenientes de Gerdau Diaco, ubicada en el kilómetro 7 vía Tuta, Boyacá y de la planta de asfalto Tecniasfaltos Benítez C. Ingenieros, ubicada en la vía Tunja Villa de Leyva, Boyacá. En el segundo lugar se verifico que el material conseguido cumpliera con los requisitos necesarios para una mezcla densa en caliente tipo 19 (MDC-19).

4.2.1. Ensayos Realizados al Material Granular

4.2.1.1. Equivalente de Arenas de Suelos y Agregados Finos I.N.V E-133

Este ensayo determina bajo condiciones normales las proporciones de arena y de material con apariencia arcillosa. También se puede especificar un valor mínimo del equivalente de arena, todo eso con el fin de poder limitar la cantidad de finos en un agregado y sobre todo en la mezcla que se pretendía realizar.

Para poder determinar el equivalente de arena la fórmula es:

$$E\text{\textdiamond\textdiamond} = \frac{\text{\textdiamond\textdiamond\textdiamond\textdiamond\textdiamond}\,a\ \text{\textdiamond\textdiamond}\ A\text{\textdiamond\textdiamond\textdiamond}a}{\text{\textdiamond\textdiamond\textdiamond\textdiamond\textdiamond\textdiamond}a\ \text{\textdiamond\textdiamond}} * 100 \quad [23]$$

$$A\text{\textdiamond\textdiamond}illa$$

Figura 6. *Preparación material Equivalente de Arenas*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

Figura 7*. Maquina Agitadora*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

4.2.1.2. Análisis granulométrico de agregados grueso y fino I.N.V.E-213

Este ensayo tiene como objeto determinar la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados que se usan, tanto para gruesos como para finos de un material, todo esto por medio de tamizados que se determinan de acuerdo a la mezcla asfáltica. Se realizo el debido lavado y secado de la muestra donde posteriormente se realizó el tamizado para así saber qué porcentaje de agregados gruesos y finos se tenía del material para después hacer la curva de diseño granulométrica de cada material.

***Figura 8**. Tamizado material*

Fuente: Autores

Lugar: Universidad Santo Tomás Seccional Tunja.

***Figura 9.** Lavado de materia*

Fuente: Autores

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

4.2.1.3. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½”) por medio de la Máquina de los Ángeles I.N.V.E- 218

El presente ensayo tiene como fin medir la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica previamente definida, donde en un tambor de acero rotatorio se obtiene como resultado cierta combinación de acciones que incluyen; abrasión, impacto y molienda, esto permitirá indicar la calidad relativa o la competencia de diferentes agregados pétreos similares de composiciones mineralógicas.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

***Figura 10**. Máquina de los Ángeles*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

En el proceso del ensayo se debían tener en cuenta la granulometría de las muestras ensayadas y con la granulometría que se tenía se iba a determinar el método a emplear y el número de esferas que se usarían para así poder determinar el % de pérdidas del agregado por abrasión e impacto.

$$\% P\text{\textcircled{?}}\text{\textcircled{?}}\text{\textcircled{?}}i\text{\textcircled{?}}\text{\textcircled{?}}\text{\textcircled{?}}\text{\textcircled{?}} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100 \quad [24]$$

Donde:

P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo (g).

P2: Masa de la muestra seca después del ensayo (g).

ISO 9001 icontec SC4289-1
IQNet CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

Figura 11. *Carga*

GRANULOMETRÍA	NÚMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA, g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Sección 200, Agregados Pétreos. I.N.V.E- 218. Equipos. Pág. 77.

El tamaño nominal máximo de la muestra es de ½" por ende el método que se usa es el B segun la norma INVIAS, el peso inicial de la muestra fue de 5000g.

Figura 12. *Granulometrías Muestra de Ensayo*

TAMAÑOS DE TAMIZ		MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES, g			
		GRANULOMETRÍAS			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	A	B	C	D
37.5 (1½")	25.0 (1")				
25.0 (1")	19.0 (3/4")	1250 ± 25			
19.0 (3/4")	12.5 (½")	1250 ± 25			
12.5 (½")	9.5 (3/8")	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5 (3/8")	6.3 (¼")	1250 ± 10	2500 ± 10	2500 ± 10	
6.3 (¼")	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: Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Sección 200, Agregados Pétreos. I.N.V.E- 218. Preparación de la Muestra. Pág. 77.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

Figura 13. *Esferas de acero*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

4.2.1.4. Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados I.N.V.E-227

Este ensayo determina el agregado pétreo que presenta una o más caras fracturadas expresada en unidades de masa (g, kg); para la muestra de ensayo se tiene en cuenta el tamaño máximo nominal estableciendo la masa mínima de la muestra.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

Figura 14. *Masa de la Muestra de Ensayo*

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL mm (pulgadas)	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA g (lb aprox.)
9.50 (3/8)	200 (0.5)
12.5 (½)	500 (1.0)
19.0 (¾)	1500 (3.0)
25.0 (1)	3000 (6.5)
37.5 (1 ½)	7500 (16.5)
50.0 (2)	15 000 (33.0)
63.0 (2 ½)	30 000 (66.0)
75.0 (3)	60 000 (132.0)
90.0 (3 ½)	90 000 (198.0)

Fuente: Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Sección 200, Agregados Pétreos. I.N.V.E- 227. Preparación de la Muestra. Pág. 161.

Se determino el porcentaje de caras fracturadas con las que cuenta el material, mediante la siguiente formula:

$$P = \frac{F}{F+N} * 100$$

[25]

Donde:

P: Porcentaje de partículas con el numero especificado de caras.

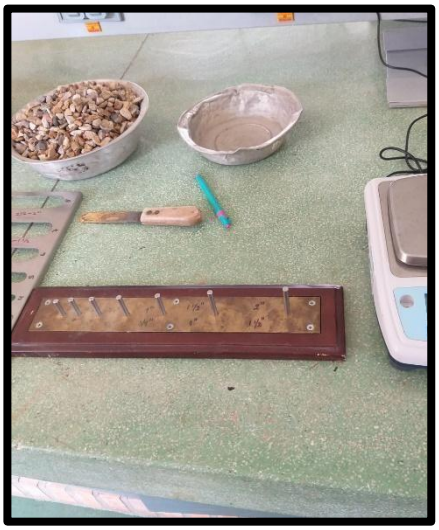
F: Masa o número de partículas fracturadas con, al menos el número de aras fracturadas especificado.

N: Masa o número de partículas en la categoría de no fracturadas que no cumplen con el criterio de partículas fracturadas.

4.2.1.5. Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras I.N.V.E – 230

Este ensayo describe detalladamente el procedimiento que se debe seguir, para la determinación de relaciones tanto de aplanamiento como de alargamiento de los agregados que se tienen destinados para la realización de la mezcla asfáltica que se implementara en la construcción de vías.

Figura 15. *Calibrador de Longitudes*



Lugar: Universidad Santo Tomás Seccional Tunja.

Figura 16. *Calibrado de Espesores*

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

El índice de aplanamiento global se calcula con la siguiente formula:

$$IA = \frac{\text{□□□□a T □□□□l}}{\text{□□□□a □□ □□□□□□□□ □□l□□□□□□□□□}} * 100 \quad [26]$$

El índice de alargamiento global se calcula con la siguiente formula:

$$IA = \frac{\text{□□□□a T □□□□l}}{\text{□□□□a □□ □□□□□□□□ □□l□□□g□□□□□□□}} * 100 \quad [27]$$

4.2.1.6. Determinación de la Resistencia del Agregado Grueso a la Degradación por Abrasión, Utilizando el aparato Micro- Deval I.N.V.E – 238

Este ensayo tiene como objetivo principal describir el procedimiento para medir la resistencia a la abrasión de un material grueso utilizando el aparato Micro-Deval.

***Figura 17**. Adición material*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

El procedimiento costa principalmente en dejar la muestra en un recipiente cilíndrico de abrasión del Micro-Deval con 5000 g de esferas de acero y con agua para así saturar la muestra calculando el porcentaje de perdías por abrasión Micro-Deval.

***Figura 18**. Adición de esferas cilíndricas*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

5. FASE EXPERIMENTAL

En la fase experimental de la presente investigación se utilizó un cemento asfaltico con penetración 60-70, se caracterizó identificando sus propiedades físicas, tomando como punto de referencia los ensayos que se presentan en el Instituto Nacional de Vías. Para la caracterización del agregado pétreo se realizó de acuerdo a las especificaciones generales que presenta el INVIAS en el diseño de carreteras dispuesto en el capítulo 4, en el artículo 450 “Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua (Concreto Asfaltico). El material granular usado fue adquirido de TECNIASFALTOS. Posteriormente se determinaron los porcentajes de asfalto 4%, 4.5%, 5.5%, 6% (AC 60-70) y como porcentaje de cambio de material 10%, 20%, 30%, 40%, 50% para la dosificación de las briquetas.

Lo que se pretende es elaborar mezclas densas en caliente tipo MDC-19 modificadas, tomando como referencias las especificaciones del INVIAS con respecto a la granulometría de los materiales, para eso se ejecutó el tamizado y la clasificación del material, con el fin de obtener porcentajes para cada tamaño y así graficar la curva granulométrica respectiva y finalmente obtener la dosificación óptima de cada material para poder realizar adecuadamente las briquetas. Después se realizó el diseño MARSHALL que el INVIAS estipula en el capítulo 4, determinando así las deformaciones flujo, estabilidad, para después hacer el respectivo análisis de resultados.

5.1 PROCEDIMIENTO

5.1.1 Ensayo Marshall (I.N.V. E-748) concreto asfaltico

- Se clasifica el material de acuerdo a la granulometría realizada.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

Figura 19. *Granulometría Material*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

- Se clasifica el material granular junto con la escoria y el RAP para las briquetas a realizar.

Figura 20. *Clasificación material granular*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

Figura 21. *Clasificación material granular*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

Luego de tener el material preparado, se procede a la elaboración de las briquetas; donde se realiza la mezcla del asfalto con el material granular y el porcentaje de cambio de escoria y de RAP para cada briqueta; para todas se usó el mismo porcentaje de asfalto óptimo (4,5%). Se unen uniformemente los materiales a la temperatura que establece el procedimiento del método Marshall del INVIAS; posteriormente se compacta aplicando 75 golpes por cada cara de la briqueta; se remueve la base y los discos del molde y se deja enfriar la muestra para posteriormente desmoldar sin que se deforme y pasarla a la maquina Marshall para determinar la estabilidad y flujo.

Figura 22. *Calentamiento del Asfalto*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

- Se calienta el asfalto para tener mayor manejabilidad del mismo y poder agregar el porcentaje establecido.

***Figura 23**. Peso muestra con asfalto*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

***Figura 24.** Mezcla del material*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- Luego de obtener los porcentajes tanto de asfalto óptimo como del material granular se procede a la elaboración de 51 briquetas de 1200 gramos aproximadamente.

- Se realizaron 15 briquetas con una mezcla asfáltica convencional para así poder determinar el porcentaje de asfalto optimo.

Figura 25. *Muestra de briqueta con mezcla convencional*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

- Teniendo el porcentaje optimo se procede a realizar las briquetas restantes con los diferentes porcentajes de cambio de material granular.

-Antes de fallar las briquetas se deben sumergir en baño maría.

Figura 26*. Baño María Briquetas*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

Figura 27. *Maquina Marshall*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Teniendo los resultados de estabilidad y flujo se procede a hacer el análisis y conclusiones de los mismos.

Figura 28. *Briquetas Falladas con la Maquina Marshall*

Fuente: Autores
Lugar: Universidad Santo Tomas, Seccional Tunja.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 CARACTERIZACION MATERIAL GRANULAR

De acuerdo con el instituto nacional de vías (INVIAS) en el artículo 450 titulado MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRADACIÓN CONTINUA, tabla 450-3 se observa los requisitos de los agregados para ese tipo de mezclas teniendo en cuenta el nivel de tránsito y el tipo de capa a realizar, en este caso es capa de rodadura.

Los ensayos que se realización para dicha caracterización corresponden a desgaste de máquina de los ángeles, degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, equivalente de arena, partículas planas y alargadas, caras fracturadas.

