

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO (MDC-19) CON DIFERENTES PORCENTAJES DE REEMPLAZO DE ARENA POR RELAVES DE LA MINERÍA DE AGREGADOS DEL RIO GUAYURIBA



**Juan Felipe Arango Roldán
Jorge Sebastián Sorza Rojas**



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2021**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO (MDC-19) CON DIFERENTES PORCENTAJES DE REEMPLAZO DE ARENA POR RELAVES DE LA MINERÍA DE AGREGADOS DEL RIO GUAYURIBA



**Juan Felipe Arango Roldán
Jorge Sebastián Sorza Rojas**

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de Ingeniero civil.

Aprobado por:
IC. Mónica Yineth Lara Pérez MSc.
Director

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2021**

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Fray José Gabriel Mesa Angulo, O.P.
Rector General

Fray Eduardo González Gil, O.P.
Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.
Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O.P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón
Secretaria de División Sede Villavicencio

IC. Manuel Eduardo Herrera Pabón MSc.
Decano Facultad de Ingeniería Civil

RESUMEN

En el presente documento se desarrolla la investigación de la modificación de una mezcla asfáltica densa en caliente con residuos de minería de agregados para determinar si cumple con la normativa del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013), denominada “evaluación del comportamiento mecánico de una mezcla densa en caliente tipo 19 (MDC-19) con diferentes porcentajes de reemplazo de arena por relaves de la minería de agregados del río Guayuriba”.

Se realiza un estudio de enfoque experimental, y de tipo descriptivo, todo ello basado en las normas y especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013), metodología confiable y aplicada a nivel nacional.

Los resultados permitieron establecer que los materiales utilizados para la fabricación de la MDC-19 en estudio cumplen con las normas INVIAS 2013; además que el 5.5% de cemento asfáltico es el porcentaje óptimo para esta mezcla; no obstante, la mezcla con 25% de reemplazo de arena por relaves al 5% del CA demuestra mejorar las propiedades mecánicas de la MDC-19 convencional.

Palabras clave: Comportamiento mecánico, mezcla asfáltica MDC-19, reemplazo de arena, relaves de la minería de agregados, modificación de mezcla.

ABSTRACT

This document develops the investigation of the modification of a hot dense asphalt mixture with aggregate mining waste to determine if it complies with the regulations of the National Institute of Roads (INVIAS, 2013), called “evaluation of the mechanical behavior of a dense hot mix type 19 (MDC-19) with different percentages of sand replacement by tailings from the aggregates mining of the Guayuriba River”.

An experimental and descriptive approach study is carried out, all based on the standards and specifications of the National Highways Institute (INVIAS, 2013), a reliable methodology applied at the national level.

The results allowed to establish that the materials used for the manufacture of the MDC-19 under study comply with the INVIAS 2013 standards; Furthermore, 5.5% of asphalt cement is the optimal percentage for this mix; however, the mix with 25% sand replacement by tailings at 5.5% CA shows to improve the mechanical properties of conventional MDC-19.

Keywords: Mechanical behavior, MDC-19 asphalt mix, sand replacement, tailings from aggregate mining, mix modification.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 10 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 14 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL | 14 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 14 |
| 3. JUSTIFICACIÓN | 15 |
| 4. ESTADO DEL ARTE | 16 |
| 5. METODOLOGÍA | 18 |
| 6. DESARROLLO DEL PROYECTO | 20 |
| 6.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EN ESTUDIO | 21 |
| 6.1.1. Caracterización física de los agregados | 21 |
| 6.1.2. Caracterización química de los relaves | 24 |
| 6.1.3. Caracterización del cemento asfáltico | 26 |
| 6.2. PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO (4%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%) PARA LA MEZCLA MDC-19 CONVENCIONAL | 26 |
| 6.3. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA PORCENTAJE DE REEMPLAZO SEGÚN EL DISEÑO MODELO. | 30 |
| 6.3.1. MDC-19 con reemplazo con del 25% de arena | 31 |
| 6.3.2. MDC-19 con reemplazo con del 50% de arena | 34 |
| 6.4. RELACIÓN DE MEZCLA ENTRE PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO Y PORCENTAJE DE REEMPLAZO DE ARENA ACORDE A INVIAS 2013 | 38 |
| 7. RESULTADOS E IMPACTOS | 41 |
| 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 42 |
| 8.1. CONCLUSIONES | 42 |
| 8.2. RECOMENDACIONES | 43 |
| REFERENCIAS | 44 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall | 20 |
| Tabla 2. Gradación de comprobación del diseño de mezcla..... | 21 |
| Tabla 3. Resumen de ensayos combinación de agregado grueso..... | 22 |
| Tabla 4. Granulometría agregado fino-arena triturada tipo I | 23 |
| Tabla 5. Granulometría agregado fino-arena triturada tipo II | 23 |
| Tabla 6. Resumen ensayos agregado fino combinado | 24 |
| Tabla 7. Resumen ensayos agregados combinados..... | 24 |
| Tabla 8. Composición química de relaves..... | 25 |
| Tabla 9. Resumen de ensayos cemento asfáltico | 26 |
| Tabla 10. Resultados. | 41 |
| Tabla 11. Impactos..... | 41 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Fases metodológicas desarrolladas | 18 |
| Figura 2. Caracterización granulométrica de los agregados | 22 |
| Figura 3. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X Manejo de relave para ensayo..... | 25 |
| Figura 4. Comportamiento de peso específico Bulk en MDC-19 convencional frente a variación de % de CA..... | 27 |
| Figura 5. Comportamiento de vacíos de aire en MDC-19 convencional frente a variación de % de CA..... | 27 |
| Figura 6. Comportamiento de vacíos de aire en el agregado pétreo en MDC-19 convencional frente a variación de % de CA..... | 28 |
| Figura 7. Comportamiento de estabilidad de la MDC-19 convencional frente a variación de % de CA..... | 29 |
| Figura 8. Comportamiento del flujo de la MDC-19 convencional frente a variación de % de CA | 29 |
| Figura 9. Comportamiento de relación estabilidad/flujo de la MDC-19 convencional frente a variación de % de CA..... | 30 |
| Figura 10. Comportamiento de peso específico Bulk en MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA..... | 31 |
| Figura 11. Comportamiento de vacíos de aire en MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA..... | 31 |
| Figura 12. Comportamiento de vacíos de aire en el agregado pétreo en MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA | 32 |
| Figura 13. Comportamiento de estabilidad de la MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA..... | 32 |
| Figura 14. Comportamiento del flujo de la MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA..... | 33 |
| Figura 15. Comportamiento de relación estabilidad/flujo de la MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA..... | 34 |
| Figura 16. Comportamiento de peso específico Bulk en MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA..... | 35 |
| Figura 17. Comportamiento de vacíos de aire en MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA..... | 35 |
| Figura 18. Comportamiento de vacíos de aire en el agregado pétreo en MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA | 36 |
| Figura 19. Comportamiento de estabilidad de la MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA..... | 36 |
| Figura 20. Comportamiento del flujo de la MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA..... | 37 |
| Figura 21. Comportamiento de relación estabilidad/flujo de la MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA..... | 38 |

Figura 22. Comportamiento de estabilidad de la MDC-19 con reemplazo al 25 y 50% de la arena por relaves frente a variación de % de CA 39

Figura 23. Comportamiento del flujo de la MDC-19 con reemplazo al 25 y 50% de la arena por relaves frente a variación de % de CA 39

Figura 24. Comportamiento de relación estabilidad/flujo de la MDC-19 con reemplazo al 25 y 50% de la arena por relaves frente a variación de % de CA 40

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha contemplado un importante fenómeno de crecimiento demográfico en el departamento del Meta y más particularmente en la ciudad de Villavicencio, lo cual ha generado un impacto en sus condiciones socioeconómicas y un gran impulso en el desarrollo de las diferentes industrias que componen la maquinaria económica de la región.

La construcción es una de las industrias que más se ha desarrollado, esta ha venido evolucionando de manera proporcional al crecimiento de su población, con este incremento de las urbanizaciones y el desarrollo de grandes obras de infraestructura se aumenta también la demanda de materiales para la construcción y a su vez el consumo de los agregados pétreos en los títulos mineros aledaños a la ciudad para abastecer la demanda.

La minería es un pilar fundamental de la industria de la construcción, de esta actividad se generan los mayores volúmenes de materia prima para la construcción, son industrias que están directamente relacionadas con el desarrollo económico y las que más bienestar producen a las personas y sin embargo son de las que más huella ecológica generan sobre el planeta. En los últimos años, han surgido iniciativas a nivel mundial para que la industria de la construcción considere el respeto y la protección del medio ambiente en toda su cadena de valor (360 en Concreto, 2020).

Los proyectos de construcción en la ciudad de Villavicencio y sus alrededores se abastecen principalmente de los títulos mineros ubicados en los ríos Guayuriba y Guatiquía. Si bien las plantas de trituración de agregados son una fuente de crecimiento económico y de bienestar para la sociedad, también se debe resaltar que la producción de agregados pétreos genera grandes cantidades de residuos durante su actividad, uno de los principales son los llamados “lodos residuales”, los cuales están compuestos principalmente de minerales ultra finos y agua, que se dan a partir del lavado del material al pasar por la planta de trituración, estos lodos no cuentan con un proceso de transformación definido o aprovechable, lo cual representa un riesgo ambiental debido a que generalmente son dispuestos al medio ambiente en volúmenes proporcionales a la producción de agregados y finalmente se transforman en un pasivo ambiental.

Además, es de reconocer que en Colombia, así como en otros países, el aumento demográfico y el desarrollo económico, ha incidido en el aumento del parque automotor y con ello el desgaste de la vías, las cuales se encuentran principalmente construidas en pavimento flexible, pues son más resistentes y menos costosas; no obstante factores como la erosión, la variación de la temperatura, las precipitaciones, entre otros, afectan la carpeta asfáltica, demandando de uso de materiales que mejoren las propiedades del pavimento (Clavijo y Aranda, 2014), por lo que el Gobierno Nacional alienta el desarrollo de adición y/o sustitución de componente de la mezcla asfáltica para mejorar las propiedades reológicas, minimizar el impacto al medioambiente, reducir costos, entre

otras, aunque todo deberá ajustarse a los requerimientos del Instituto Nacional de Vías (2013).

Impulsados por la obligación de contribuir a mitigar el impacto generado al medio ambiente y bajo la oportunidad de darle un fin comercial a estos residuos que pueda representar una alternativa eficiente y viable, se ha decidido desarrollar en el siguiente documento la idea de evaluar el comportamiento mecánico de una mezcla densa en caliente tipo 19 (MDC-19) con diferentes porcentajes de reemplazo de arena por relaves de la minería de agregados del río Guayuriba, buscando determinar si al desarrollar esta modificación se sigue cumpliendo con los requerimientos del Instituto Nacional de Vías (2013) para este tipo de mezclas y dejar un precedente para reducir los costos de producción de las mezclas asfálticas mientras se utiliza un residuo de trituración.

El siguiente documento expone las fases que se llevaron a cabo para el desarrollo de la investigación, durante la primera fase se realizó una investigación bibliográfica respecto al comportamiento mecánico de la MDC-19 convencional y la problemática ambiental generada por los relaves de minería; luego se procede a generar un diagnóstico en el que se determinó la necesidad de diseñar una mezcla asfáltica reciclando este desecho de la minería de agregados para determinar si podría cumplir con los parámetros de la normativa del Instituto Nacional de Vías (INVIAS; 2013); seguidamente se adquirieron los materiales mediante la ayuda de una planta de trituración de agregados dentro de un título minero en la ciudad de Villavicencio, vereda el Cocuy aledaña al río Guayuriba llamada “planta ZAFIRO” y el cemento asfáltico de una planta de asfaltos llamada “planta PASOLIN” ubicada también en la vereda el Cocuy; posteriormente se proceden a los ensayos de caracterización del material incluido en la investigación y seguido de esto elaborar y fallar las briquetas por medio del método Marshall con reemplazos de arena por relaves de minería al (25% y 50% por vía seca); seguidamente se procedió al análisis de la información obtenida de los resultados de laboratorio con el fin de determinar el cumplimiento de los objetivos propuestos para finalmente generar unas conclusiones y recomendaciones respecto a la investigación, su aplicación y su aporte a transformar la construcción de obras civiles en una actividad cada vez más amigable con el medio ambiente.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Es posible reemplazar un porcentaje del material de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo 19 “MDC-19” por relaves provenientes de la minería de agregados, de tal forma que exprese un comportamiento mecánico acorde a los parámetros permisibles por INVIAS, 2013?

Según las cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) se estima que la población de Villavicencio y su área rural crecieron en un 35,3% en un periodo de 13 años entre 2005 y 2018, y que para los próximos dos años la población crecerá otro 5,1% respecto al 2018, esto quiere decir que, según estas proyecciones, la ciudad de Villavicencio albergará cerca de los 560.000 habitantes en el 2023.