***Figura 29**. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua*

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO		
		NT1	NT2	NT3
Dureza, agregado grueso (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones - Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones	E-218	25/35/- 5/7/-	25/35/35 5/7/7	25 / 35 / 35 5/7/7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base	E-238		25/30/30	20/25/25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínima (%)	E-224			110/90/75 75/75/75
Coeficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	0.45	0.45	0.45
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	18	18
Limpieza, agregado grueso (F)				
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5	0.5	0.5
Limpieza, gradación combinada (F)				
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)	E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Geometría de las partículas, agregado grueso (F)				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%) - Una cara: rodadura / intermedia / base - Dos caras: rodadura / intermedia / base	E-227	75/60/- -/-/-	75/75/60 60/-/-	85/75/60 70/-/-
Geometría de las partículas, agregado fino (F)				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base	E-239	40/35/-	45/40/35	45/40/35
Adhesividad (O)				

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) capitulo 4. art 450. Tabla 450-3, Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Pág. 237.

ISO 9001 icontec SC4289-1
IQNet
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Vigencia por seis años

6.1.1. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores a 37.5mm (1½ “) por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218).

Se determinó un porcentaje de pérdidas de material granular grueso (grava) de 24.846% donde se concluye que el material es óptimo y está en buenas condiciones para ser utilizado en la mezcla asfáltica. Por otra parte, para el material nuevo se determinó un porcentaje de pérdidas de material granular grueso (escoria) de 18.824% donde se concluye que el material es óptimo y está en buenas condiciones para ser utilizado en la mezcla asfáltica.

***Tabla 5**. Verificación del Ensayo máquina de los ángeles.*

CARACTERISTICA			% INVIAS	%	VERIFICACION
DUREZA, AGREGADO GRUESO	AGREGADO GRUESO (GRAVA)	DESGASTE MAQUINA DE LOS ANGELES	25	24,846	CUMPLE
	AGREGADO GRUESO (ESCORIA)	DESGASTE MAQUINA DE LOS ANGELES	25	18,824	CUMPLE

Fuente: autores.

6.1.2. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval (INV.E-238).

Mediante este ensayo se determinó un porcentaje de pérdidas al material granular grueso (grava) de 24.7% el cual demuestra un porcentaje óptimo de pérdidas para ser implementado en la mezcla asfáltica; así mismo se determinó un porcentaje de pérdidas al material nuevo (escoria) de 22.4% donde se evidencia un porcentaje óptimo de pérdidas para su implementación en la mezcla asfáltica.

***Tabla 6.** Verificación del Ensayo Micro-Deval*

CARACTERISTICA			% INVIAS	%	VERIFICACION
DUREZA, AGREGADO GRUESO	AGREGADO GRUESO (GRAVA)	DEGRADACION POR ABRASION EN EQUIPO MICRO-DEVAL	25	24,7	CUMPLE
	AGREGADO GRUESO (ESCORIA)	DEGRADACION POR ABRASION EN EQUIPO MICRO-DEVAL	25	22,4	CUMPLE

Fuente: autores.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

6.1.3. Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV. E-133).

Para este ensayo se realizaron 3 probetas teniendo como resultado un porcentaje de 59% de equivalente de arena el cual cumple con el porcentaje mínimo establecido con el instituto nacional de vías INVIAS.

***Tabla 7**. Verificación del Ensayo Equivalente De Arena*

CARACTERISTICA			% INVIAS	%	VERIFICACION
LIMPIEZA GRADACION	AGREGADO FINO	EQUIVALENTE DE ARENA MINIMO	50	59	CUMPLE

Fuente: autores.

6.1.4. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos (INV.E-240)

Teniendo en cuenta el porcentaje admisible máximo para este ensayo, se obtuvo un porcentaje de caras largas y planas de 6.83% para material grueso convencional (grava) y de 5.45% para material nuevo como agregado grueso (escoria). Este porcentaje del material es óptimo para poder ser utilizado en la mezcla asfáltica.

***Tabla 8.** Verificación del Porcentaje caras largas y planas*

CARACTERISTICA			% INVIAS	%	VERIFICACION
GEOMETRIA DE LAS PARTICULAS, AGREGADO GRUESO	AGREGADO GRUESO (GRAVA)	PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS AGREGADO	10	6,83	CUMPLE
	AGREGADO GRUESO (ESCORIA)	PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS AGREGADO	10	5,45	CUMPLE

Fuente: autores.

6.1.5. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV. E-227)

Se determinó un porcentaje de 99.65% de partículas fracturadas en el agregado grueso (grava) donde se concluye que el material es óptimo y está en buenas condiciones para ser utilizado en la mezcla asfáltica. Por otra parte, para el material nuevo se determinó un porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso (escoria) de 100% donde se concluye que de acuerdo con sus características físicas el material es óptimo y está en buenas condiciones para ser utilizado en la mezcla asfáltica.

Tabla 9. *Verificación de Partículas fracturadas*

CARACTERISTICA			% INVIAS	%	VERIFICACION
GEOMETRIA DE LAS PARTICULAS, AGREGADO GRUESO	AGREGADO GRUESO (GRAVA)	PARTICULAS FRACTURADAS	75	99,65	CUMPLE
	AGREGADO GRUESO (ESCORIA)	PARTICULAS FRACTURADAS	75	100	CUMPLE

Fuente: autores.

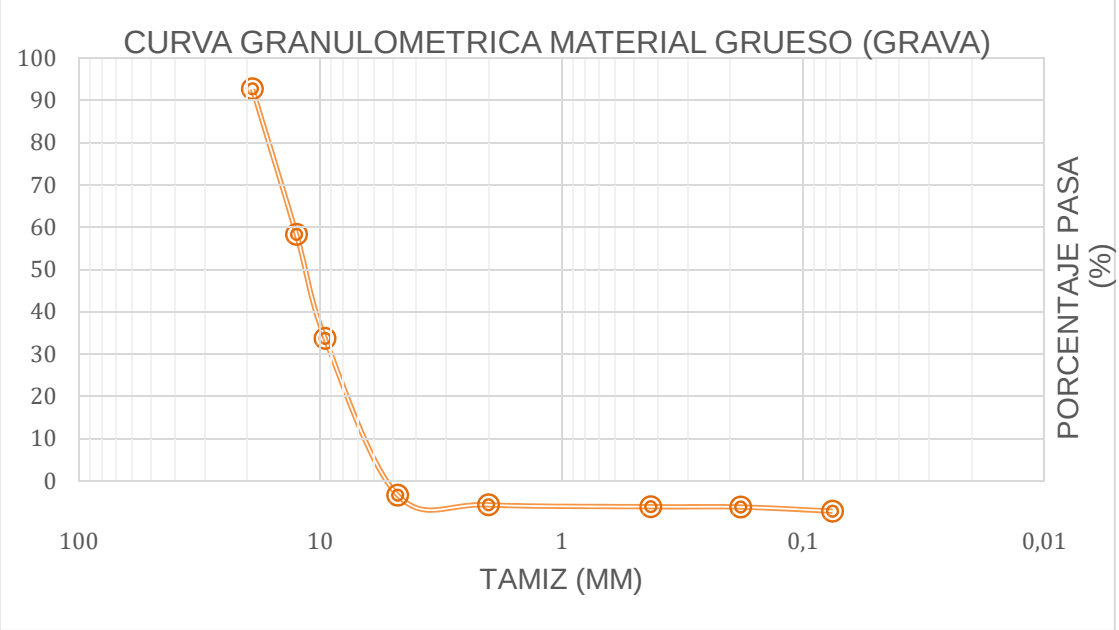
6.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Se realizó el respectivo análisis granulométrico de los diferentes materiales (grava, arena, escoria gruesa, escoria fina, RAP) dando como resultado el porcentaje de agregado grueso y agregado fino que compone cada material.

6.2.1. Curva granulométrica grava (tamaño máximo nominal ½")

En la gráfica 2 se observa el porcentaje de material granular grueso, donde se evidencia la falta de agregado fino el cual corresponde a una grava mal gradada.

Gráfica 2*. Granulometría agregado grueso*

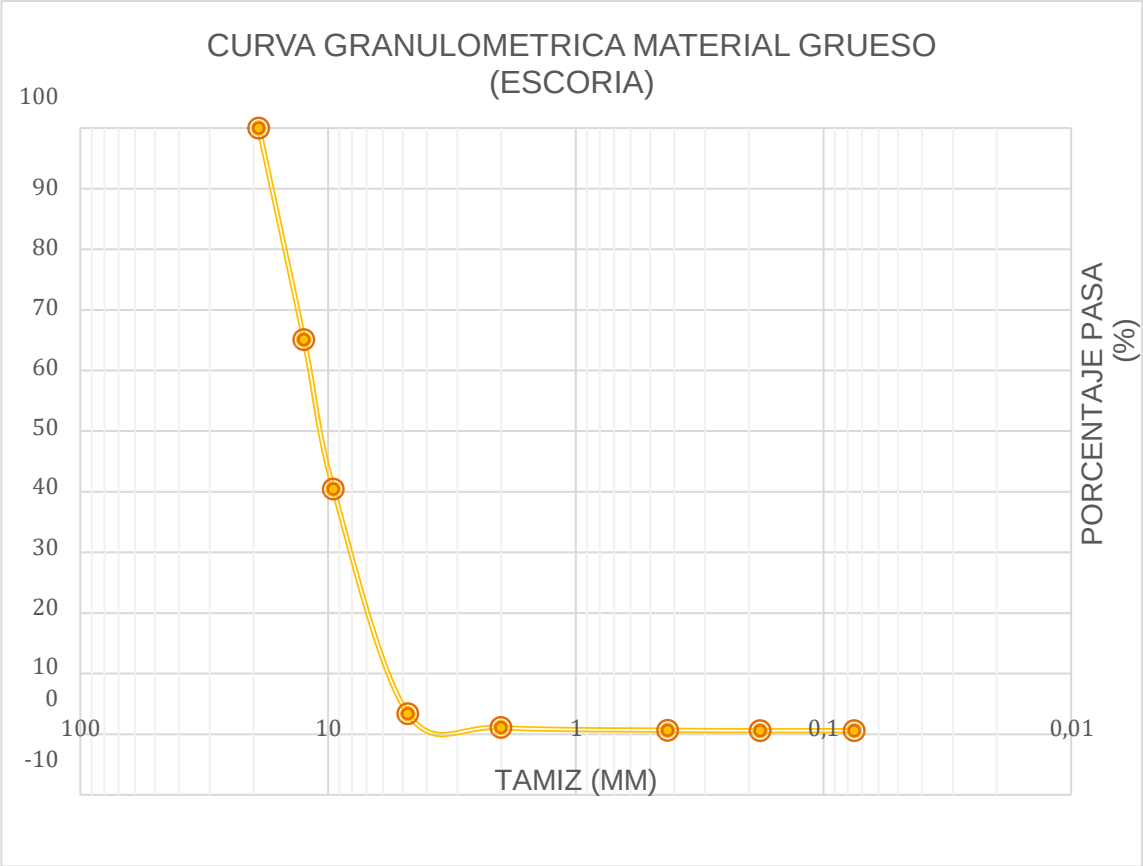


Fuente: autores.

6.2.2. Curva granulométrica escoria (tamaño máximo nominal ½")

En la gráfica 3 se observa el porcentaje de escoria como agregado grueso, donde se evidencia la falta de finos debido a su tamizaje y su extracción como desecho de horno de arco eléctrico.

Gráfica 3. *Granulometría agregado grueso (escoria)*

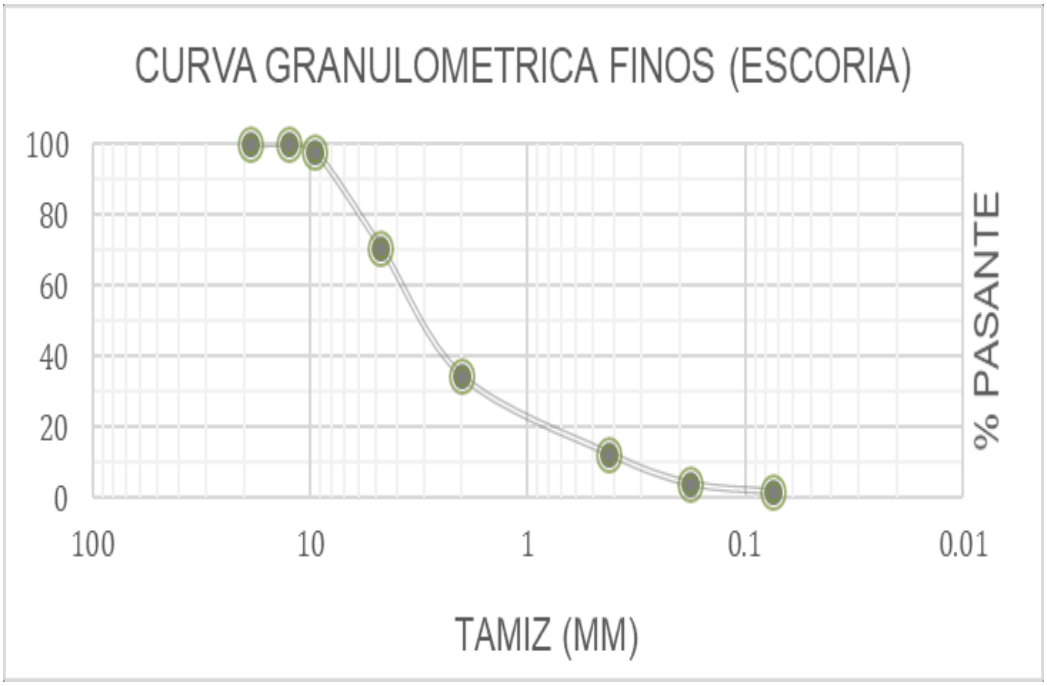


Fuente: autores.

6.2.3. Curva granulométrica agregado fino (escoria)

En la gráfica 4 se observa una curva granulométrica óptima en su gradación para ser implementada como agregado fino en la dosificación de la mezcla asfáltica. Es equitativo el material fino y grueso.

Gráfica 4. *Granulometría agregado fino (escoria)*

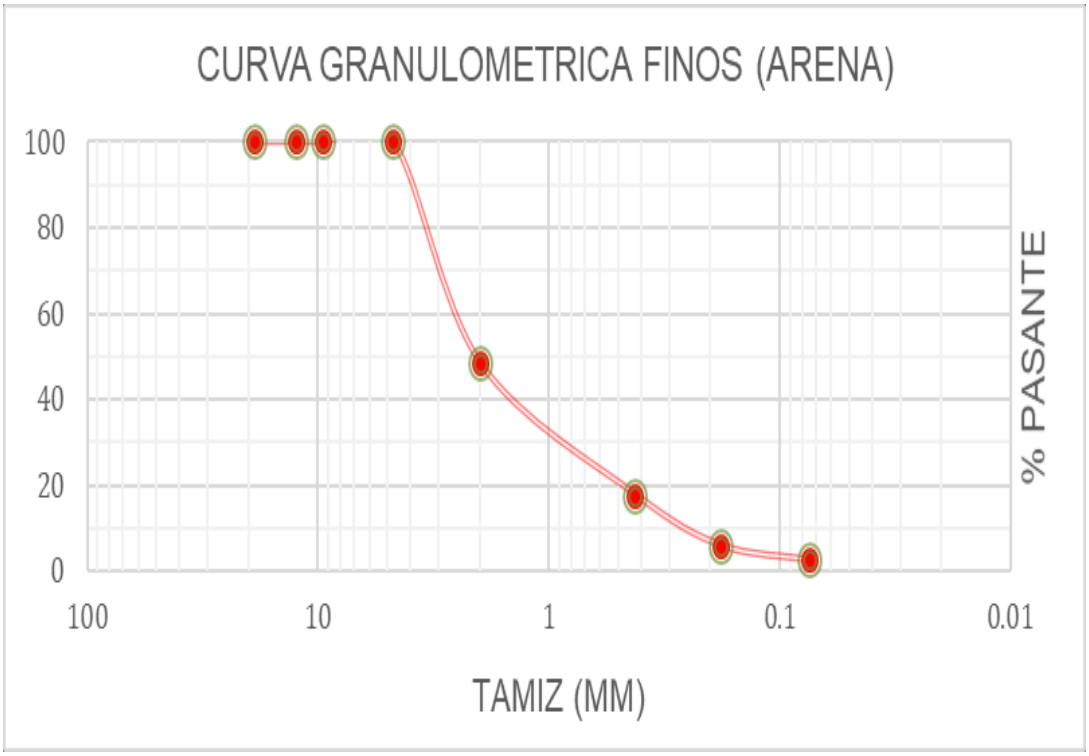


Fuente: autores.

6.2.4. Curva granulométrica agregado fino (arena)

En la gráfica 5 se evidencia el porcentaje de fino que pasa por cada tamiz donde se demuestra la falta de agregado grueso lo cual corresponde a una arena mal gradada.

***Gráfica 5**. Verificación agregado fino (arena)*

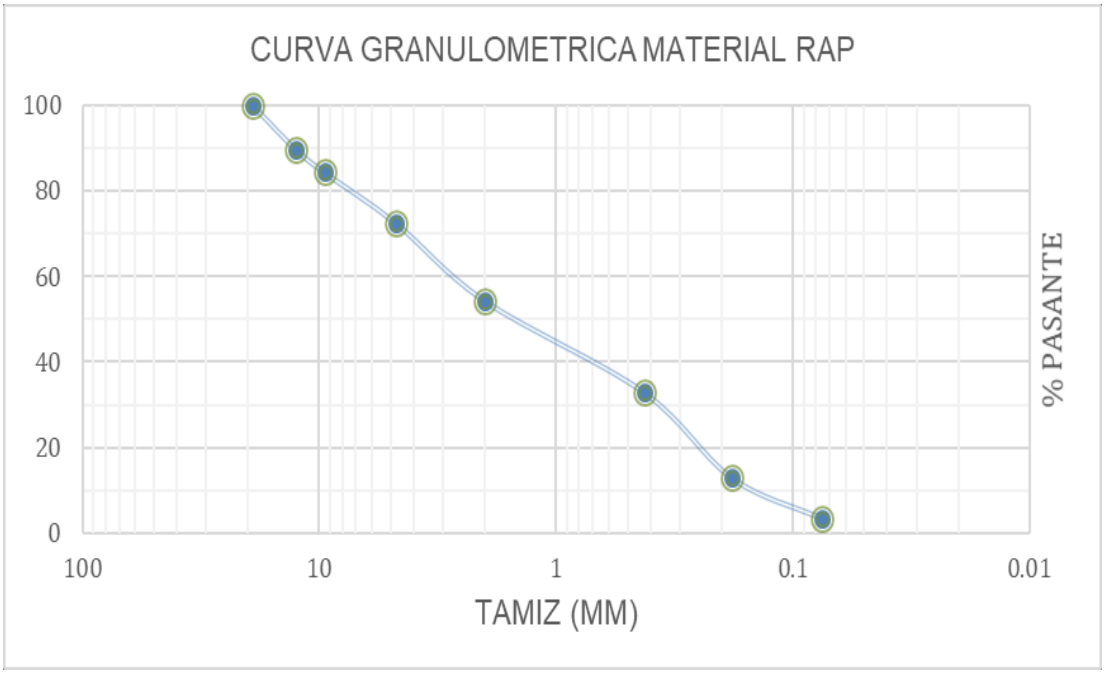


Fuente: autores.

6.2.5. Curva granulométrica RAP

En la gráfica 6 se evidencia la curva granulométrica correspondiente al diseño de una mezcla asfáltica en caliente ya implementada, donde es notorio que su granulometría es aceptable de acuerdo al porcentaje de material que pasa por los tamices de una curva de diseño.

***Gráfica 6**. Curva granulométrica material RAP*



Fuente: autores.

6.3. DISEÑO CURVA GRANULOMÉTRICA Y DOSIFICACIÓN ÓPTIMA

6.3.1. Curva granulométrica

Para el diseño de la curva granulométrica se realizó un tamizaje según la tabla de franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua para una mezcla MDC-19 como se muestra en la siguiente figura:

Figura 30. *Franjas granulométricas INVIAS*

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 ½"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
		% PASA									
DENSA	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
SEMIDENSA	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
GRUESA	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
ALTO MÓDULO	MAM -25		100	80 95	65 80	55 70	40 55	24 38	10 20	8 14	6 9
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±)		-	4 %					3 %			2 %

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) capítulo 4. art 450. Tabla 450-6, franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Pág. 239.

Mediante la tabla 6 se determinó la curva granulométrica óptima donde se evidencia que está dentro de las franjas granulométricas admisibles impuestas por el invias.

ISO 9001 icontec SC4289-1
IQNet CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

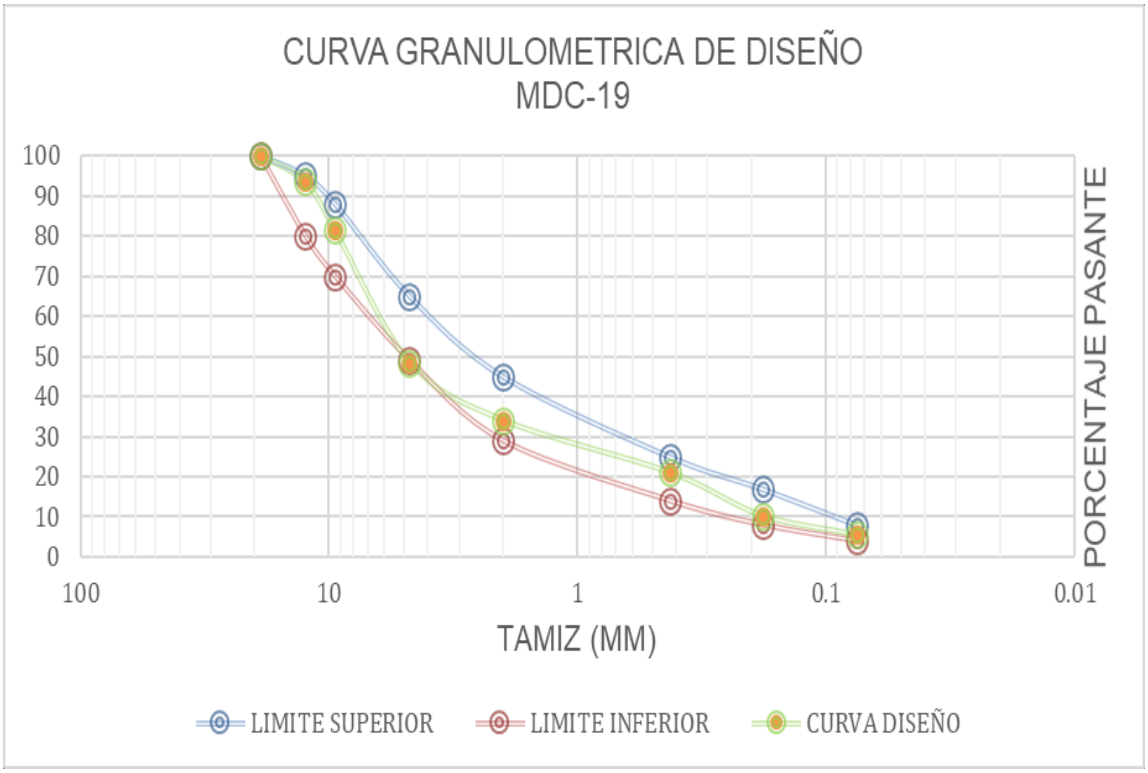
***Tabla 10**. Curva granulométrica de diseño*

CURVA DE DISEÑO					
tamiz		franja superior	franja inferior	% pasante curva de diseño	% retenido
pulgadas (")	(mm)				
3/4"	19,00	100	100	100,00	6,48
1/2"	12,50	95	80	93,52	12,13
3/8"	9,50	88	70	81,39	32,88
N°4	4,75	65	49	48,51	14,40
N°10	2,00	45	29	34,11	12,98
N°40	0,43	25	14	21,12	10,80
N°80	0,18	17	8	10,33	4,69
N°200	0,08	8	4	5,63	5,63

Fuente: autores.

Se puede evidenciar mediante la tabla 10 el porcentaje de agregado grueso es de 51.49%, agregado fino de 42.88% y filler de 5.63%.

***Gráfica 7**. Curva granulométrica de diseño*



Fuente: autores.

6.1.2. Dosificación óptima

Una vez obtenida la curva granulométrica óptima, se procede a realizar ensayos de laboratorio para encontrar la dosificación óptima de porcentaje de asfalto (4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%) tomando como referencia una masa de 1200 g el cual corresponde al peso admisible para realizar el ensayo Marshall. En la tabla 11 se evidencia la masa correspondiente para cada porcentaje de asfalto.