El crecimiento de la población también suscita un crecimiento económico, según las cifras de la Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo (FEDESARROLLO), en el que se expone que, el mayor ritmo de crecimiento de la economía departamental se presentó durante la década del 2000, con una tasa promedio de 9,8% anual. Para la siguiente década el crecimiento económico promedio anual del departamento se redujo a 5,1% pero se mantuvo por encima del promedio del resto del país 4,0% (Fedesarrollo, 2018). De igual manera el informe de coyuntura económica regional realizado por el DANE expone que, para el periodo de 2010-2015, en el área urbana de Villavicencio la variación de obras culminadas registró un comportamiento fluctuante, con variaciones positivas en 2010, 2013, 2014 y 2015 con un promedio de 32,85% (Banco de la República, 2015). Lo que demuestra que el importante progreso que ha tenido la industria de la construcción en Villavicencio viene desde varios años atrás y continúa en aumento fundamentado en el crecimiento de la población y la economía del departamento.

Teniendo en cuenta estos precedentes, que tanto el crecimiento acelerado de la población, como las diferentes industrias en el departamento van en aumento considerable, la población villavicencense se encuentra ante un acontecimiento de desarrollo en escalas superiores respecto a otras regiones del país, generando un aumento simultaneo en los requerimientos de materiales de construcción y a su vez de producción minera para abastecer la demanda, evidenciando una relación directa entre el crecimiento de la población y el aumento de los desechos mineros que se generan con la producción de agregados.

En lo que corresponde a la ciudad de Villavicencio, las plantas de trituración de los títulos mineros ubicados en los ríos Guayuriba y Guatiquía principalmente, tienen la responsabilidad de abastecer la demanda actual y futura de materiales pétreos para los diferentes proyectos de construcción en la región y al interior del país, como por ejemplo el desarrollo de las nuevas urbanizaciones, los proyectos viales 4G en la región, así como la construcción de diversas obras para la ciudad y mejoramiento de las redes viales en la misma, sumando a esto la falta de agregados pétreos en algunas zonas de producción de hidrocarburos y también megaproyectos futuros como el metro de Bogotá, han sido el factor impulsador de la mega explotación de estas fuentes mineras.

Durante el proceso de producción de estas plantas se genera residuos ambientales en proporciones similares a la de los propios agregados, estos residuos son conocidos como lodos residuales o relaves de minería, los cuales están compuestos principalmente de minerales ultra finos y agua, este desecho se da a partir del lavado del material al pasar por la planta de trituración; Estos lodos no cuentan con un proceso de disposición o transformación definido o aprovechable, lo cual representa un riesgo ambiental debido a que generalmente son dispuestos al medio ambiente en grandes volúmenes y se transforman finalmente en un pasivo ambiental. La actividad de lavado de los agregados implica una serie de problemas ambientales como son el gran consumo de agua, la generación de aguas turbias con una gran cantidad de sólidos en suspensión, el impacto visual y la ocupación de grandes extensiones de terreno (Generalitat de Catalunya, julio de 2015).

El manejo de los residuos generados antes, durante y después del proceso de extracción no es controlado y terminan siendo escombros en lugares no adecuados o vertido en ríos (Lèbre et al., 2017). Esa clase de manejo puede generar enfermedades a largo plazo en las personas cercanas a estos ríos y los escombros amontonados pueden generar problemas de estabilidad por deslizamiento o volcamiento (Casadiego et al., 2017). Además de ser un potencial peligro para el medio ambiente, estos relaves también se convierten en un pasivo para estas empresas, pues tiene que pagar para que se les realice disposición final adecuada, que evite la contaminación de fuentes hídricas y del suelo (Cerón y Gutiérrez, 2019).

En los últimos años a nivel mundial se observa cómo ha aumentado la presión ejercida sobre la protección medioambiental, especialmente en lo concerniente a las carreteras. Frente a estos nuevos requisitos, la industria de la construcción ha lanzado nuevas iniciativas que apuestan al desarrollo de técnicas y productos que limitan el impacto de la construcción de carreteras sobre el medio ambiente (Torres y Noreña, 2012), bien sea a través de la utilización de aditivos que permitan bajar las temperaturas y/o el reemplazo del agregado pétreo con el uso de material reciclado.

En el tema de asfaltos es conocido que la adición de algunos materiales se produce modificaciones de sus propiedades mecánicas, químicas y reológicas de la mezcla asfáltica, de las cuales han sido estudiadas, especialmente por la comunidad académica y científica (González y M. F. Beleño, 2015), aunque no se tiene conocimiento de una investigación que haya involucrado una MDC-19 con reemplazo de arena por porcentajes de relaves provenientes de la minería de agregados, es de anotar que la MDC-19 es aquella que se fabrica con material pétreo con tamaño máximo de 3/4 pulgada, por ello está constituida en su mayoría por agregados finos (INVIAS, 2013).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo “MDC-19” realizando reemplazos graduales de arena por relaves provenientes de la minería de agregados pétreos del río Guayuriba.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización fisicoquímica de los relaves y la caracterización física de los agregados utilizados en la investigación.
- Determinar el porcentaje óptimo de asfalto entre (4%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%) para cada uno de los porcentajes de reemplazo de arena establecidos en el diseño de mezcla (0%, 25% y 50%).
- Comparar los resultados obtenidos en cada porcentaje de reemplazo según el diseño convencional.
- Establecer la relación de mezcla entre porcentaje óptimo de asfalto y porcentaje de reemplazo de arena que demuestre el mejor comportamiento mecánico según los parámetros establecidos en el manual de INVIAS 2013.

3. JUSTIFICACIÓN

Considerando el continuo incremento de esfuerzos, sobre las superficies asfálticas, generados por parte del parque automotor que se utiliza en Colombia lo cual devela la importancia de desarrollar investigaciones pertinentes a dar solución a esta problemática, a través de la búsqueda del diseño de mezclas asfálticas con mejor respuesta y alta resistencia a estos incrementos de esfuerzos, fuera de alcanzar una resistencia apropiada al envejecimiento, a la deformación vertical permanente y a la fatiga por repeticiones de cargas ejercidas a estas estructuras.

En este proyecto de investigación, se pretende alterar la composición general de una MDC-19 convencional, reemplazando la arena por relaves provenientes de la minería de manera proporcional, con la finalidad de evaluarle su resistencia mecánica bajo carga monotónica, por medio del ensayo Marshall, para así poder finalmente analizar y comparar estos resultados, con los parámetros contenidos en una mezcla convencional de (INVIAS; 2013)

Así mismo, entre otras muchas áreas del conocimiento, la preservación del medio ambiente es una parte de la ingeniería civil que se puede resolver desde el asfalto con materias primas recicladas, pues su uso: minimiza la descarga de residuos sólidos que contaminan el medio ambiente, re-usa materiales considerados como desecho que no tienen un costo importante propiamente dicho, innova en diseño de materiales para lograr el máximo desempeño mecánico bajo sollicitaciones estáticas y dinámicas, preserva el medio ambiente por evitar contaminación con residuos sólidos, disminuye las emisiones CO_x al aire que todos respiran y evita extracciones innecesarias de las canteras de materiales geológicos conservando la arquitectura del paisaje, y la flora y fauna endémicas (Martínez et al., 2015).

Por lo tanto, el aprovechamiento del relave, como residuo producido en las plantas de trituración de Villavicencio, se convierte en una importante opción ambiental para la fabricación de mezclas asfálticas, además se elige la MDC-19 porque esta mezcla asfáltica densa en caliente es de las más utilizadas en los proyectos viales y da un parámetro de referencias al ser la MDC intermedia entre las 3 mezclas densas en caliente establecidas por el INVIAS (MDC10, MDC19 Y MDC25), también se elige dado que dentro de su granulometría de agregados ocupa una gran cantidad de material fino, existiendo una amplia posibilidad de baja alteración del comportamiento mecánico normal, y así iniciar los estudios para que este tipo de mezcla sea utilizada en el país.

4. ESTADO DEL ARTE

Son varios los estudio que se han realizado para modificar mezclas asfálticas, por ejemplo, en el plano internacional, se encuentra la investigación adelantada por Granados (2017) con el fin de 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. Para ello, el autor inició con la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico, luego procedió a efectuar ensayos de Compresión-Inmersión a la mezcla modificada para determinar la temperatura y tiempo de digestión, así como ensayos Marshall sobre la mezcla asfáltica convencional y modificada con caucho a fin de evaluar su comportamiento mecánico. Con los diseños óptimos de ambas mezclas, procedió a evaluar su comportamiento mediante los ensayos de caracterización y desempeño. Los resultados obtenidos muestran mejoras en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada, lo cual permitió concluir que la incorporación del caucho en una mezcla asfáltica presenta: 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, mejora el comportamiento elástico.

Por su parte, el estudio llevado a cabo por Flores y Monzón (2020) tiene como objetivo principal evaluar la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente utilizando aditivo SBS. Una vez obtenida la caracterización de los agregados pétreos provenientes de la cantera San Martín se realizó inicialmente el diseño de mezclas para un primer estudio con 3.80%, 4.30%, 4.80%, 5.30% y 5.80% de asfalto 60/70, para ello hicieron 15 briquetas con mezcla asfáltica convencional, luego ensayaron en la prensa Marshall, en el cual determinaron que el porcentaje óptimo de asfalto es de 5.17% con estabilidad de 10.55 kN. Este porcentaje lo usaron en un segundo diseño de mezcla asfáltica modificada con 4.17%, 4.67%, 5.17%, 5.67% y 6.17% SBS, igual hicieron 15 briquetas que al ser ensayadas determinaron el porcentaje óptimo de SBS que es 4.95%, el cual alcanza una estabilidad de 17.60 kN, además comparándolo con lo especificado en la norma del MTC EG-2013 supera notoriamente la estabilidad mínima (8.15 kN). Los vacíos en agregado mineral (VAM) de la mezcla modificada varía de 14-15 siendo menor a los VAM de la mezcla convencional. Por lo tanto, concluyeron que el uso de aditivo SBS incorporado en la mezcla asfáltica en caliente mejora notablemente la estabilidad de manera que pueda disminuir las fallas producidos por efectos del clima y tráfico vehicular.

De otro lado, en el ámbito nacional, Amézquita y Gantiva (2017) realizaron una investigación referente al análisis experimental de un asfalto modificado (MDC-19) mediante la sustitución del llenante mineral por Calamina. La importancia de este estudio tiene que ver con la incorporación de los residuos del proceso de fabricación y laminación de acero (Calamina). Los autores utilizaron un cemento asfáltico 60/70, realizando tres muestras, siendo la primera una mezcla asfáltica convencional, la segunda, reemplazando un 6% de Calamina y finalmente en la tercera, reemplazando un 12,5 % de Calamina. Ensayos con la máquina Marshall, que le permitió realizar el análisis de los

indicadores de estabilidad, flujo y rigidez y porcentaje de vacíos, para cada una de las muestras. Los resultados demostraron favorabilidad para las muestras con Calamina, presentando un aporte al desarrollo de futuras ideas que permitan solucionar el proceso de sobre-explotación de agregados en Colombia, así mismo, mejorando las propiedades de la mezcla asfáltica utilizada.

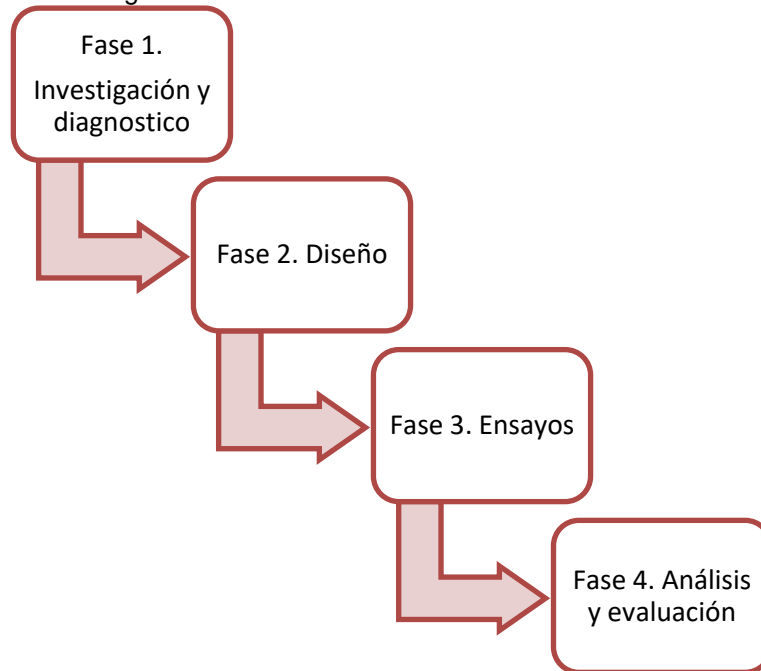
Un estudio parecido realizado por Rincón y Sanabria (2017), trabajaron componentes similares a los de Amézquita y Gantiva (2017), aunque adicionalmente contemplaron disminuir las temperaturas de fabricación y compactación en el laboratorio mediante la incorporación del compuesto sintético HUSIL por vía húmeda, el cual varía la viscosidad del cemento asfáltico (C.A. 60/70 para este caso) al espumarlo. Las características y propiedades del Husil fueron proporcionadas por los grupos de investigación TOPOVIAL y Grupo de Estudios en Materiales, Pavimentos y Modelos. Realizaron los ensayos de laboratorio pertinentes para caracterizar los materiales en estudio, para verificar el cumplimiento de la norma INVIAS:2013, luego procedieron a fallar 46 briquetas: 16 de ellas para obtener el diseño adecuado de la mezcla, para ello variaron el porcentaje de cemento asfáltico (4.5%,5.0%,5.5%,6.0%); 16 briquetas fueron falladas cambiando el llenante mineral por Calamina con las mismas variaciones del ligante; una vez obtenida la mezcla óptima con reemplazo de Calamina y porcentaje de CA, fallaron 12 briquetas variándoles la temperatura de mezcla (110 °C, 120 °C y 130 °C) e incorporándole Husil al 1%; y 12 briquetas fueron falladas con las mismas características de las anteriores pero con Husil al 0% y calamina al 0%. Los resultados obtenidos evidencian que el concreto asfáltico MDC-19 modificado con la sustitución del llenante mineral por Calamina, y la incorporación del aditivo líquido HUSIL, presenta menor cantidad de vacíos con aire, por lo tanto se desarrolla mayor resistencia al ahuellamiento.

Por su parte Gómez (2018) adelantó un estudio con el objetivo de mostrar el comportamiento de una mezcla tipo MDC –19 en la cual adiciona una fracción de polipropileno de baja densidad (de ahora en adelante llamado PBD) o comúnmente denominado pitillo por la vía seca, en unos porcentajes definidos del 1.0%, 2.0% y 3.0% sobre el total de los materiales de la mezcla asfáltica, a fin de evaluar el comportamiento mecánico y de adherencia con relación a una mezcla asfáltica de control. Para tal fin, el autor realizó ensayos que evaluaron la acción de la carga monotónica (Marshall y Tracción Indirecta) y el desgaste a la abrasión cántabro. Los resultados indican que la mezcla asfáltica modificada con 1% de PBD presentó el mejor comportamiento en la estabilidad y flujo Marshall. Sin embargo, la adición de PBD produce una reducción de la resistencia a la tracción indirecta y aumento del desgaste cántabro con respecto a una mezcla de control. Estudios posteriores deben ser realizados, para evaluar el comportamiento mecánico ante la acción de cargas dinámicas, a fin de conocer el comportamiento mecánico del material ante condiciones reales del pavimento.

5. METODOLOGÍA

Las siguientes son etapas que se llevaron a cabo para alcanzar los objetivos de investigación de tipo cualitativa:

Figura 1. Fases metodológicas desarrolladas



Nota. Elaboración propia.

(Fase 1): A través de una revisión bibliográfica de artículos revistas, libros, textos, investigaciones y trabajos previos relacionados con el tema de evaluación del comportamiento mecánico de MDC-19 modificadas y respecto a la problemática ambiental en las plantas de trituración por la disposición de los lodos residuales, se permitió iniciar la presente investigación, para ellos se generó un diagnóstico, en el que se pudo determinar la necesidad de darle un uso eficiente a un residuo de minería para elaborar mezclas asfálticas que cumplan con los parámetros de norma, buscando la mitigación del impacto ambiental; además, se identificó la inexistencia de una investigación donde se evalúe el comportamiento mecánico de MDC-19 modificada con relaves de la minería de agregados. Por eso se vio la importancia de realizar esta investigación para evaluar dicho comportamiento y así establecer la proporción de reemplazo de arena por relaves de la minería de agregados para generar la mezcla óptima que cumpla las exigencias de la norma INVIAS (2013).

Seguidamente se llevó a cabo la (Fase 2): Diseño; en ella se adelantó la adquisición de los materiales necesarios para la elaboración de las briquetas, para ello se consiguió el cemento asfáltico 60/70 de la planta “planta Pasolin” ubicada por el corredor ecológico en cercanías del río Guayuriba, agregados finos y gruesos de la fuente “planta Zafiro”

ubicada dentro de un título minero del río Guayuriba (para cubrir las granulometrías exigidas por INVIAS 2013) y el relave de la minería de agregados de la misma fuente de los agregados.

Posteriormente se adelantó la (fase 3): Ensayos; iniciando con el diseño de formatos para recopilar los datos resultantes del ensayo Marshall en laboratorio. Seguidamente se aplicó el procedimiento para la caracterización de los materiales pétreos, así como el relave y el cemento asfáltico, luego se elaboraron y fallaron briquetas por medio del método Marshall (con 0%, 25% y 50% de reemplazo por vía seca de arena por relaves), tal y como lo dicta la norma INVIAS (2013) para elaboración y evaluación de mezclas densas en caliente.

Para conocer la calidad de un agregado pétreo fue fundamental determinar las variables físicas mecánicas como lo estipulan las normas INVIAS (2013) “Degradación de los agregados pétreos a causa de la compactación por impacto” (Norma INV-E-243-13) pues esta establece las características que deben cumplir los materiales para su uso en las estructuras de pavimento. Al igual, se determinaron los valores de cada uno de los valores volumétricos, así como de la estabilidad, flujo y relación E/F, para ello se elabora una figura por cada valor en análisis tomando el promedio del total de las briquetas por porcentaje de relave (0%, 25% y 50%), haciendo discriminación.

Con los resultados se procedió a realizar la (fase 4): Análisis y evaluación, en donde se revisan y analizan los resultados obtenidos en el laboratorio con el fin de aclarar y dar respuesta a los objetivos propuestos en la investigación, para ello se analiza el comportamiento mecánico bajo carga monotónica que experimenta una mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-19) modificada con relaves de la minería de agregados, evaluando si estas variaciones cumplen con la norma INVIAS (2013), y dar una sugerencia para el uso de relaves en este tipo de mezclas para ser utilizada en proyectos futuros en temas de infraestructura vial.

6. DESARROLLO DEL PROYECTO

Para este capítulo se presentan los criterios de aceptación del INVIAS para cada material que compone la mezcla MDC-19 y los resultados obtenidos una vez se llevaron a cabo los ensayos en laboratorio, tanto para la caracterización de los materiales de la MDC-19, como de los relaves y finalmente determinar su aptitud para componer la mezcla asfáltica.

Para analizar los datos del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas tipo MDC-19 con CA 60/70; convencionales y modificadas por vía seca, se presentan a continuación la tabla 1 que muestra los criterios de aceptación de acuerdo con las especificaciones INVIAS (2013).

Tabla 1. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall

| CARACTERÍSTICAS | NORMA DE ENSAYO INV | MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS CATEGORÍA DE TRANSITO | | | |
|--|---------------------|--|-----------|-----------|-------|
| | | NT1 | NT2 | NT3 | |
| Compactación (golpes/cara) | E-748 | 50 | 75 | 75 | |
| Estabilidad mínima (N) | E-748 | 5000 | 7500 | 9000 | |
| Flujo (mm) | E-748 | 2 - 4 | 2 - 4 | 2 - 3.5 | |
| Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm) | E-748 | 2.0 a 4.0 | 3.0 a 5.0 | 3.0 a 6.0 | |
| Vacíos con aire (Va)*, % | Rodadura | E-736 | 3 - 5 | 3 - 5 | 4 - 6 |
| | Intermedia | o | 4 - 8 | 4 - 7 | 4 - 7 |
| | Base | E-799 | - | 5 - 8 | 5 - 8 |
| Vacíos en agregados minerales (VAM), % | T. Máx. 38 mm | E-799 | >13 | >13 | >13 |
| | T. Máx. 25mm | | >14 | >14 | >14 |
| | T. Máx. 19mm | | >15 | >15 | >15 |
| | T. Máx. 10mm | | >16 | >16 | >16 |
| % de vacíos llenos de asfalto (VFA) (Volumen de asfalto efectivo / Vacíos en los agregados minerales) x 100 capas de rodadura e intermedia | E-799 | 65 - 80 | 65 - 78 | 65 - 75 | |

Nota. Tomado de las Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 450.4.2. Elaborado por Instituto Nacional de Vías (2013).

6.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EN ESTUDIO

6.1.1. Caracterización física de los agregados.

El agregado pétreo y los relaves empleados en la elaboración de las mezclas asfálticas para el ensayo Marshall proceden de la planta zafiro del río Guayuriba y el cemento asfáltico de la planta de asfalto pasolin.

A este material se le realizaron los ensayos mencionados en las especificaciones de Instituto Nacional de Vías 2013, los cuales hacen parte de la metodología y sus resultados se presentan a continuación.

6.1.1.1. Agregado grueso.

De acuerdo al Art. 400-13 del INVIAS (2013), el agregado grueso es aquella porción retenida en el tamiz de 4,75 mm (No. 4), la cual deberá proceder de la trituración de roca o grava o la combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, de igual forma estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias que puedan impedir la adhesión completa del asfalto.

Tabla 2. Gradación de comprobación del diseño de mezcla

| TAMIZ UTILIZADO | ABERTURA DEL TAMIZ EN mm. | GRADACIÓN DE MATERIALES | | | | GRADACIÓN FINAL OBTENIDA |
|-------------------|---------------------------|-------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------------------|
| | | GRAVA DE 3/4" | GRAVA DE 1/2" | ARENA TIPO I | ARENA TIPO II | |
| % DE DOSIFICACIÓN | | 15,0% | 22,0% | 38,0% | 25,0% | 100% |
| ¾ | 19,0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ½ | 12,5 | 7 | 89 | 100 | 100 | 84 |
| 3/8 | 9,5 | 2 | 53 | 100 | 96 | 74 |
| No. 4 | 4,75 | 1 | 3 | 83 | 87 | 54 |
| No. 10 | 2,00 | 1 | 1 | 56 | 73 | 40 |
| No. 40 | 0,42 | 1 | 1 | 28 | 35 | 20 |
| No. 80 | 0,180 | 1 | 1 | 18 | 15 | 11 |
| No. 200 | 0,075 | 1,0 | 0,6 | 10,2 | 6,9 | 5,9 |

Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Como se observa en la tabla 3 para cada tipo de material se realizaron 4 ensayos de análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos. Se determinó la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 µm (no. 200) en los agregados pétreos mediante lavado. Para obtener el diseño de la mezcla se tuvieron en cuenta las normas aplicadas: INV-E - 213 y 214 – 2013 (ver figura 2). La gradación final obtenida, es el promedio de los valores de cada material de acuerdo al No de tamiz, multiplicado por el % que ocupa el material dentro de la mezcla.

Figura 2. Caracterización granulométrica de los agregados



Nota. Toma realizada en ensayos de laboratorio.

La tabla 3 presenta los resultados de los ensayos realizados al agregado pétreo grueso; se observa que los valores cumplen con los requisitos mínimos de calidad exigidos por las especificaciones del Instituto Nacional de Vías 2013 para fabricar mezclas tipo MDC-19 para capas de rodadura, categoría NT3.

Tabla 3. Resumen de ensayos combinación de agregado grueso

| MÉTODO | ENSAYO | RESULTADO | CRITERIO DE ACEPTACIÓN | | |
|-----------|---|----------------------|------------------------|-----|-----|
| | | | NT1 | NT2 | NT3 |
| INV E-218 | Resistencia al desgaste, máquina de Los | 24.43 | 25 | 25 | 25 |
| INV E-219 | Ángeles. (% máx.) (500 revoluciones) | | | | |
| INV E-224 | Resistencia mecánica por el método del 10% de finos | 188.05 (seco) | | | |
| INV E-232 | Coefficiente de pulimento acelerado (CPA) | 91.0 (hum) | | | |
| INV E-220 | Sanidad de los agregados frente sulfato de sodio o de magnesio. (% máx.) | 0.5 | | | |
| INV E-223 | Gravedad específica y absorción de agregados gruesos. | 9.10 | 12 | 12 | 12 |
| | Parámetros medidos: | | | | |
| | -Gravedad específica Bulk. | | | | NA |
| | -Gravedad específica Bulk sss. | 2.56 | | | |
| INV E-227 | -Gravedad específica aparente. | 2.61 | | | |
| | -Absorción (%) | 2.70 | | | |
| | Porcentaje de caras fracturadas en los agregados. (% mínimo) | 2.0 | | | |
| INV E-240 | Rodadura | | | | |
| | - 1 cara | 92.6 | 75 | 75 | 85 |
| INV E-230 | - 2 caras | 89.3 | 75 | 60 | 70 |
| | Partículas planas y alargadas | 2 | | | |
| INV E-235 | Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras. | | | | |
| | Índice de Aplanamiento (% máximo). | - | | NA | |
| INV E-125 | Índice de Alargamiento (% máximo). | - | | | |
| | Ensayo de azul de metileno. | 5.01 | | | |
| INV E-126 | Índice de plasticidad % máximo | N.P. | | NA | |
| | Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato micro-deval.(% máximo) | 7.5 | - | 25 | 20 |

Nota. Suministrados por la planta de Zafiro.