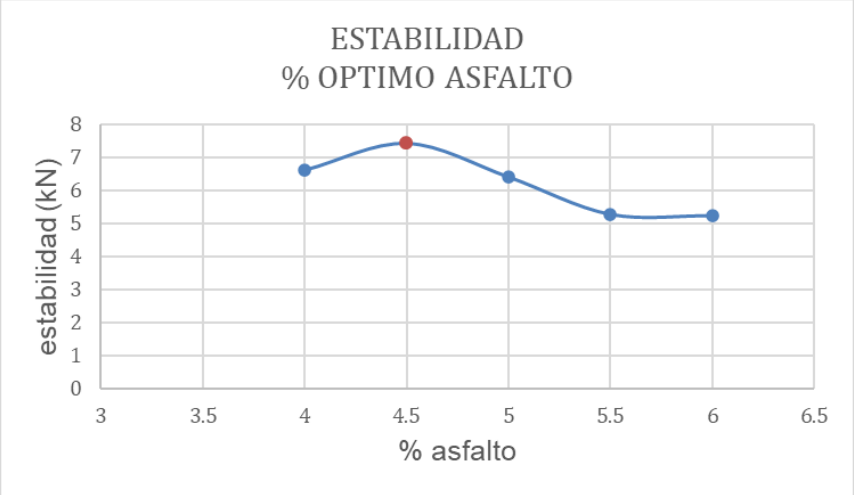
***Tabla 11**. Dosificación de asfalto*

DOSIFICACIÓN DEL ASFALTO			
%asfalto	peso asfalto (g)	masa agregados (g)	masa (g)
4	48	1152	1200
4,5	54	1146	1200
5	60	1140	1200
5,5	66	1134	1200
6	72	1128	1200

Fuente: autores.

Se determinó el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19 tomando como referencia los resultados obtenidos de estabilidad y flujo en el ensayo Marshall.

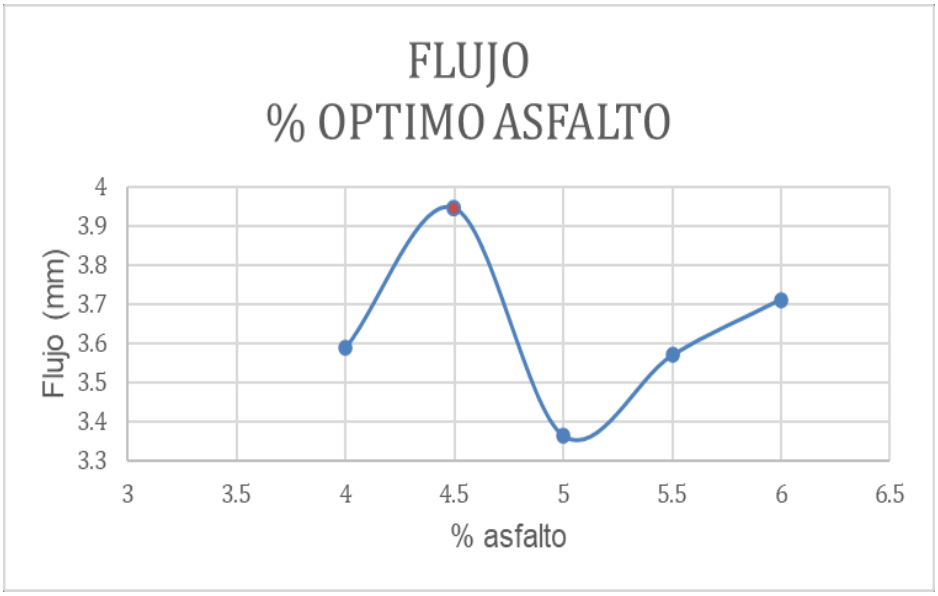
***Gráfica 8**. Estabilidad del porcentaje óptimo de asfalto por medio del ensayo Marshall.*



Fuente: autores

En la gráfica 8 se evidencia que la estabilidad máxima es de 7.42 kN y corresponde a un porcentaje de asfalto de 4.5%.

Gráfica 9. *Flujo del porcentaje óptimo de asfalto por medio del ensayo Marshall*



Fuente: autores.

En la gráfica 9 se evidencia que el flujo máximo es de 3.95 mm y corresponde a un porcentaje de asfalto de 4.5%.

Realizando el análisis comparativo de las gráficas de estabilidad y flujo con los diferentes porcentajes de asfalto, se evidencia que el porcentaje óptimo de asfalto es 4.5%.

6.4. Porcentaje de cambio óptimo de material granular, RAP y escorias de horno de arco eléctrico

Con el diseño óptimo de la curva granulométrica se realiza cambio de material granular con diferentes porcentajes de dosificación tanto en el agregado grueso como en el agregado fino utilizando el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica convencional (4.5%). A continuación, se presentan las siguientes tablas donde se especifica el porcentaje de cambio.

Tabla 12. *Porcentaje de cambio de material al 10%*

PORCENTAJE DE CAMBIO MATERIAL GRANULAR			
TIPO DE AGREGADO	PORCENTAJE DE CAMBIO	10%	DOSIFICACION (g)
AGREGADO GRUESO	GRAVA	46,34	531,06786
	ESCORIA (GURESO)	5,149	59,00754
AGREGADO FINO	ARENA	43,66	500,33
	RAP	2,426	27,79623
	ESCORIA (FINO)	2,426	27,79623
	TOTAL	100%	1146

Fuente: autores.

En la tabla 12 se evidencia el porcentaje de cambio para cada agregado (grueso y fino) donde se remplaza un 10% agregado grueso (grava) con escoria gruesa, así mismo se remplaza 10% de agregado fino (arena y filler) con RAP y escoria fina.

Tabla 13*. Porcentaje de cambio de material al 20%*

PORCENTAJE DE CAMBIO MATERIAL GRANULAR			
TIPO DE AGREGADO	PORCENTAJE DE CAMBIO	20%	DOSIFICACIÓN (g)
AGREGADO GRUESO	GRAVA	41,19	472,06032
	ESCORIA (GRUESO)	10,3	118,01508
AGREGADO FINO	ARENA	38,81	444,73968
	RAP	4,851	55,59246
	ESCORIA (FINO)	4,851	55,59246
	TOTAL	100%	1146

Fuente: autores.

En la tabla 13 se evidencia el porcentaje de cambio para cada agregado (grueso y fino) donde se reemplaza un 20% agregado grueso (grava) con escoria gruesa, así mismo se remplaza 20% de agregado fino (arena y filler) con RAP y escoria fina.

***Tabla 14**. Porcentaje de cambio de material al 30%*

PORCENTAJE DE CAMBIO MATERIAL GRANULAR			
TIPO DE AGREGADO	PORCENTAJE DE CAMBIO	30%	DOSIFICACIÓN (g)
AGREGADO GRUESO	GRAVA	36,04	413,05278
	ESCORIA (GRUESO)	15,45	177,02262
AGREGADO FINO	ARENA	33,96	389,14722
	RAP	7,277	83,38869
	ESCORIA (FINO)	7,277	83,38869
	TOTAL	100%	1146

Fuente: autores.

En la tabla 14 se evidencia el porcentaje de cambio para cada agregado (grueso y fino) donde se reemplaza un 30% agregado grueso (grava) con escoria gruesa, así mismo se reemplaza 30% de agregado fino (arena y filler) con RAP y escoria fina.

***Tabla 15**. porcentaje de cambio de material al 40%*

PORCENTAJE DE CAMBIO MATERIAL GRANULAR			
TIPO DE AGREGADO	PORCENTAJE DE CAMBIO	40%	DOSIFICACION (g)
AGREGADO GRUESO	GRAVA	30,89	354,04524
	ESCORIA (GURESO)	20,6	236,03016
AGREGADO FINO	ARENA	29,11	333,55476
	RAP	9,702	111,18492
	ESCORIA (FINO)	9,702	111,18492
	TOTAL	100%	1146

Fuente: autores.

En la tabla 15 se evidencia el porcentaje de cambio para cada agregado (grueso y fino) donde se remplaza un 40% agregado grueso (grava) con escoria gruesa, así mismo se remplaza 40% de agregado fino (arena y filler) con RAP y escoria fina.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

Tabla 16. *porcentaje de cambio de material al 50%*

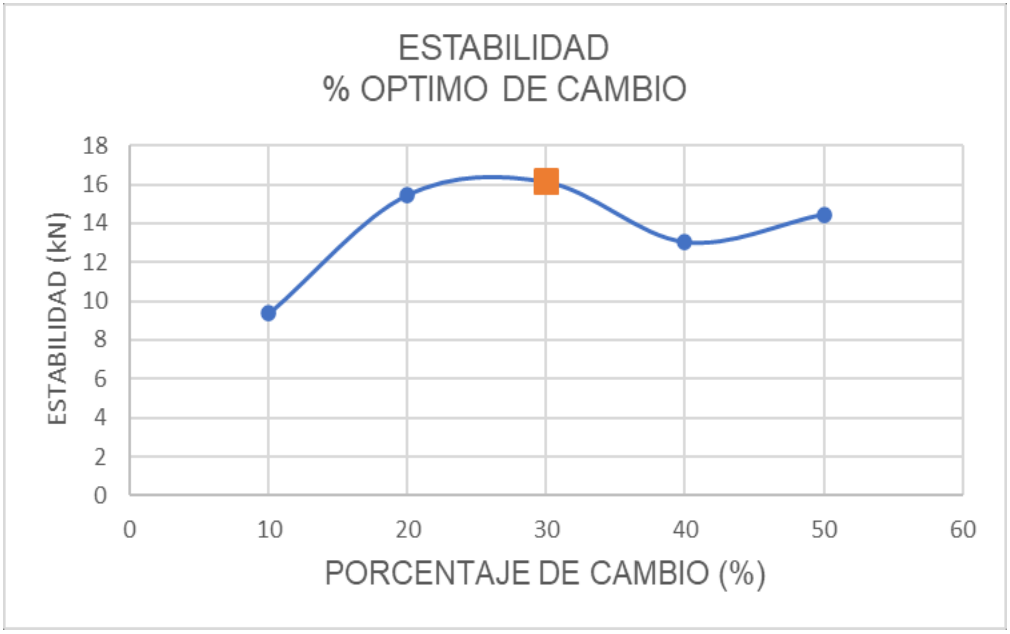
PORCENTAJE DE CAMBIO MATERIAL GRANULAR			
TIPO DE AGREGADO	PORCENTAJE DE CAMBIO	50%	DOSIFICACIÓN (g)
AGREGADO GRUESO	GRAVA	25,75	295,0377
	ESCORIA (GRUESO)	25,75	295,0377
AGREGADO FINO	ARENA	24,26	277,9623
	RAP	12,13	138,98115
	ESCORIA (FINO)	12,13	138,98115
	TOTAL	100%	1146

Fuente: autores.

En la tabla 16 se evidencia el porcentaje de cambio para cada agregado (grueso y fino) donde se reemplaza un 50% agregado grueso (grava) con escoria gruesa, así mismo se reemplaza 50% de agregado fino (arena y filler) con RAP y escoria fina.

Gracias a la máquina Marshall se determinó la estabilidad y flujo correspondiente para cada porcentaje de cambio indicado a continuación en las siguientes gráficas.