6.1.1.2 Agregado fino.

Según el Art. 400-13 del INVIAS (2013), el agregado fino es la porción comprendida entre los tamices de 4.75 mm y 75 μ m (No.4 y No.200), éste estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. Con el fin de poder tener un diseño más exacto se realizan 4 ensayos de granulometría por cada tipo de material, aquí se obtiene el % que pasa de cada uno y se promedian para obtener el % optimo.

Tabla 4. Granulometría agregado fino-arena triturada tipo I

| TAMIZ | Muestra 1 %PASA | Muestra 2 %PASA | Muestra 3 %PASA | Muestra 4 %PASA | Promedio %PASA |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3/4" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1/2" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3/8" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| No. 4 | 81 | 83 | 83 | 83 | 83 |
| No. 8 | 59 | 62 | 61 | 61 | 61 |
| No. 10 | 54 | 57 | 56 | 56 | 56 |
| No. 16 | 42 | 45 | 44 | 44 | 44 |
| No. 30 | 33 | 35 | 34 | 33 | 34 |
| No. 40 | 27 | 29 | 29 | 28 | 28 |
| No. 50 | 24 | 36 | 25 | 24 | 27 |
| No. 80 | 17 | 19 | 18 | 17 | 18 |
| No. 100 | 14 | 17 | 15 | 14 | 15 |
| No. 200 | 9,7 | 11,3 | 10,3 | 9,5 | 10,2 |

Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Como se aprecia en las tablas 5 y 6, las granulometrías de la arena utilizada para realizar las mezclas del presente estudio se ajustan a los requerimientos del INVIAS 2013, por lo cual estos agregados finos permitieron realizar ensayos acordes a las normas colombianas para elaboración de MDC 19.

Tabla 5. Granulometría agregado fino-arena triturada tipo II

| TAMIZ | Muestra 1 %PASA | Muestra 2 %PASA | Muestra 3 %PASA | Muestra 4 %PASA | Promedio %PASA |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3/4" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1/2" | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3/8" | 97 | 97 | 96 | 95 | 96 |
| No. 4 | 85 | 89 | 87 | 85 | 87 |
| No. 8 | 74 | 79 | 75 | 74 | 76 |
| No. 10 | 71 | 77 | 73 | 71 | 73 |
| No. 16 | 61 | 65 | 62 | 61 | 62 |
| No. 30 | 45 | 49 | 46 | 45 | 46 |
| No. 40 | 34 | 37 | 34 | 33 | 35 |
| No. 50 | 27 | 29 | 27 | 27 | 28 |
| No. 80 | 14 | 16 | 14 | 14 | 15 |
| No. 100 | 11 | 13 | 11 | 11 | 12 |
| No. 200 | 6,8 | 7,4 | 6,8 | 6,6 | 6,9 |

Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Como se observa en la tabla 6 los resultados de estas pruebas satisfacen las exigencias indicadas en el numeral 400.2.1 del Artículo 400, los cuales se resumen en la tabla 400.1(a), 400.1 (b) y 400.1(c) del mismo INVIAS (2013).

Tabla 6. Resumen ensayos agregado fino combinado

| MÉTODO | ENSAYO | RESULTADO | CRITERIO DE ACEPTACIÓN (ART. 400-13 INVIAS) | | |
|-----------|---|--------------|---|-----|-----|
| | | | NT1 | NT2 | NT3 |
| INV E-133 | Equivalente de arena de suelos y agregados finos | 63 | | | |
| INV E-220 | Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. (% máx.) | 9.09 | 12 | 12 | 12 |
| INV E-222 | Gravedad específica y absorción de agregados finos. | 2.43 | | | |
| | Parámetros medidos: | | | | |
| | -Gravedad específica Bulk. | 2.55 | | NA | |
| | -Gravedad específica Bulk sss. | 2.65 | | | |
| INV E-239 | -Gravedad específica aparente. | 1.8 | | | |
| | -Absorción (%) | 49% | | | |
| | Angularidad de la fracción fina | 49% | | | |
| INV E-125 | Índice de plasticidad % máximo | N.P. | | NA | |
| INV E-126 | | | | | |
| INV E-235 | Valor de azul de metileno en agregados finos | 5.02% | | | |

Nota. Suministrados por la planta zafiro.

6.1.1.3 Agregados combinados.

De acuerdo a los resultados registrados en la tabla 4 de la caracterización del agregado pétreo, se concluye que este material cumple con los criterios de aceptación establecidos en el Artículo 400-13 “Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos” del Instituto Nacional de Vías (2013).

Tabla 7. Resumen ensayos agregados combinados

| MÉTODO | ENSAYO | RESULTADO | CRITERIO DE ACEPTACIÓN (ART. 400-13 INVIAS) | | |
|-----------|--|------------|---|-----|-----|
| | | | Agregados combinados | NT1 | NT2 |
| INV E-126 | Límite plástico e índice de plasticidad de suelos. (% máx.). | NP | NP | NP | NP |
| INV E-133 | Equivalente de arena de suelos y agregados finos. (% min) | 64 | 50 | 50 | 50 |
| INV E-235 | Ensayo de azul de metileno. (% máx.) | 5.1 | 10 | 10 | 10 |

Nota. Suministrados por la planta zafiro.

6.1.2. Caracterización química de los relaves.

Para determinar las características químicas de los relaves (ver figura 3) se utilizó el espectrómetro de fluorescencia de rayos X, ensayo y resultados suministrados por la Universidad Nacional de Colombia, para la detección de elementos pesados metálicos y otros compuestos, obtenido los resultados que se presentan en la tabla 8.

Figura 3. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X



Fuente: <https://wpo-altertechnology.com/es/xrf-x-ray-fluorescence-spectroscopy-hi-rel-parts/>

Tabla 8. Composición química de relaves

| Nombre | Elemento y/o compuesto | % en peso |
|-----------|--------------------------------|-----------|
| Silicio | SiO ₂ | 65.31% |
| Aluminio | Al ₂ O ₃ | 13.64% |
| Hierro | Fe ₂ O ₃ | 5.73% |
| Potasio | K ₂ O | 2.39% |
| Sodio | Na ₂ O | 0.91% |
| Magnesio | MgO | 0.86% |
| Titanio | TiO ₂ | 0.65% |
| Azufre | SO ₃ | 0.45% |
| Calcio | CaO | 0.32% |
| Fosforo | P ₂ O ₅ | 0.17% |
| Manganeso | MnO | 0.08% |
| Bario | Ba | 0.06% |
| Circonio | Zr | 0.04% |
| Cromo | Cr | 0.03% |
| Cerio | Ce | 0.02% |
| Rubidio | Rb | 0.01% |
| Zinc | Zn | 78 ppm |
| Plomo | Pb | 64 ppm |
| Vanadio | V | 56 ppm |
| Itrio | Y | 34 ppm |
| Estroncio | Sr | 21 ppm |
| Niobio | Nb | 18 ppm |

Nota. Suministrado por la Universidad Nacional de Colombia.

De acuerdo a los resultados de la tabla 8, los relaves obtenidos del proceso de la minería en el río Guayuriba se encuentran compuestos en su gran mayoría por 4 compuestos, siendo estos, en su orden: silicio (64.31%), aluminio (13.64%), Hierro (5.73%) y Potasio (2.39%).

6.1.3. Caracterización del cemento asfáltico.

El cemento asfáltico utilizado es de penetración 60-70, de la planta PASOLIN; A éste se le realizaron los ensayos típicos que exige la especificación del Instituto Nacional de Vías (2013) para caracterizarlos: ductilidad (INV E-702), penetración (25° C, 100 g, 5 s) (INV E-706), punto de ignición y punto de llama media la copa abierta de Cleveland (INV E-709) y punto de ablandamiento (INV E-712) [11]. Los resultados de estos ensayos se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Resumen de ensayos cemento asfáltico

| Ensayo | | Método | Unidad | Valor de Referencia | Resultado |
|---|--|------------|-------------------|---------------------|------------------------------|
| Densidad Bulk del llenante mineral en kerosene | | INV. E-225 | g/ml | Reportar | 0.71 |
| Ductilidad (25°C, 50 mm/min) | | INV E-702 | Cm | 100 min | 140 |
| Penetración (25°C, 100 g, 5s) | | INV E-706 | 0.1 mm | 60 min | 70 |
| Punto de inflamación | | INV E-709 | °C | 232 min | 280° C |
| Punto de ablandamiento | | INV E-712 | °C | 48 min - 55 max | 48.9°C |
| Viscosidad (60°C) | | INV. E-716 | cP | 1500 min | 238000 |
| Índice de espesor de la película de asfalto que cubre los agregados | | INV. E-741 | µm | >7.5 | 9.7 |
| Concentración crítica de llenante en mezclas de concreto asfáltico | | INV. E-745 | g/cm ³ | Valor critico | 0.378 0.264 |

Nota. Suministrada por el proveedor de asfalto.

Al cemento asfáltico utilizado se le realizaron los ensayos respectivos encontrando que los valores cumplen con los requisitos mínimos de calidad exigidos por las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (2013) para fabricar mezclas tipo MDC-19 para capas de rodadura, para que el estudio estuviera ajustado a la norma.

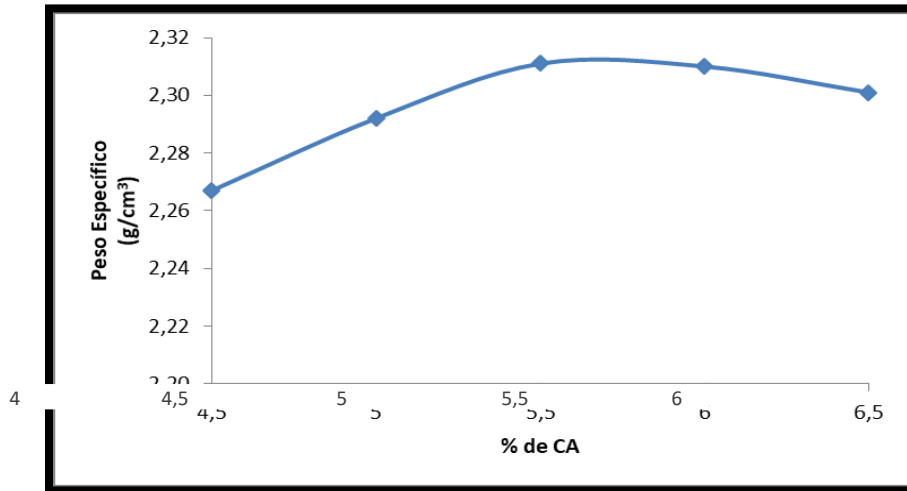
Estos resultados son similares a los obtenidos por Suarez y Santos (2009), en cuya investigación trabajaron con materiales ajustados a las exigencias del INVIAS, lo que les permitió darles mayor validez a los resultados obtenidos al fallar las briquetas.

6.2. PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO (4%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%) PARA LA MEZCLA MDC-19 CONVENCIONAL

La figura 4 permite apreciar el comportamiento de peso específico Bulk en mezclas asfálticas convencionales con variación de cemento asfáltico en 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y

6%, donde se observa que el comportamiento del peso de las mezclas con menor ligante es menor que el resto de porcentajes; además, los dos porcentajes que expresaron mayor peso fueron 5% y 5.5% de cemento asfáltico, no obstante la diferencia entre los resultados de esta variable no es significativa pues presentan un intervalo entre 2.29 y 2.31 g/cm³.

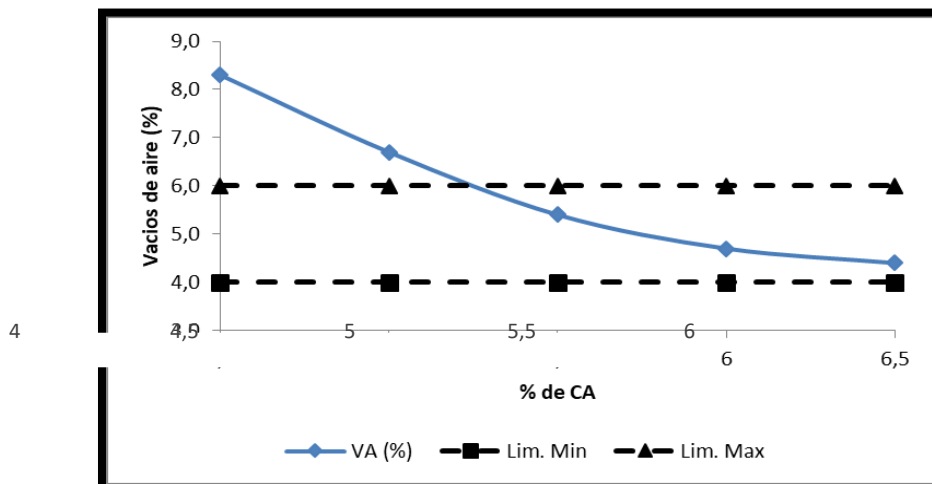
Figura 4. Comportamiento de peso específico Bulk en MDC-19 convencional frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Por su parte la figura 5 permite afirmar que las mezclas con 5.5% y 6% son las que presentaron menores porcentaje de vacíos de aire; además las briquetas con porcentajes de ligante de 4% y 4.5% expresaron porcentajes de vacíos de aire superiores a los permitidos por la norma INVIAS (2013).

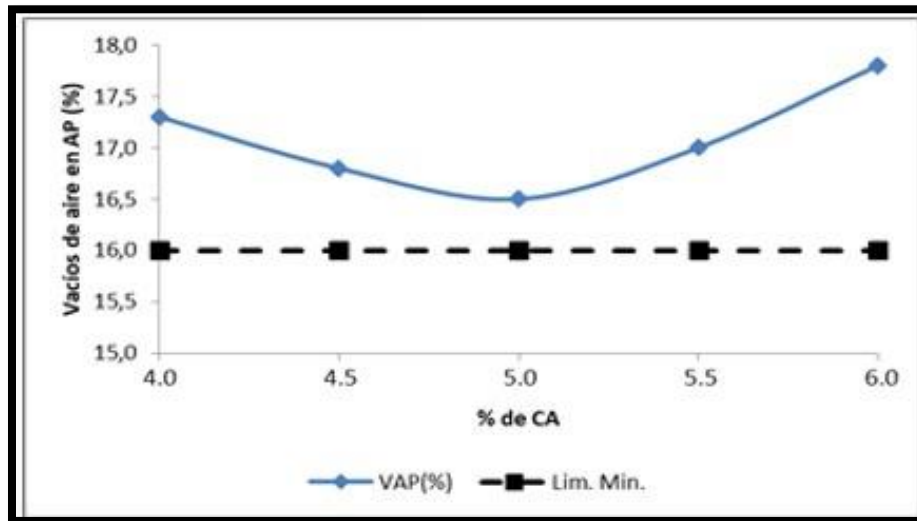
Figura 5. Comportamiento de vacíos de aire en MDC-19 convencional frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

La figura 6 muestra que los porcentajes de vacíos de aire en agregados pétreos de las MDC-19 convencionales presentan aumento elíptico con la variación del cemento asfáltico, siendo las briquetas al 6.5% de CA las que mayor % de vacíos en AP demostraron.

Figura 6. Comportamiento de vacíos de aire en el agregado pétreo en MDC-19 convencional frente a variación de % de CA



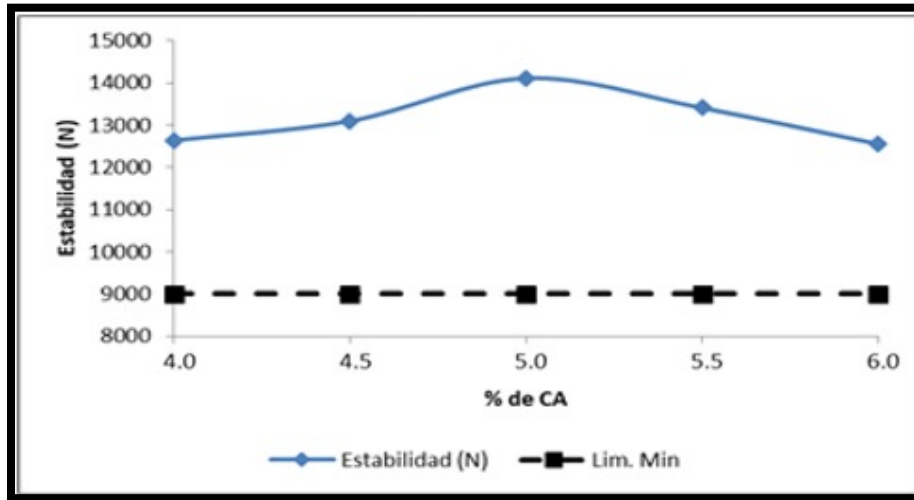
Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Al comparar estos resultados con los parámetros mínimos que estipula la tabla 10 del Art. 450 de INVIAS -13 se evidencia que todas las mezclas cumplen el límite mínimo para todas las categorías de tránsito, que debe ser superior al 16% para la carpeta más delgada permitida por INVIAS cuyo tamaño máximo es de 10 mm.

Así las cosas el comportamiento de las mezclas asfálticas con variación de betún 60/70 (4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%) se puede identificar que en cuanto a los valores volumétricos se mantuvo una relación inversamente proporcional entre la gravedad específica Bulk y el porcentaje de vacíos de aire, pues las probetas falladas que demostraron mayor peso presentaron menores vacíos y viceversa, pues el peso total de las briquetas se equilibra, esto se da de acuerdo a lo señalado por Suarez y Santos (2009), quienes sostienen que entre más peso posea es más compacta la mezcla y se generan menos vacíos de aire.

Al igual hay que resaltar que cuando las mezclas tienen 5% de ligante registran menor densidad Bulk; aunque las mezclas convencionales con 5%, 5.5% y 6% de CA, son las únicas que cumplieron con las exigencias de la tabla 10 del Art. 450 de INVIAS-13 en relación a las propiedades volumétricas, pues pese a que todas cumplieron con la densidad y vacíos en AP, sólo las mezclas señaladas cumplen con los límites (mínimo y máximo) para todas las categorías de tránsito para la elaboración de carpeta de rodadura.

Figura 7. Comportamiento de estabilidad de la MDC-19 convencional frente a variación de % de CA

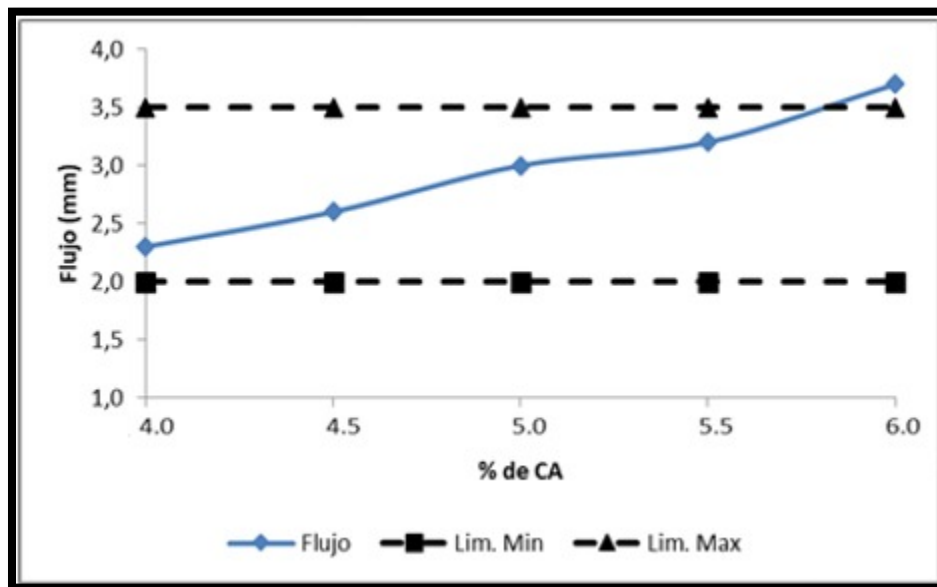


Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

En materia de estabilidad, esta tuvo un comportamiento parabólico siendo el punto más alto cuando la mezcla convencional se fabricó con 5.5% de cemento asfáltico, no obstante, las diferencias no fueron altas y todas las variaciones en estudio superaron los criterios de INVIAS (2013) en cuanto a la estabilidad para vías de categoría NT3 (máxima categoría), pues en todos los casos superaron los 9000 N de estabilidad (ver figura 7).

La figura 8 deja ver el comportamiento de los asfaltos convencionales en cuanto a flujo, donde se evidencia una relación directamente proporcional entre el % de CA y el flujo, lo que significa que a mayor cantidad de betún es más fluida la mezcla.

Figura 8. Comportamiento del flujo de la MDC-19 convencional frente a variación de % de CA



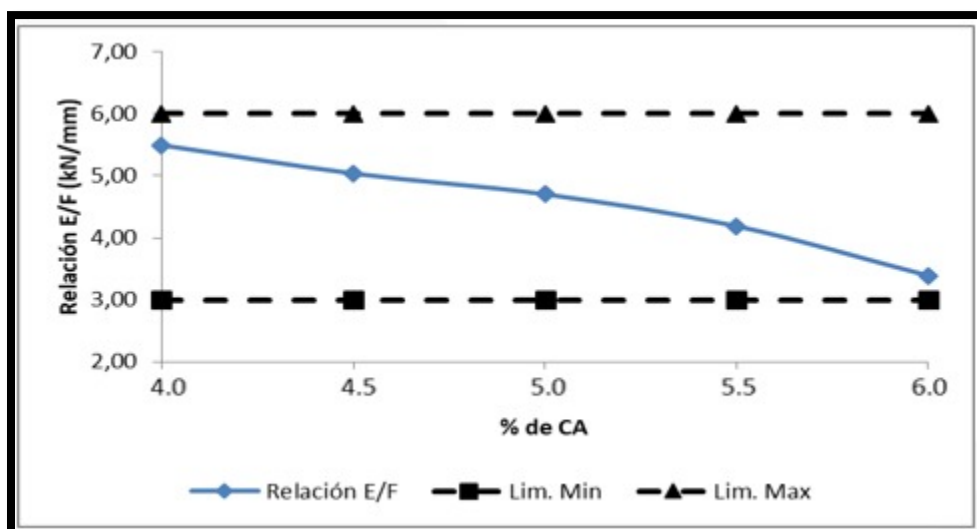
Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Hay que señalar que las mezclas con 6.5% de CA no cumplieron los criterios de INVIAS (2013) en cuanto a flujo para mezclas densas en caliente utilizadas en vías categoría NT3, pues se pasa del límite superior; por ende, las otras MDC-19 si cumplen.

Es de anotar que una mezcla asfáltica con alto rango de flujo produce deformación plástica en la misma, por lo cual esta variable debe ser controlada acorde a los criterios de INVIAS 2013 para evitar las patologías de asfalto producidas por esta causa y por ende tener que invertir mayores recursos en el mantenimiento correctivo de las vías construidas con mezclas muy fluidas (Blanco y Montañez, 2016), por lo cual en el presente estudio se descarta la mezcla con 6.5% de betún.

En cuanto a la relación estabilidad/flujo las mezclas expresaron un comportamiento inversamente proporcional, pues a mayor porcentaje de ligante menor fue esta relación (ver figura 9); aunque hay que señalar que todas las briquetas se comportaron dentro de los criterios exigidos por INVIAS (2013).

Figura 9. Comportamiento de relación estabilidad/flujo de la MDC-19 convencional frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Por lo tanto, en la MDC-19 con 5% de ligante resulta ser el porcentaje óptimo para fabricar MDC-19 con material pétreo del río Guayuriba y el cemento asfáltico de la planta PASOLIN con módulo de penetración 60/70, pues fue la mezcla que cumplió con todas las especificaciones INVIAS para elaboración de vías de categoría NT3 en Colombia.

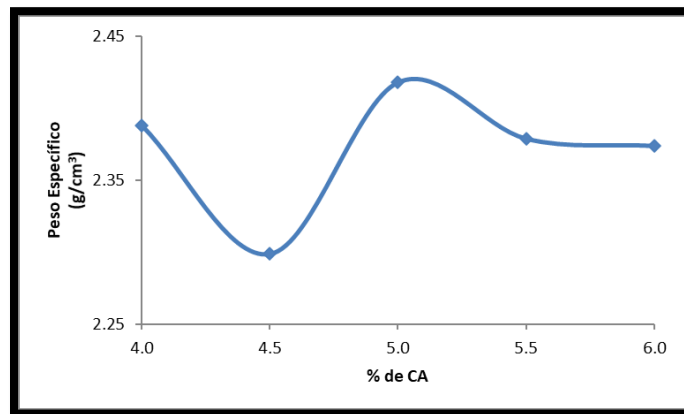
6.3. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA PORCENTAJE DE REEMPLAZO SEGÚN EL DISEÑO MODELO.

El reemplazo del agregado por el relave producto de la minería de agregados se realizó en el porcentaje de arena, siendo este hecho en el 25% y 50% de este agregado fino; seguidamente se presentan los resultados obtenidos de las briquetas falladas por cada uno de estos porcentajes según los criterios de aceptación del INVIAS (2013).