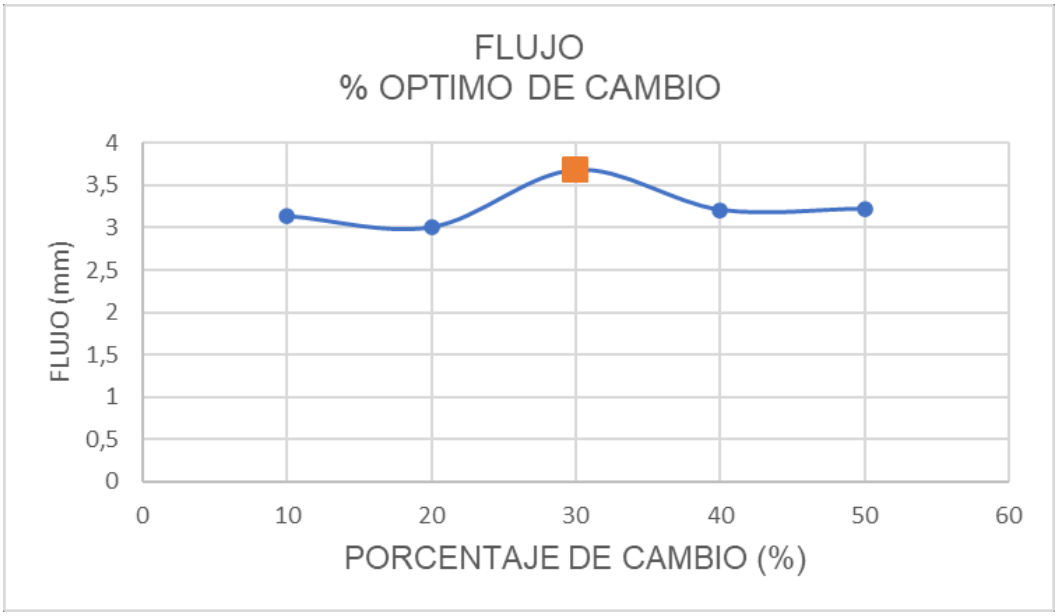
Gráfica 10*. Estabilidad del porcentaje de cambio de agregados por medio del ensayo Marshall*



Fuente: autores.

En la gráfica 10 se evidencia que a medida que el porcentaje de cambio en los agregados se va incrementando la estabilidad del material va en aumento determinando el porcentaje óptimo de cambio donde se evidencia que el 30% genera una mayor estabilidad obteniendo como resultado un valor de 16.12 kN.

Gráfica 11. *Flujo del porcentaje de cambio de agregados por medio del ensayo Marshall*



Fuente: autores

En la gráfica 11 se evidencia una curva inestable debido a el flujo obtenido en cada porcentaje de cambio en los agregados, se puede observar el flujo máximo obtenido es en el porcentaje de cambio de 30% de 3.68 mm.

La relación Estabilidad/flujo (kN/mm) obtenida para el porcentaje óptimo de cambio es de 4.38 kN/mm.

Figura 31. *Criterios de diseño según el método Marshall*

CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO			
		NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)	E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75
Estabilidad mínima (N)		5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)	15,000
Flujo(mm) (Nota 2)		2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)		2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) capitulo 4. art 450. Tabla 450-10, Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall. Pág. 243.

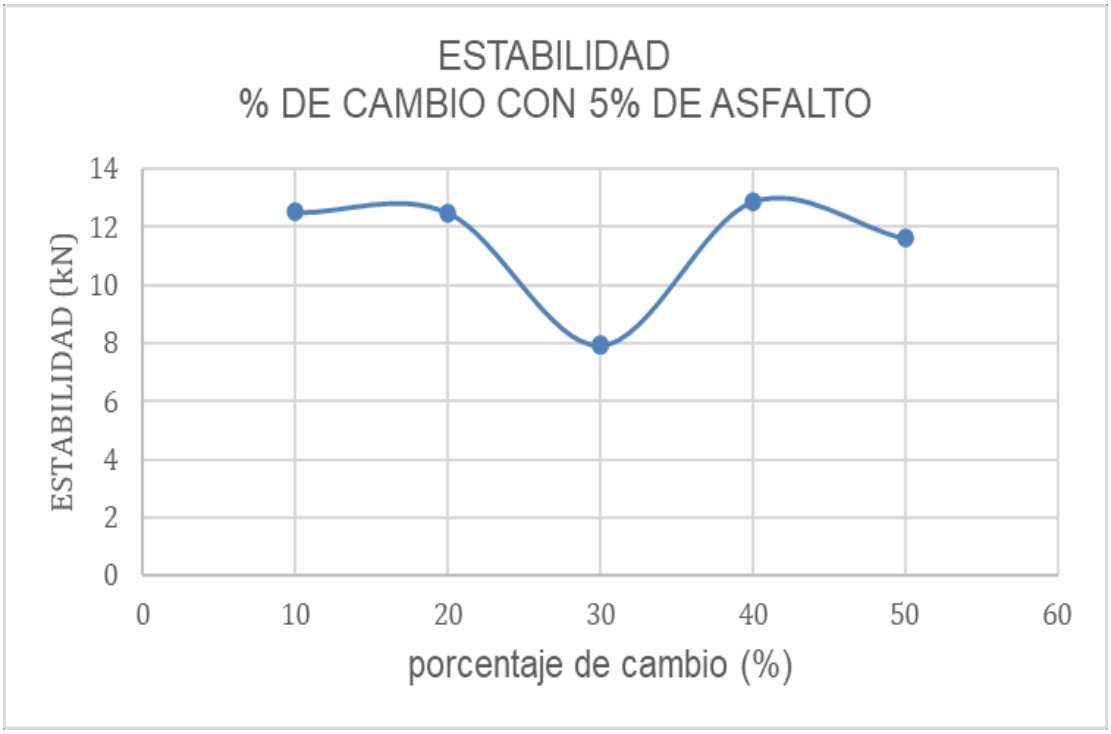
Tomando como referencia la figura 31, la estabilidad y el flujo del porcentaje óptimo de cambio (30%) cumple con el rango de aceptación del INVIAS ya que la estabilidad es superior a 7500 N (7.5kN), el flujo se encuentra entre el rango de 2.0mm a 4.0mm y la relación estabilidad/ flujo (kN/mm) está entre el rango de 3.0 a 5.0.

ISO 9001 icontec SC4289-1
IQNet CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

6.5. PORCENTAJE DE CAMBIO DE AGREGADO GRUESO Y FINO CON PORCENTAJE DE ASFALTO DE 5%.

Se realizó el ensayo Marshall usando los porcentajes de cambio de los materiales grueso y fino usando como porcentaje de asfalto 5% con el fin de realizar un análisis comparativo del comportamiento de estabilidad y flujo.

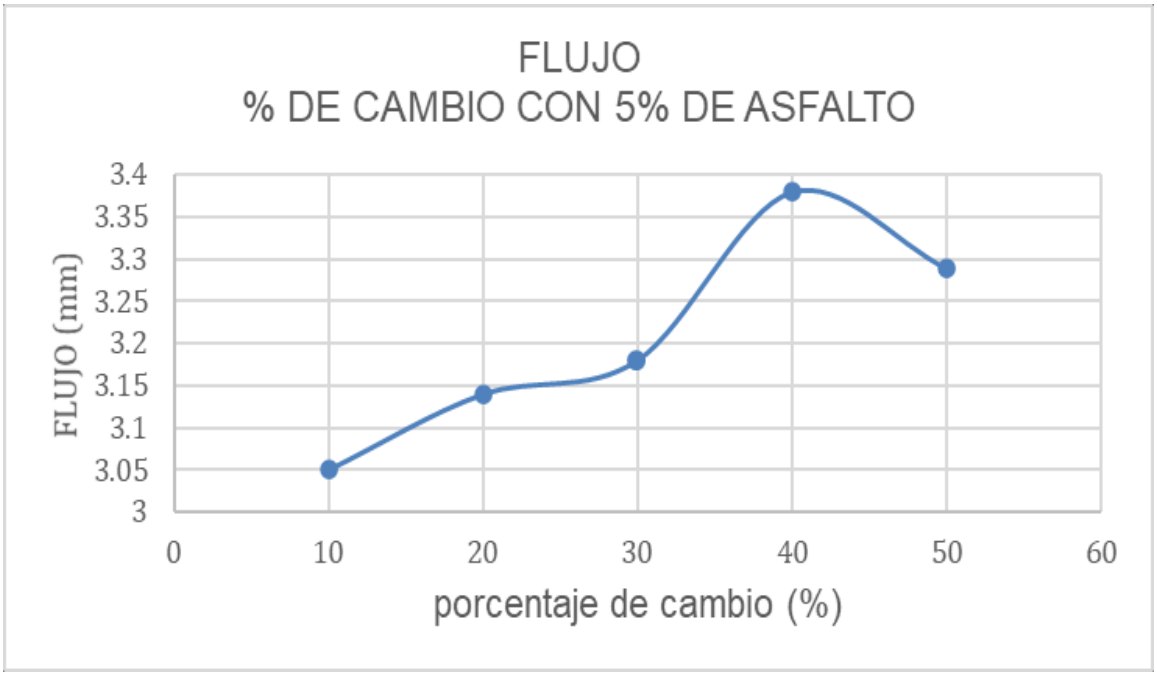
Gráfica 12. *Estabilidad de porcentaje de cambio de agregados con 5.0% de asfalto por medio del ensayo Marshall*



Fuente: Autores.

En la gráfica 12 se evidencia que a medida que el porcentaje de cambio en los agregados se va incrementando la estabilidad del material va en aumento determinando el porcentaje óptimo de cambio donde se evidencia que el 30% genera una mayor estabilidad obteniendo como resultado un valor de 16.12 kN.

***Gráfica 13**. Flujo de porcentaje de cambio de agregados con 5.0% de asfalto por medio del ensayo Marshall*



Fuente: Autores.

En la gráfica 13 se evidencia una curva inestable debido a el flujo obtenido en cada porcentaje de cambio en los agregados, se puede observar el flujo máximo obtenido es en el porcentaje de cambio de 30% de 3.68 mm.

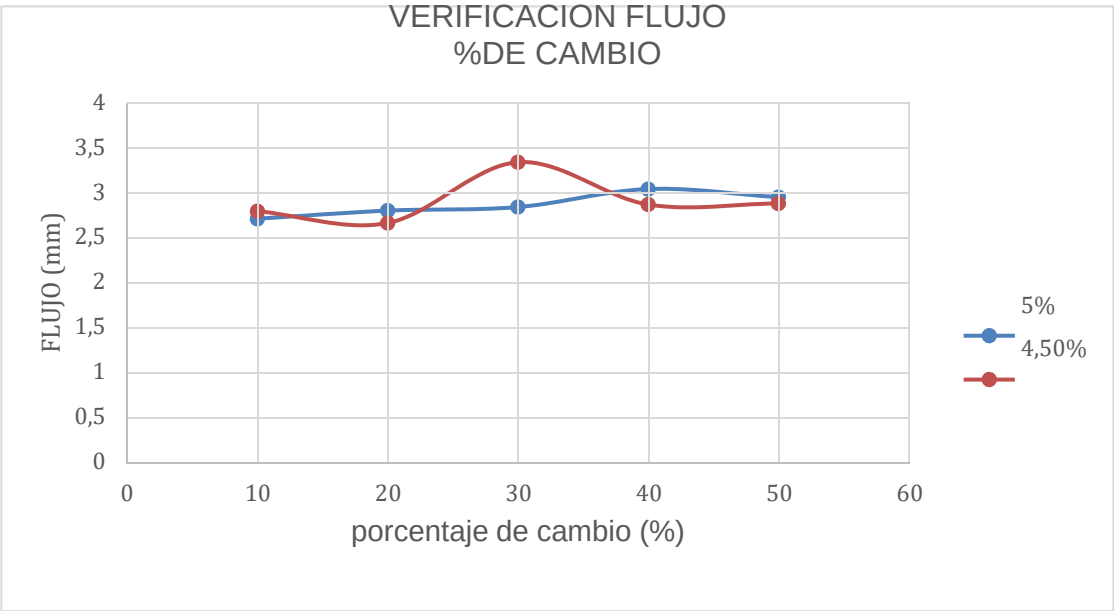
En las siguientes gráficas se establece la diferencia de la mezcla con 5.0% de asfalto respecto a la mezcla óptima con 4.5% de asfalto y 30% de cambio de agregado grueso y fino.

***Gráfica 14.** Relación flujo de 4.5% & 5.0%*

***Gráfica 15.** Relación flujo de 4.5% & 5.0%*

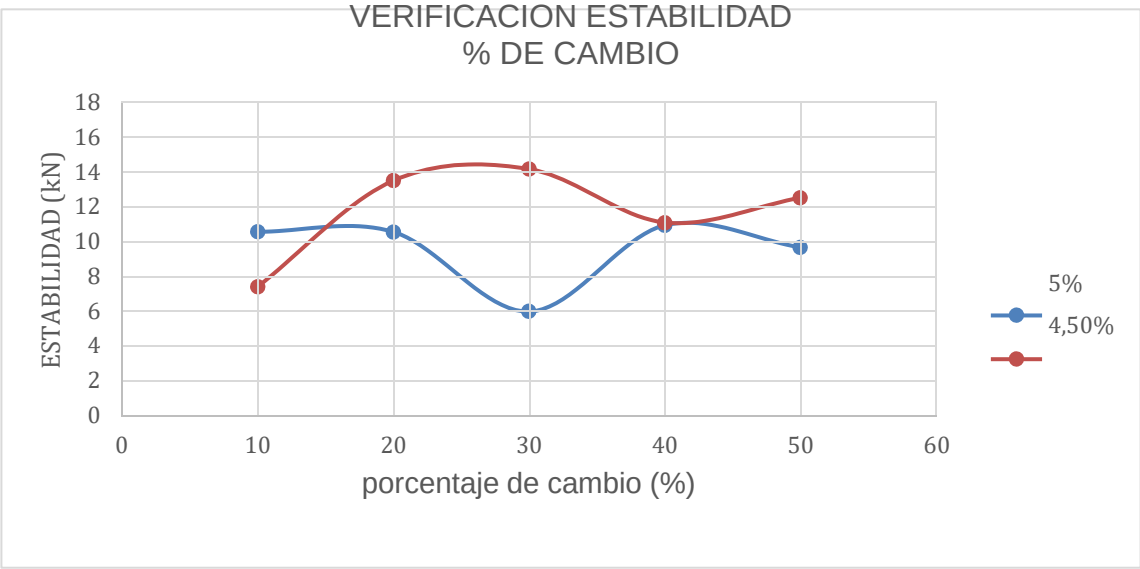
***Gráfica 16.** Relación flujo de 4.5% & 5.0%*

Gráfica 17. *Relación flujo de 4.5% & 5.0%*



Fuente: autores

Gráfica 18. *Relación estabilidad de 4.5% & 5.0%*



Fuente: autores

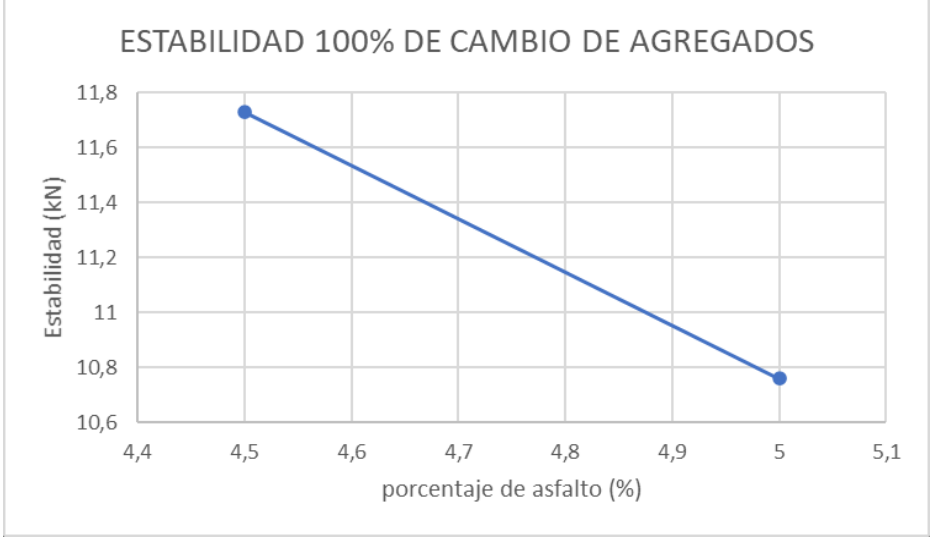
De acuerdo con la gráfica 15 se realiza la comparación de estabilidad con los diferentes porcentajes de asfalto donde el porcentaje óptimo de asfalto es de 4.5% y el porcentaje de cambio óptimo en los agregados grueso y fino es de 30% ya que genera un aumento considerable de estabilidad. Esto indica que genera menor deformación debido al aumento de cargas aplicadas en la carpeta asfáltica.

De acuerdo con la gráfica 14 se realiza la comparación de flujo con los diferentes porcentajes de asfalto donde el porcentaje óptimo de asfalto es de 4.5% y el porcentaje de cambio óptimo en los agregados grueso y fino es de 30%. Se evidencia una diferencia de deformación de 0.3 mm entre los dos porcentajes óptimos de asfalto de cada mezcla demostrando que la deformación está en un rango aceptable por el invias respecto a las cargas aplicadas en la mezcla.

6.6. ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO CON 100% DE CAMBIO EN LOS AGREGADOS GRUESO Y FINO.

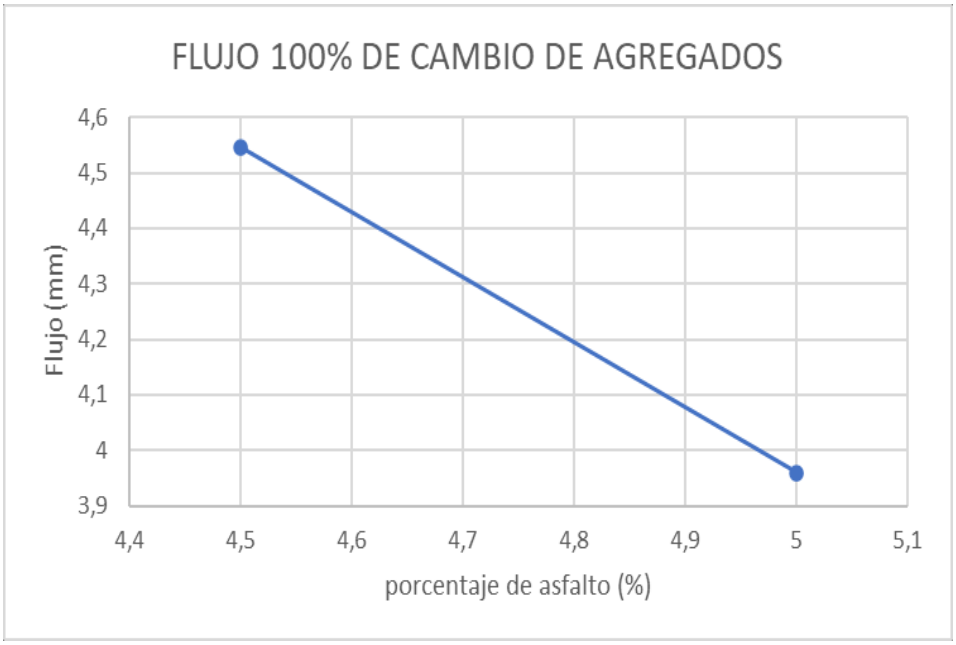
Se realizó el ensayo Marshall removiendo por completo los agregados gruesos y finos reemplazándolos por escoria gruesa como agregado grueso y escoria fina y RAP como agregado fino y filler usando los mismos porcentajes de agregados para la mezcla convencional. Para dicho análisis se utilizó dos porcentajes de asfalto 4.5% y 5.0%.

***Gráfica 19**. Estabilidad de escoria y RAP*



Fuente: autores.

Gráfica 20. *flujo escoria y RAP*



Fuente: autores.

De acuerdo con la gráfica 16 se evidencia una estabilidad y un mejor comportamiento con porcentaje de asfalto de 4.5% el cual da un resultado de 11.73 kN.

De acuerdo con la gráfica 17 se evidencia un flujo significativo el cual corresponde al porcentaje de asfalto de 4.5%. la deformación del material aumenta y genera mayor desgaste en el ensayo Marshall.

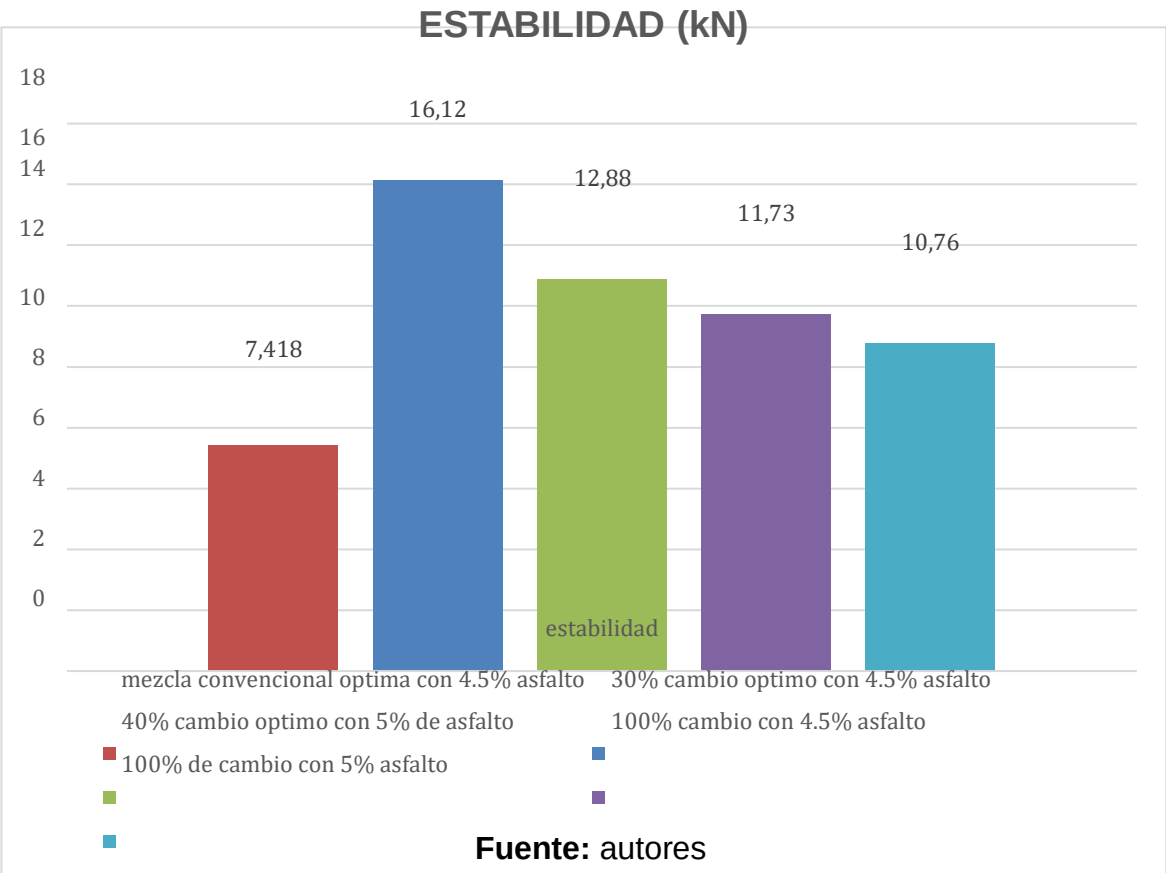
La mezcla de estos materiales no es óptima puesto que la mezcla asfáltica es muy porosa, deteriorando la carpeta asfáltica debido a su rigidez y características físicas de los agregados grueso y fino.