6.3.1. MDC-19 con reemplazo con del 25% de arena

La figura 10 permite apreciar el comportamiento de peso específico Bulk en mezclas asfálticas modificadas con reemplazo del 25% de la arena con variación de cemento asfáltico en 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%, donde se observa que el comportamiento del peso de las mezclas con menor ligante es menor que el resto de porcentajes; además, el porcentaje que expresó mayor peso fue 5% de cemento asfáltico, no obstante la diferencia entre los resultados de esta variable no es significativa pues se representan en un intervalo entre 2.29 y 2.41 g/cm³.

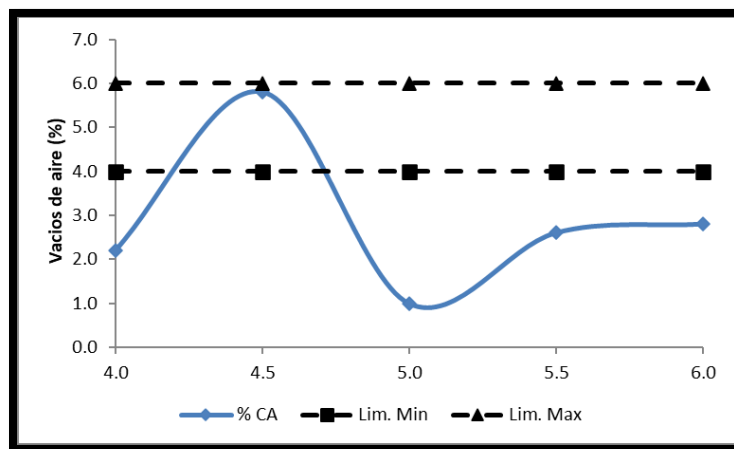
Figura 10. Comportamiento de peso específico Bulk en MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Por su parte la figura 11 permite afirmar que la mezcla con 4.5% de betún es la única que posee vacíos de aire que son aceptados por INVIAS (2013), el resto de las mezclas arrojan valores que no alcanzan a dicho criterio.

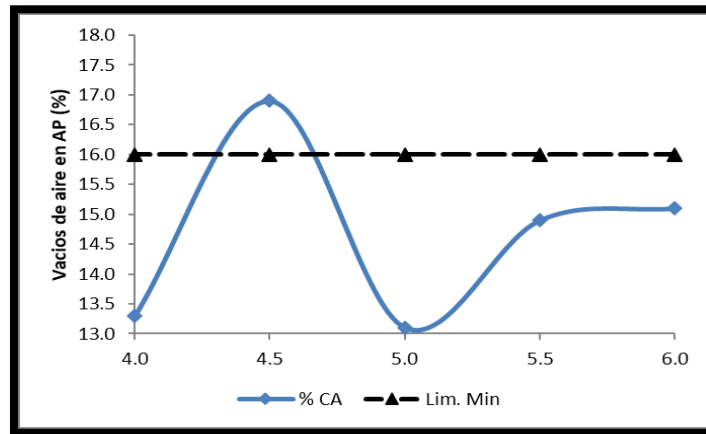
Figura 11. Comportamiento de vacíos de aire en MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

En contraste con lo anterior, la figura 12 muestra que los porcentajes de vacíos de aire en agregados pétreos de las MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena presentan aumento cíclico con la variación del cemento asfáltico, siendo las briquetas al 4.5% de CA las que mayores vacíos en AP demostraron.

Figura 12. Comportamiento de vacíos de aire en el agregado pétreo en MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA

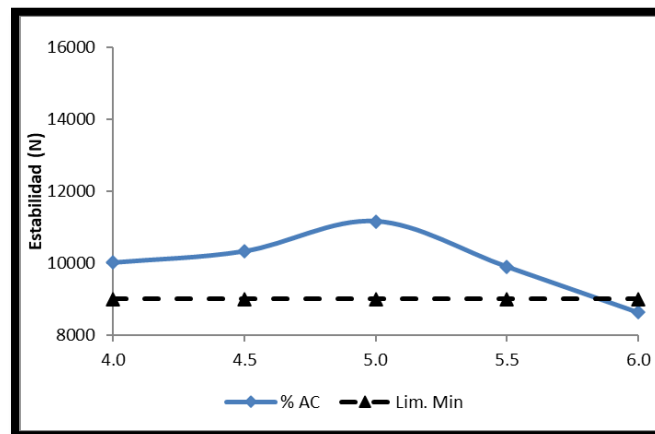


Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Al comparar estos resultados con los parámetros mínimos que estipula la tabla 10 del Art. 450 de INVIAS (2013) se evidencia que casi todas las mezclas cumplen el límite mínimo para todas las categorías de tránsito. A excepción de la briketa con 4.5% de ligante que superó la limitante de VAP.

Hay que resaltar que cuando las mezclas tienen 5% de ligante registran menor densidad Bulk; aunque todas las mezclas modificadas con reemplazo del 25% de la arena con las variaciones de asfalto, de cumplir los vacíos de aire no cumplían los VAP y viceversa, por lo que no superan los requerimientos de INVIAS (2013), es por ello que al reemplazar el 25% de la arena por relave se afectan los vacíos.

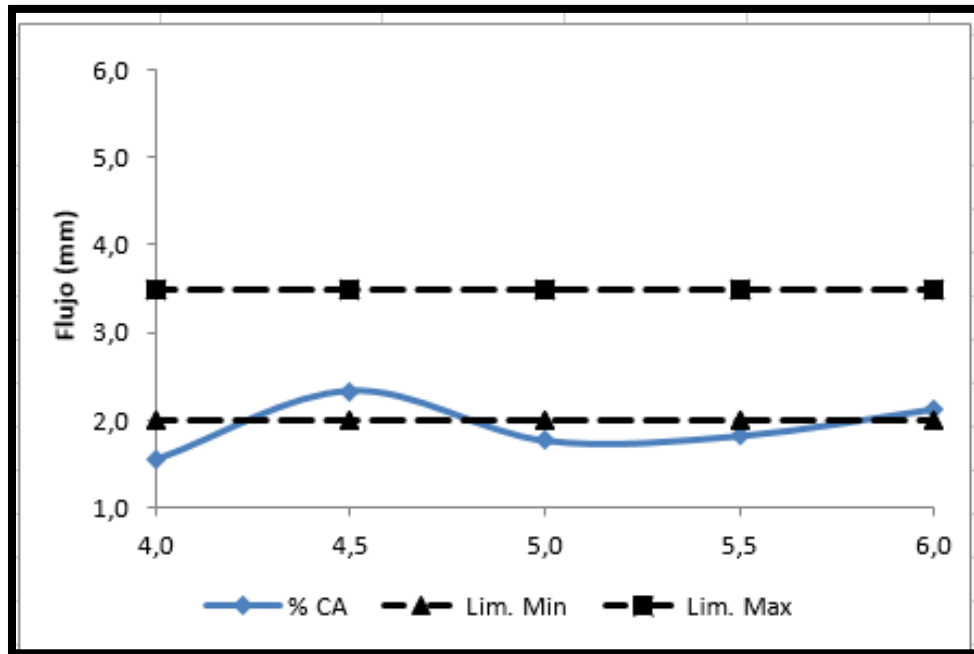
Figura 13. Comportamiento de estabilidad de la MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

En materia de estabilidad, esta tuvo un comportamiento parabólico siendo el punto más alto cuando la mezcla modificada con el 25% de reemplazo de arena por relaves se fabricó con 5% de cemento asfáltico, no obstante, al realizar la mezcla con 6% de AC esta no alcanzó a cumplir el parámetro de INVIAS (2013), por ello las demás se podrían considerar para su utilización en vías de categoría NT3 (máxima categoría), pues en todos los casos superaron los 9000 N de estabilidad (ver figura 13).

Figura 14. Comportamiento del flujo de la MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA

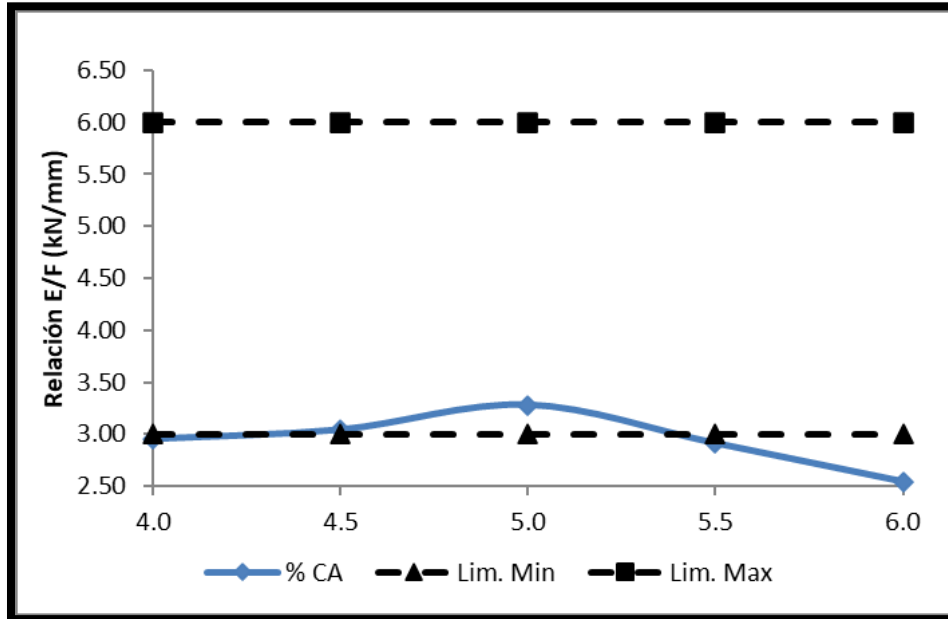


Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

La figura 14 deja ver el comportamiento de los asfaltos modificados con 25% de reemplazo de arena por relaves en cuanto a flujo, donde se evidencia una constante en todas las variaciones de ligante, permitiendo inferir que los relaves le permiten obtener un flujo muy cercano a los límites máximos de INVIAS (2013) para MDC-19.

En cuanto a la relación estabilidad/flujo las mezclas expresaron un comportamiento directamente proporcional con la estabilidad, pues el flujo en las briquetas es constante (ver figura 11); aunque al incorporar 6% de AC la mezcla no alcanzó a cumplir el parámetro de INVIAS (2013).

Figura 15. Comportamiento de relación estabilidad/flujo de la MDC-19 con reemplazo del 25% de la arena frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

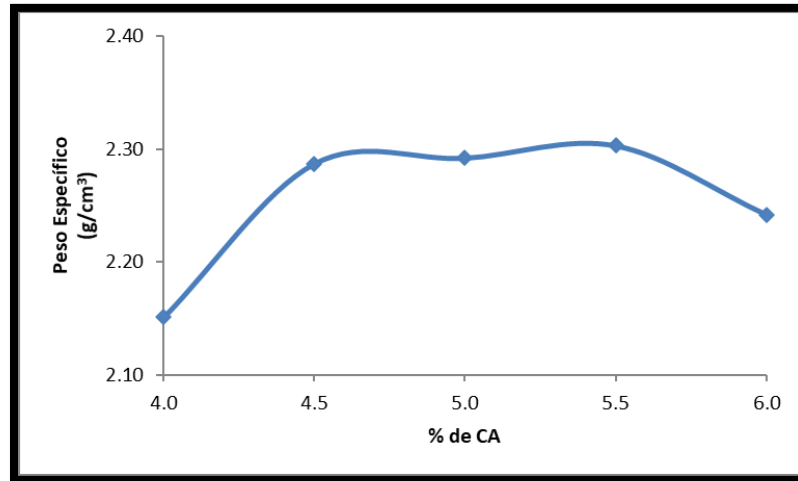
A pesar de que ningunas de las mezclas cumplieron con todos los criterios de INVIAS (2013) para fabricar MDC-19, pues los resultados volumétricos afectaron el adecuado diseño de la MDC-19; la mezcla modificada con 25% de arena por relaves y 5% de ligante tuvo un mejor desempeño que las demás; no obstante, es necesario modificar la mezcla para que aumente los vacíos de aire requeridos sin que tenga gran efecto sobre las demás variables.

6.3.2. MDC-19 con reemplazo con del 50% de arena

Con respecto a las mezclas asfálticas modificadas con reemplazo del 50% de la arena con variación de cemento asfáltico en 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%, la figura 16 permite observar el comportamiento de peso específico Bulk, identificando que el comportamiento del peso de las mezclas con menor ligante es menor que el resto de porcentajes; además, el porcentaje que expresó mayor peso fue 5.5% de cemento asfáltico, no obstante la diferencia entre los resultados de esta variable no es significativa pues se expresaron en un intervalo entre 2.15 y 2.28 g/cm³.