ISO 9001 icontec SC4289-1
IQNet CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

6.7. ANÁLISIS COMPARATIVO CON RELACIÓN DE ESTABILIDAD Y FLUJO EN LAS DIFERENTES MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Cada mezcla analizada tiene un diferente comportamiento en los resultados de estabilidad y flujo, mediante las gráficas 18 y 19 se evidencia la diferencia de estabilidad y flujo que tiene cada material acorde a su dosificación de agregado grueso y fino y % de asfalto. (*el análisis se basa en los datos de porcentajes de agregados grueso y fino y el porcentaje de asfalto óptimos de cada mezcla asfáltica).*

***Gráfica 21**. Estabilidad obtenida de cada mezcla asfáltica*

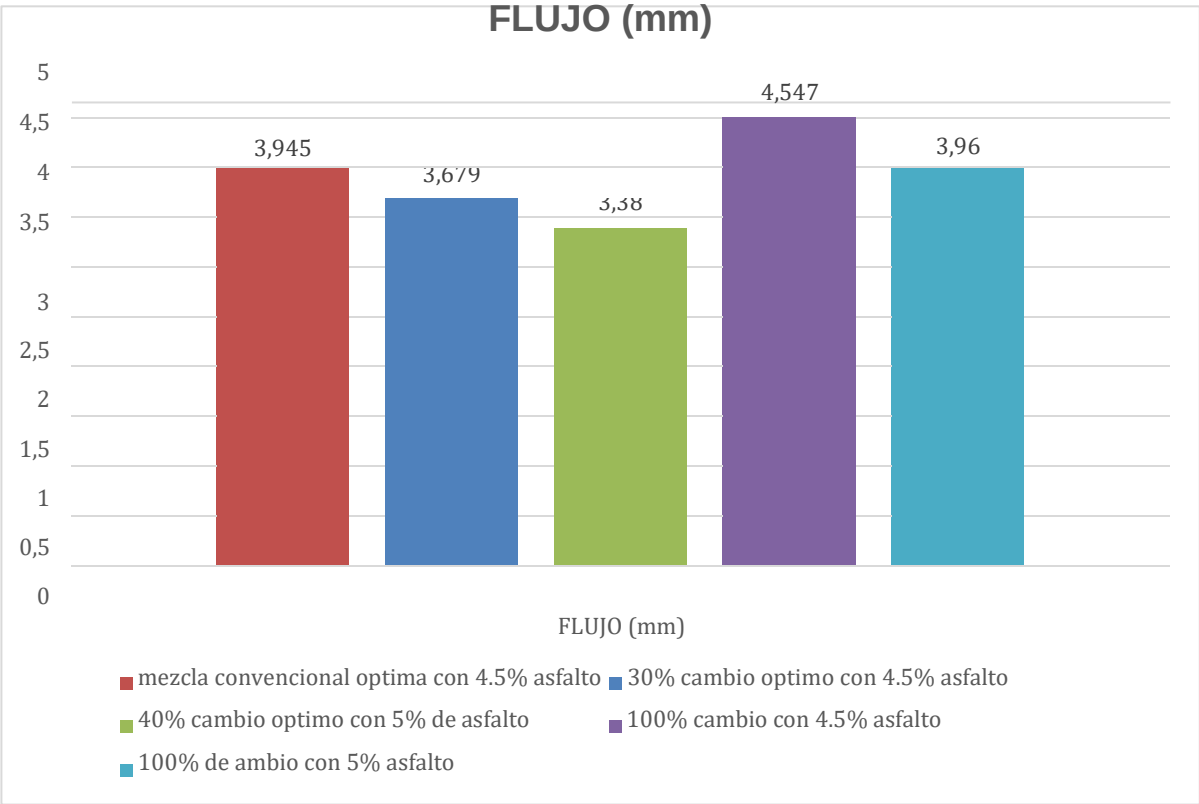


Fuente: autores

En la gráfica 18 se determinó que la estabilidad óptima de las mezclas asfálticas densas en caliente de gradación continua corresponde a la mezcla convencional con adición de 30% de material nuevo (escoria gruesa y fina, RAP) con un porcentaje de asfalto de 4.5%, aumentando su capacidad de resistencia de carga en la carpeta asfáltica.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

***Gráfica 22**. Flujo obtenido de cada mezcla asfáltica*



Fuente: Autores.

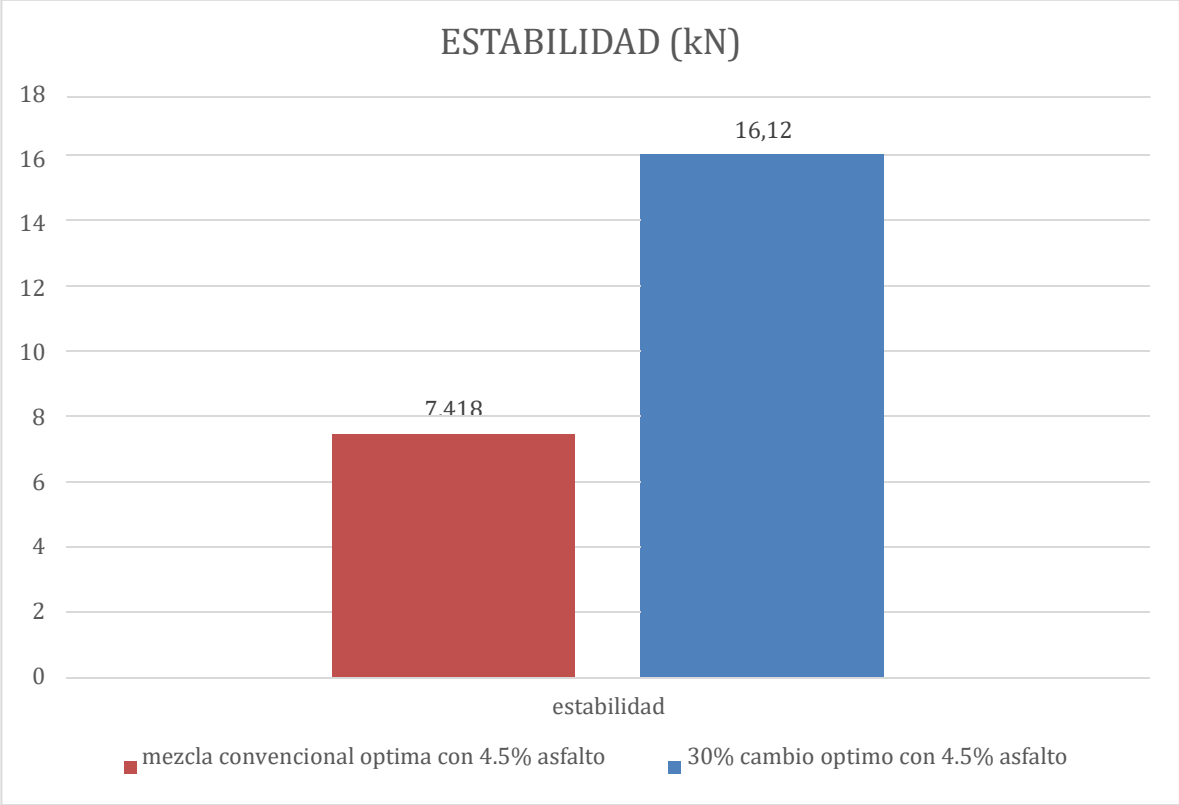
En la gráfica 19 se determinó que el flujo de las mezclas en análisis oscila entre 3.0 mm y 4.0 mm corresponde a un rango admisible impuesto por el instituto nacional de vías (INVIAS).

Realizando la comparación estabilidad/flujo se determinó que la mezcla que tiene mejor comportamiento a factores de carga y deformación corresponde a la mezcla convencional con adición de 30% de material nuevo (escoria gruesa y fina, RAP) con un porcentaje de asfalto de 4.5%.

ISO 9001 icontec SC4289-1
IQNet CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

6.8. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA OBTENIDA CON RAP Y ESCORIAS DE HORNO DE ARCO ELECTRICO CON DOSIFICACIÓN ÓPTIMA Y LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONALES

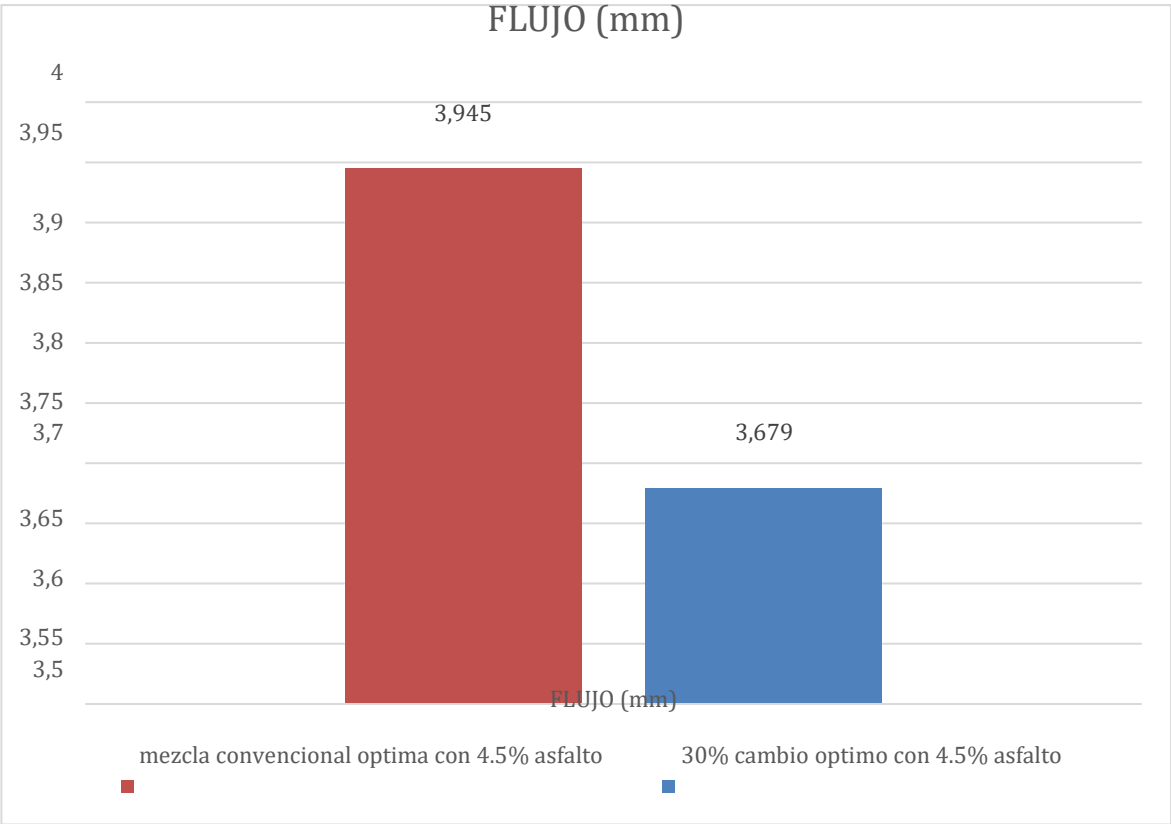
Gráfica 23. *Comparación de estabilidad entre mezcla convencional y dosificación optima de RAP y escorias*



Fuente: Autores.

En la gráfica 23 se determinó la variación de estabilidad (kN) presente en la mezcla asfáltica convencional con una estabilidad de 7.418 kN y en la mezcla asfáltica optima con un porcentaje de cambio de 30% en el agregado grueso y fino con una estabilidad de 16.12 kN; donde se presenta una diferencia de mejoramiento de estabilidad 8.7kN.

***Gráfica 24**. Comparación de flujo entre mezcla convencional y dosificación optima de RAP y escorias*



Fuente: Autores.

En la gráfica 24 se determinó la variación de flujo (mm) presente en la mezcla asfáltica convencional con un flujo de 3.945mm y en la mezcla asfáltica optima con un porcentaje de cambio de 30% en el agregado grueso y fino, con un flujo de 3.679mm; donde se presenta una diferencia de mejoramiento de flujo de 0.266mm. Esto quiere decir que la mezcla con adición de RAP y escorias tiene menor deformación al momento de aplicarle las cargas.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

7. CONCLUSIONES

- Se logró obtener la dosificación óptima con la inclusión de reciclado de pavimentos asfálticos (*recycled asphalt paviment* (RAP)) y escorias de horno de arco eléctrico de acuerdo a las especificaciones de la normatividad con un porcentaje de cambio del 30% en agregados gruesos y agregados finos y un porcentaje de asfalto de 4.5%.

- Los resultados obtenidos en el proyecto de investigación, indican que los nuevos materiales mejoran las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales, en cuanto a estabilidad y flujo, de acuerdo con el ensayo Marshall.

- Se realizó la evaluación de las características que presentaron los agregados, encontrando que estos cumplen con lo establecido en la norma INVIAS, en el artículo 450, garantizando que la mezcla de asfalto no presente inconvenientes en cuanto a su trabajabilidad y resistencia, siendo así esto un beneficio para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla.

- Se ejecutó el diseño de la mezcla MDC-19 con penetración de asfalto de 60-70 con los agregados pétreos ya caracterizados, teniendo como referente que este tipo de mezcla es una de las que más se están usando en el país, estas conforman las carpetas de rodadura que constantemente están siendo sometidas a diferentes factores tanto ambientales como de cargas, se encontró que la curva de diseño cumple con lo estipulado en el INVIAS, con un porcentaje de agregado gruesos de 51,49 %, de finos del 42,88% y filler de 5,53%.

- Se evaluó el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica óptima teniendo como resultado que el mejor comportamiento fue con una mezcla convencional con un porcentaje de reemplazo de 30% tanto de material grueso como de material fino, usando como porcentaje de asfalto 4,5%.