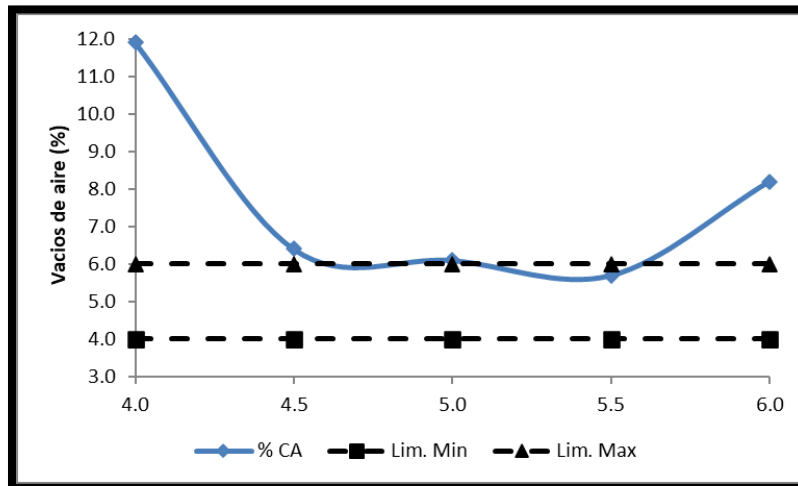
Figura 16.

Comportamiento de peso específico Bulk en MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Figura 17. Comportamiento de vacíos de aire en MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA

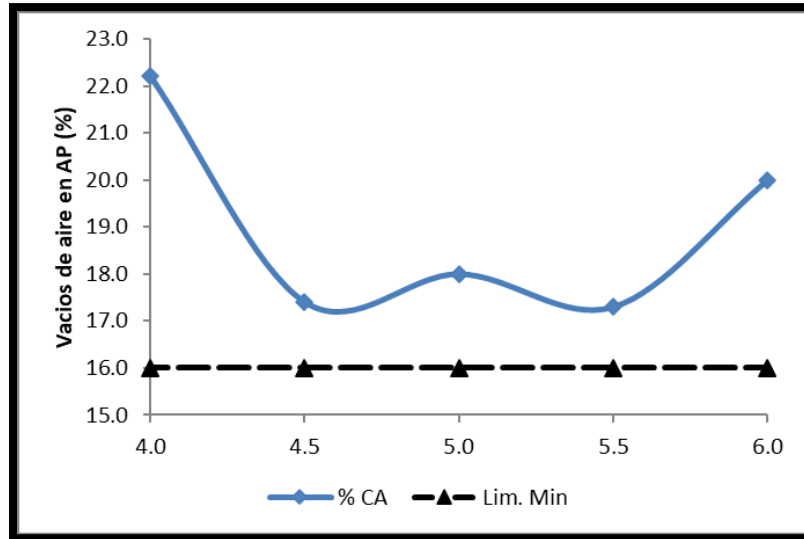


Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

A su vez, la figura 17 permite afirmar que la mezcla con 5.5% de betún es la única que posee vacíos de aire que son aceptados por INVIAS (2013), el resto de las mezclas arrojan valores que no alcanzan a dicho criterio; aunque la mezcla con 5% de ligante sobrepasa levemente el límite.

En contraste con lo anterior, la figura 18 muestra que los porcentajes de vacíos de aire en agregados pétreos de las MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena presentan aumento cíclico con la variación del cemento asfáltico, siendo las briquetas al 4% de CA las que mayores vacíos en AP demostraron.

Figura 18. Comportamiento de vacíos de aire en el agregado pétreo en MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA

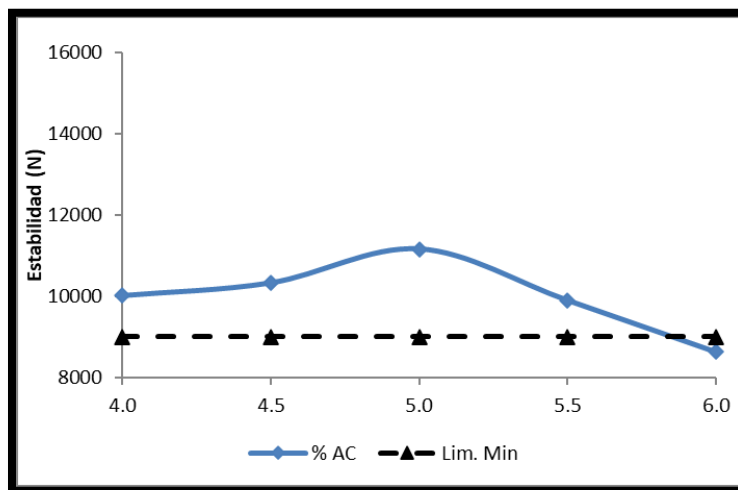


Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Al comparar estos resultados con los parámetros mínimos que estipula la tabla 10 del Art. 450 de INVIAS (2013) se evidencia que todas las mezclas cumplen el límite mínimo para todas las categorías de tránsito.

Es de anotar que cuando las mezclas tienen 4% de ligante registran menor densidad Bulk; aunque todas las mezclas modificadas con reemplazo del 50% de la arena con las variaciones de asfalto, de cumplir los vacíos de aire no cumplirían los VAP y viceversa; no obstante, la mezcla modificada con relave y 5.5% de CA es la única que supera los requerimientos volumétricos de INVIAS (2013).

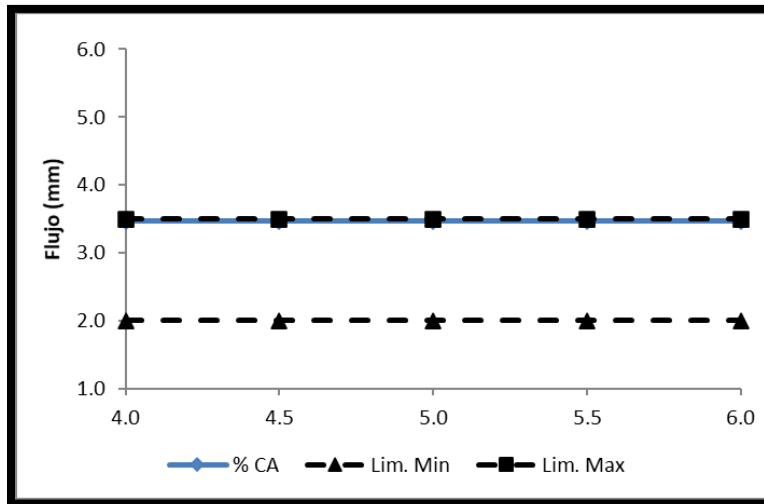
Figura 19. Comportamiento de estabilidad de la MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Con respecto a estabilidad, la figura 19 muestra un comportamiento parabólico, siendo el punto más alto cuando la mezcla modificada con relave (50% de reemplazo de arena) con 5% de betún; sin embargo, al incorporar 6% de AC la mezcla no alcanzó a cumplir el parámetro de INVIAS (2013), por ello las demás se podrían considerar para su utilización en vías de categoría NT3 (máxima categoría), pues en todos los casos superaron los 9000 N de estabilidad.

Figura 20. Comportamiento del flujo de la MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA

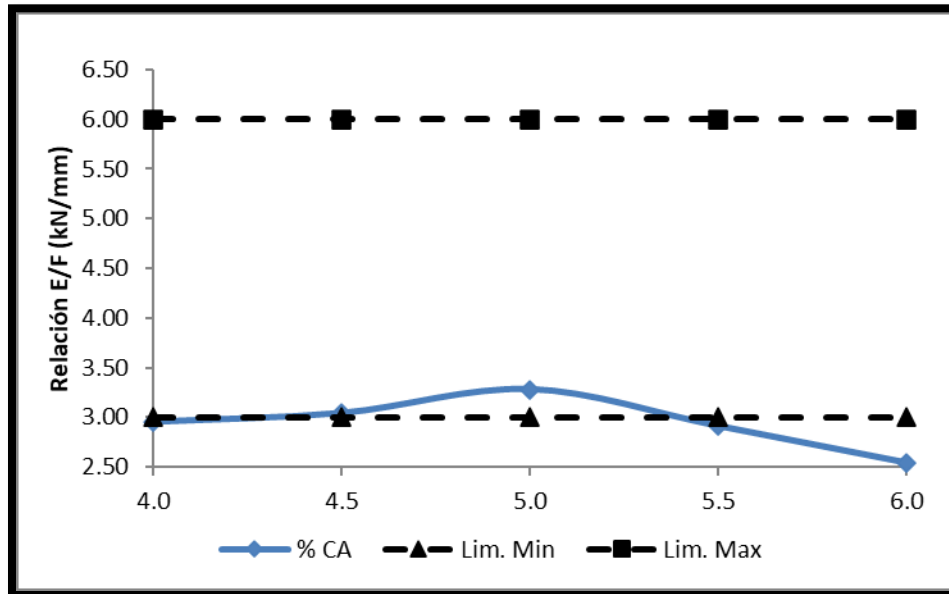


Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

La figura 20 deja ver el comportamiento de los asfaltos modificados con 50% de reemplazo de arena por relaves en cuanto a flujo, donde, al igual que los resultados de las briquetas con reemplazo de arena al 25% por relaves, se evidencia una constante en todas las variaciones de ligante, dándole a las MDC-19 un flujo muy cercano a los límites máximos de INVIAS (2013).

En cuanto a la relación estabilidad/flujo las mezclas expresaron un comportamiento directamente proporcional con la estabilidad, ya que el flujo en las briquetas es constante (ver figura 21); aunque sólo las mezclas con 4.5% y 5% de AC demostraron cumplir con los parámetros de INVIAS (2013), aunque la mezcla al 5.5% tuvo mejor desempeño.

Figura 21. Comportamiento de relación estabilidad/flujo de la MDC-19 con reemplazo del 50% de la arena frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

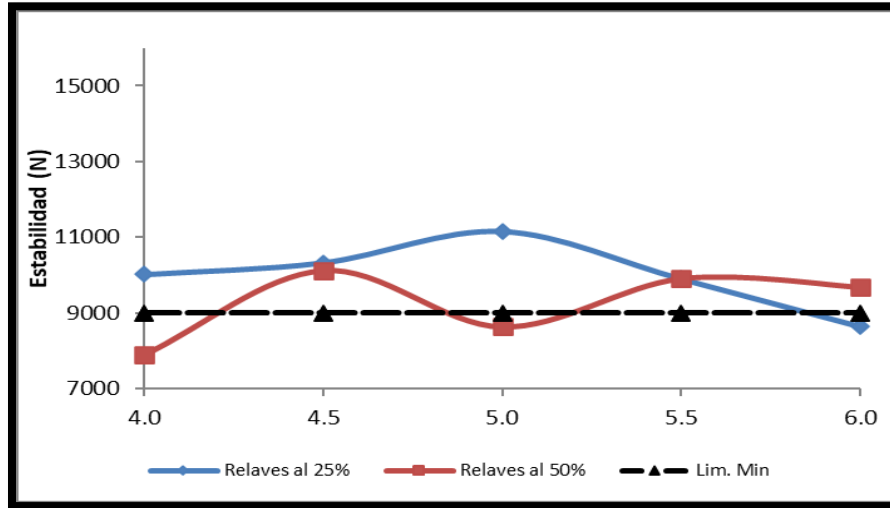
Así las cosas, pese a que ninguna de las mezclas cumplió con todos los criterios de INVIAS (2013) para fabricar MDC-19, pues las que superan los requerimientos volumétricos en algún momento no superan los de estabilidad-flujo y viceversa; no obstante, la que más se acerca a ello es la compuesta por 50% de reemplazo de arena por relave y 5% de cemento asfáltico

6.4. RELACIÓN DE MEZCLA ENTRE PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO Y PORCENTAJE DE REEMPLAZO DE ARENA ACORDE A INVIAS 2013

Para realizar la relación de mezcla entre porcentaje óptimo de asfalto y porcentaje de reemplazo de arena acorde a INVIAS 2013 se procedió a comparar los datos de resistencia, encontrando lo siguiente:

La estabilidad, como se presenta en la figura 22, de acuerdo a los porcentajes de reemplazo de arena por relaves, muestra un comportamiento parabólico (relaves al 25%) y oscilante (relaves al 50%), teniendo un comportamiento similar las mezclas con ligante al 4.5% y 5.5%, alcanzado estas últimas estas por encima del límite mínimo que exige INVIAS (2013) para MDC-19.