- Debido a que las mezclas con incorporación de RAP y escoria presentan valores más altos de estabilidad, estas son más resistentes a la deformación que causa el tráfico.

- Según lo estipulado en la norma INVIAS, en el articulo 450, tabla 450-10, especifica la relación de estabilidad/flujo (kN/mm) entre los valores de 3.0 a 5.0 donde la relación obtenida de la mezcla de 4.38kN/mm; se concluye que cumple con los criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

- Obteniendo los resultados de estabilidad y flujo de la mezcla con el 100% de cambio de material granular se logró comprobar que no presento el mejor comportamiento mecánico, por las características físicas y químicas del RAP (*recycled asphalt paviment)* y de la escoria de horno de arco eléctrico.

- Debido al poco uso de la escoria como material granular en mezclas asfálticas, este genera un mayor impacto como desecho al no ser aprovechado y produce mayor aglomeración de material en depósitos, sin tener en cuenta que este material tarda en biodegradarse.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir la línea investigativa de la adición de RAP y escorias de arco eléctrico en pavimentos tipo MDC-19.

-Se recomienda adicionar material nuevo parcialmente y no totalmente puesto que los resultados no indican un buen comportamiento mecánico, con el reemplazo total, debido a las propiedades físico- químicas del material en especial la escoria, ya que esta presenta una textura muy rugosa y también es muy poroso por ende no es fácil al momento de manejar en la mezcla generando así mayor desgaste de maquinaria.

- Comprobando que la escoria de horno de arco eléctrico ayuda en el mejoramiento de las mezclas asfálticas por sus características físicas y químicas, se recomienda la implementación como material granular en mezclas asfálticas densas en caliente.

- Realizando el análisis del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica densa en caliente con la dosificación optima, se recomienda el uso de RAP (*recycled asphalt paviment)* como material granular en una mezcla MDC-19.

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9] ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES Y PAVIMENTADORES ASFÁLTICOS DE COLOMBIA (ASOPAC), Cartilla del pavimento asfáltico. Bogotá, 2004.

[10] Granados J. "COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA CON CAUCHO MEDIANTE PROCESO POR VÍA SECA RESPECTO A LA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL", Universidad Ricardo Palma. Lima-Perú, 2017. Pág. 20.

[11] Velásquez C, Galicia D. "Tipos de fallas en los pavimentos". Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Zacatenco. Cap. 4. [En línea]. Disponible en internet: URL. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3024/Capitulo4.pdf>

[12] Buitrago, González. "Caracterización del rap e identificación de su influencia en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente." Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica Ingeniería Civil. Bogotá,2016. Pág. 19.ca

[14] López, T & Miró R. "El envejecimiento de mezclas asfálticas". Universidad Politécnica de Cataluña, 2015. Pág. 15-25. En línea. Disponible en Internet: URL.<https://www.ptcarretera.es/wp-content/uploads/2017/07/05_UP-catalun%CC%83a_CT-2015_Final.pdf>

[15] Segura, A. "Estudio del comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas; con materiales reutilizables en la construcción como escoria de acero." Universidad católica de Colombia, 2016. Pág. 38-40. En línea. Disponible en internet: URL<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15079/1/DOCUMENTO%20FINAL.pdf >.

[16] CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS CEDEX; Ficha técnica, "Escorias de acería de horno de arco eléctrico", España, 2013. Pág. 2-6 En línea, disponible en internet: URL <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/25/escorias-de-aceria-de-horno-de-arco-electrico/ >.

[17] [18] Madías J. Reciclado de escorias de acería. Metallon, Argentina. Pág.1. En línea, disponible en internet: URL < https://www.alacero.org/sites/default/files/u16/reciclado_de_escorias_de_aceria.pdf>

[19] Segura A. “Estudio del comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas; con materiales reutilizables en la construcción como escoria de acero”. Universidad Católica de Colombia, 2016. Pág. 40. En línea. Disponible en internet: URL<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15079/1/DOCUMENTO%20FINAL.pdf >.

[20] Zúñiga C. Ministerio de Obras Públicas. Laboratorio Nacional de Vialidad, “Mezcla Asfáltica en Caliente”. Junio 2015. Pág. 20.

[21] Anguas P, Alamilla H, Sandoval C. Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y superpave para Compactación de Mezclas Asfálticas. Secretaria de comunicaciones y transportes, (SCT). Sanfadilla, Qro, 2005. Pub Tec N°271.

[22] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Secciones 700 y 800- MATERIALES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS Y PROSPECCIÓN DE PAVIMENTOS. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall, INV- E-748-13. Pág. 473.

[23] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Sección 100- Suelos. Ensayo de equivalentes de arenas. Fórmula 133.1. Pág. 316.

[24] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Sección 200- Agregados Pétreos. Ensayo Maquina de los Ángeles. Fórmula 218.1. Pág. 81.

[25] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Sección 200- Agregados Pétreos. Ensayo Caras Fracturadas de los Agregados. Fórmula 227.1. Pág. 163.

[26] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Sección 200- Agregados Pétreos. Ensayo Caras Alargadas y Aplanadas. Fórmula 230.2. Pág. 180.

[27] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Sección 200- Agregados Pétreos. Ensayo Caras Alargadas y Aplanadas. Fórmula 230.4. Pág. 180.

GLOSARIO

- Agregado: Material granular, que tiene una composición mineralógica como lo es la arena, la grava; con diferentes tamaños.

- Agregado fino: Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (#4).

- Agregado grueso: Agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (#4)**.**

- Briqueta: Es aquella que se elabora en laboratorio donde tendrá una forma de bloque sólido en forma cilíndrica.

- Capa de rodadura: es un trabajo superficial con un espesor menor a 4 centímetros, conformado por una mezcla tanto de agregados pétreos y asfalto.

- Cemento asfáltico: Es el asfalto que resulta de un proceso de refinación del crudo.

- Compactación: Es el proceso en el cual se le ejerce un esfuerzo al suelo, donde este es consolidado generalmente con maquinaria pesada.

- Cuarteo: Consiste en reducir una muestra de suelo en cantidades menores, para que estas sean repartidas homogéneamente.

- Curva Granulométrica: Es la gráfica que representa la granulometría de un material o de un suelo, donde analiza su estructura.

- Dosificación: Es determinar una porción o cantidad de un material.

- Durabilidad: Es una característica de una mezcla asfáltica con la capacidad de resistir la acción de agentes climatológicos y del tránsito.

- Escoria: Según la cartilla de aplicación de escoria de acería define que esta en un CO-PRODUCTO de la línea del proceso de fusión y afino del acero, que esta constituido esencialmente de silicatos de calcio, oxido de hierro y ferrita cálcica.

- Estabilidad: Es una característica de una mezcla asfáltica que consiste en resistir una deformación bajo las cargas de tránsito.

- Filler: son sustancias finamente divididas, de preferencia son las que pasan por el Tamiz N°200.

- Fresado: Es un trabajo que consiste principalmente en obtener un nuevo perfil de un pavimento asfáltico existente, se hace cuando se desea hacer una rehabilitación a una vía.

- Horno de arco eléctrico: Es el encargado de fundir chatarra y acero a elevadas temperaturas.

- Material granular: Es aquel que está conformado por un conjunto de partículas.

- MDC: Es la combinación de áridos con un ligante.

- RAP (Reciclado de Pavimento Asfáltico): Es el material del pavimento removido in-situ, que contiene asfalto y agregados, se genera este proceso cuando se pretende realizar una reconstrucción o rehabilitación de una vía.

- Rigidez: Es la capacidad que tiene un material para torcerse por acción de fuerzas que actúan sobre su superficie.

- Pavimento: Conjunto de capas superpuestas, de diferentes materiales, que son compactados en forma adecuada.

- Pavimento Asfaltico: es cualquier pavimento donde su superficie este construida con asfalto.

- Penetración: Es una característica que determina la dureza y/o consistencia de los cementos asfálticos.

- Pérdidas: Se debe a la pérdida que tiene un material al ser lavado o secado.

- Porcentaje retenido: Consiste en el material que queda en un tamiz y no pasa ningún porcentaje del mismo.

- Siderúrgica: Es la técnica más conocida como el tratamiento del mineral de hierro para así obtener sus diferentes tipos de este y lo mismo con el acero.

ANEXOS

***Anexo 1**. Planta Asfáltica*

Fuente: Autores

***Anexo 2.** Recolección RAP en el Municipio de Duitama*

Fuente: Autores

Anexo 3. *Rehabilitación vía de Duitama*

Fuente: Autores

Anexo 4. *Recolección cemento asfaltico*

Fuente: Autores

***Anexo 5**. Trituración RAP*

Fuente: Autores

***Anexo 6.** Escoria de acero*

Fuente: Autores

***Anexo 7**. Extracción Briquetas*

Fuente: Autores

***Anexo 8**. Cuarteo Material Granular*

Fuente: Autores

ISO 9001 icontec SC4289-1
CERTIFIED IQNet MANAGEMENT SYSTEM
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD MULTICAMPUS
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016
Vigencia por seis años

Anexo 9. *Briquetas*

Fuente: Autores

Anexo 10*. Comparación briquetas cambiando totalmente material natural*

Fuente: Autores

***Anexo 11**. Carta de solicitud material Gerdau Diaco*

Tuta 15 de enero del 2021

Señores

GERDAU DIACO (PLANTA TUTA)

JOSE NUNEZ

GERENTE PLANTA DE TUTA

ASUNTO

SOLICITUD ADQUISICIÓN MATERIAL PARA INVESTIGACIÓN UNIVERSIDAD SANTO TOMAS SECCIONAL TUNJA

Cordial Saludo.

Mediante la presente nosotros NUBY DANIELA HIGUERA MOJICA identificada con C.C 1.052.413.065 de Duitama y JUAN DAVID MORALES PACHECO identificado 1.010.072.406 de Tunja, estudiantes con terminación de materias de Ingeniería Civil de la UNIVERSIDAD SANTO TOMAS SECCIONAL TUNJA, solicitamos comedidamente la adquisición de 5 lonas de escorias negras de horno de arco eléctrico con el fin de realizar unos ensayos de laboratorio puesto que se está realizando una monografía titulada "COMPORTAMIENTO MECANICO DE MEZCLAS ASFALTICAS DENSAS EN CALIENTE FABRICADAS CON RAP Y ESCORIAS DE HORNO DE ARCO ELECTRICO".

El material solicitado es de fin académico e investigativo, el presente proyecto cuenta con la supervisión y autorización de el Ing. HECTOR MAURICIO SANCHEZ ABRIL. Quien labora actualmente en la UNIVERSIDAD SANTO TOMAS SECCIONAL TUNJA.

Agradecemos la atención prestada y esperamos pronta respuesta

Fuente: autores.

***Anexo 12**. Carta radicada solicitud material Gerdau Diaco*

Atentamente,

NUBY DANIELA HIGUERA MOJICA
C.C. 1.052.413.065 de Duitama
Celular: 3173192610
nuby.higuera@usantoto.edu.co

JUAN DAVID MORALES PACHECO
C.C. 1.010.072.406 de Tunja
Celular: 3112250258
juan.moralesp@usantoto.edu.co

DIRECTOR:

HÉCTOR MAURICIO SÁNCHEZ ABRIL
C.C. 7.184.349
Docente facultad Ingeniería Civil

GERDAU DIACO
GESTIÓN DOCUMENTOS PLANTA TUTA
15 ENE 2021
RECIBIDO

Fuente: autores.

***Anexo 13**. Cronograma de actividades ejecutadas*

CRONOGRAMA ACTIVIDADES PROYECTO "COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE FABRICADAS CON RAP Y ESCORIAS DE ARCO ELÉCTRICO."																								
FECHA	SEPTIEMBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO				FEBRERO				MARZO			
ACTIVIDADES	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Asignación de tema para proyecto de grado por parte del director.																								
Recopilación de información																								
Elaboración anteproyecto																								
Revisión de anteproyecto por parte del tutor																								
Presentación anteproyecto a comité de grado																								
Recolección de información investigativa																								
Recolección de material para laboratorio																								
Elaboración de ensayos de laboratorio																								
Recolección de resultados obtenidos en los ensayos																								
Análisis y colusiones de resultados obtenidos																								
Elaboración documento final.																								
Revisión y correcciones por parte de el director de proyecto																								
EJECUTADO																								
SIN EJECUTAR																								

Fuente: autores