Figura 22. Comportamiento de estabilidad de la MDC-19 con reemplazo al 25 y 50% de la arena por relaves frente a variación de % de CA

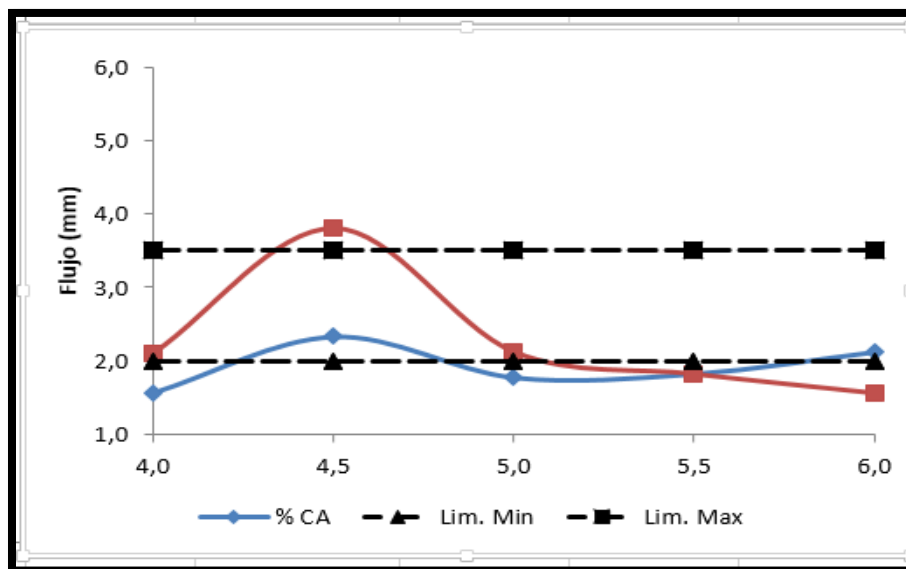


Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

A su vez, cuatro de las cinco modificaciones de CA de mezclas con relaves al 25% superan los requisitos de INVIAS (2013), en cambio tres de cinco lo hacen con relaves al 50%, es por ello que en cuanto a estabilidad las mezclas donde se reemplazó el 25% de la arena por relave demostraron un mejor comportamiento.

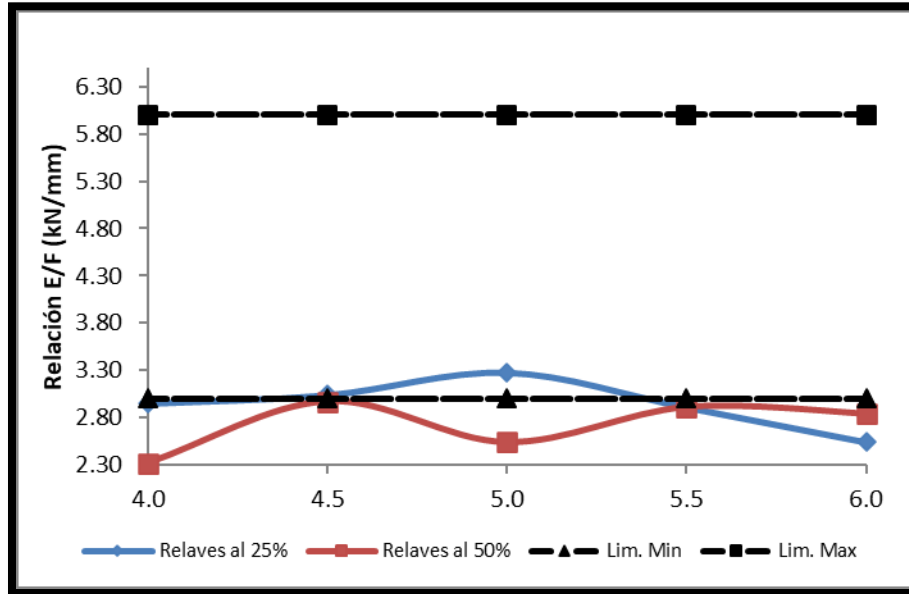
Por su parte, en relación a flujo (ver figura 23), las mezclas de juntos reemplazos (al 25% y al 50% de relaves) tuvieron un comportamiento igualmente constante en todas las variaciones de ligante, dándole a las MDC-19 un flujo muy cercano a los límites máximos de INVIAS (2013).

Figura 23. Comportamiento del flujo de la MDC-19 con reemplazo al 25 y 50% de la arena por relaves frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Figura 24. Comportamiento de relación estabilidad/flujo de la MDC-19 con reemplazo al 25 y 50% de la arena por relaves frente a variación de % de CA



Nota. Elaborada a partir de los ensayos de laboratorio.

Por último, la figura 24 permite evidenciar un comportamiento similar en la relación estabilidad/flujo comparado con los resultados de estabilidad; no obstante, sólo las mezclas con 4.5% y 5% de AC con 25% de reemplazo de arena por relaves demostraron cumplir con los parámetros de INVIAS (2013).

Las mezclas con 25% de reemplazo de arena por relaves demostraron un mejor comportamiento, siendo la MDC-19 con 5% de ligante la que mejor comportamiento mecánico expresó, por ello es la más recomendada.

7. RESULTADOS E IMPACTOS

Tabla 10. Resultados.

| RESULTADO | INDICADOR | OBJETIVO RELACIONADO |
|--|---|-----------------------|
| Caracterización de materiales pétreos del río Guayuriba y relaves | Ensayos fisicoquímicos de laboratorio. | Objetivo específico 1 |
| Determinación del porcentaje óptimo de asfalto entre (4%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%) para MDC-19 convencional | Porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla convencional | Objetivo específico 2 |
| Comparación de resultados obtenidos en cada porcentaje de reemplazo según el diseño modelo | Tabla de estabilidad/flujo para reemplazo del 25% y 50% | Objetivo específico 3 |
| Relación de mezcla entre porcentaje óptimo de asfalto y porcentaje de reemplazo de arena | Tabla de estabilidad/flujo para reemplazo del 25% y 50% | Objetivo específico 4 |

Nota. Elaboración propia.

Tabla 11. Impactos.

| Aspecto | Impacto | Actividad | Plazo |
|----------------------|---|--|---------------|
| Técnico Constructivo | Mejorar el comportamiento mecánico de una MDC-19 | Elaboración de MDC-19 con reemplazo de arena por relaves | Corto plazo |
| ambiental | Mitigación de la contaminación ambiental en las zonas mineras generado por el uso de los relaves en fabricación de MDC-19 | Utilización del diseño de mezcla con reemplazo de arena por relaves en carreteras del Meta | Mediano plazo |
| Académico | Diseño de nuevas mezclas con integración de materiales reciclados de la industria de la construcción | Realización de estudios empíricos para generar nuevas mezclas asfálticas | Largo plazo |

Nota. Elaboración propia.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

El estudio se desarrolló con agregados pétreos y relaves procedentes del río Guayuriba que según los resultados de laboratorio expuestos en la tabla 3 (Resumen de ensayos combinación de agregado grueso) cumplen los requisitos mínimos de la norma INVIAS, 2013 mostrando una resistencia al desgaste cercana al límite máximo y un alto porcentaje de caras fracturadas lo que favorece la adherencia del cemento asfáltico y cumpliendo con el artículo 400-13 “Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos”. Como se evidencia en la tabla 5 y 6 las granulometrías de la arena utilizada también se ajustan al requerimiento del INVIAS; 2013. El cemento asfáltico 60/70 procedente de la planta pasolin se concluye que posee características que aprueban las normas de ductilidad (INV-E-702), penetración (25° C, 100 g, 5s) (INV E-706), punto de ignición y punto de llama media la copa de abierta de Cleveland (INV E-709) y punto de ablandamiento (INV E-712). Por lo tanto, se contó con material grueso, fino y combinado de buena calidad y ligante adecuado para módulo de penetración 60/70, acorde a los parámetros INVIAS; 2013.

En relación al porcentaje óptimo de cemento asfáltico (4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%) para la mezcla asfáltica (MDC-19), según la figura 4 y 5 se pudo establecer una relación directamente proporcional entre el uso del ligante con el comportamiento el aumento del peso específico y la reducción de los porcentajes de vacíos (tanto VA como VAP), aunque la diferencia entre los intervalos de peso específico según el CA es muy baja pues varía en 2.29 y 2.31 g/cm³; de igual forma se presenta mayor grado de fluidez, sin embargo varía la estabilidad y la relación E/F; no obstante el comportamiento de rigidez que presentan las mezclas elaboradas con un 5% de CA, así como la presencia de vacíos de aire y el flujo reflejan que es el porcentaje óptimo para los materiales y la granulometría utilizada.

Según las figuras 22, 23 y 24 las mezclas modificadas tuvieron un comportamiento más homogéneo que las convencionales, dejando ver que el relave ayuda a ocupar más los espacios; además, las mezclas modificadas son similares con el reemplazo de la arena por relaves en cuanto a estabilidad y flujo, incrementando estas variables a medida que se aumentó el porcentaje de reemplazo en CA, lo que hizo que la relación E/F fuera más homogénea.

A su vez, los resultados de los ensayos representados en las figuras 22, 23 y 24 permitieron identificar un mejor comportamiento en las probetas con reemplazos de 25% por relaves de la arena en la granulometría para MDC-19, pues esta mezcla tiende a cumplir con más criterios de INVIAS (2013) para capa de rodadura en vías de categoría NT3, que las mezclas con relaves al 50%, demostrando un mejor comportamiento al contar con 5% de ligante.

Por todo lo anterior se puede concluir que al analizar la resistencia alcanzada mecánicamente a través del ensayo Marshall, para una mezcla densa en caliente MDC-19 con reemplazo de arena por relaves, se logró determinar que esta mezcla demuestra mejores propiedades mecánicas cuando se le reemplaza el 25% por relaves y 5% de ligante, pues representó una estabilidad de 1.583 Kgf.

8.2. RECOMENDACIONES

Estos resultados se convierten en los diseños preliminares de las mezclas asfálticas modificadas con relaves de minería, por lo cual se percibe la necesidad de seguir adelantando los ensayos propicios que permitan verificar las posibilidades de que esta mezcla cumpla con los criterios para su aceptación final.

Para lo anterior se hace necesario primeramente realizar los ensayos de adherencia, módulo resiliente, deformación plástica y leyes de fatiga, con el fin de determinar valores mínimos y máximos dichos ensayos, para así poder elaborar una especificación particular para el uso de la mezcla asfáltica con relaves derivados de la industria minera. Igualmente es importante realizar un estudio financiero para determinar la relación costo/beneficio de utilizar relaves para el reemplazo de un porcentaje de la arena, con el fin de identificar su viabilidad económica con respecto a los actuales costos y duración de las mezclas convencionales MDC-19.

REFERENCIAS

- 360 en Concreto (2020). Caracterización de impactos ambientales en la industria de la construcción. Argos. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/impactos-ambientales-en-la-industria-de-la-construccion>
- Amézquita, J. D. & Gantiva, C. D. (2017). *Modificación de un concreto asfáltico MDC-19 mediante la sustitución del llenante mineral natural por calamina* [Tesis de grado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Banco de la República (2015). *Informe de Coyuntura Económica Regional*. Villavicencio: Banco de la República.
- Blanco, F. L. & Montañez, J. J. (2016). *Análisis del comportamiento físico en mezclas asfálticas MDC-19 modificado con sodio y glucosa* [Trabajo de grado]. Universidad Católica de Colombia.
- Casadiago, E., Gutiérrez, A. G., Herrera, M. A. & Villanueva, M. L. (2017). Manejo estratégico de la producción de residuos estériles de minería sustentable, utilizando prácticas mineras eco-eficientes en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 107-118.
- Clavijo, C. M. & Aranda, C. A. (2014). Análisis del comportamiento físico - mecánico de una mezcla densa en caliente tipo MDC-2 modificada con caucho y cuero en porcentajes (25%, 75%) [Congreso]. *V Congreso Internacional de Ingeniería Civil USTA*, Tunja, Colombia.
- Cerón, A. M. & Gutiérrez, C. (2019). *Elaboración de unidades de mampostería perforada de concreto utilizando relaves provenientes de la minería de agregados* [Tesis de grado]. Universidad Santo Tomás.
- Departamento Nacional de Estadística "DANE" (2016). *Informe de Coyuntura Económica Regional. Departamento del Meta*. Bogotá: DANE.
- Fedesarrollo (2018). *Estudio sobre el impacto de la actividad petrolera en las regiones productoras de Colombia. Caracterización departamental Meta*. Bogotá: Fedesarrollo.
- Flores, S. J. & Monzón, Y. A. (2020). *Evaluación de estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente utilizando aditivo SBS* [Tesis de grado]. Universidad César Vallejo.
- Generalitat de Catalunya (2015, 20 de julio). Aprovechamiento de lodos generados por el proceso de lavado de áridos. *Departamento de Territorios y Sostenibilidad*. http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/empresa_i_produccio_sostenible/restauracio_dactivitats_extractives/productes-emprats-a-la-restauracio-ambiental/Aprofitament-de-llots-generats-pel-proces-de-rentatge-darids/
- González, T. A. & Beleño, M. F. (2015). *Reología de asfaltos 60/70 modificados con residuo de cerámica* [Tesis de grado]. Universidad Piloto de Colombia.
- Gómez, C. A. (2018). *Estudio de una mezcla asfáltica MDC-19 modificada con adición de Polipropileno de Baja Densidad (PBD) por vía seca* [Tesis de grado]. Universidad Católica de Colombia.
- Granados, J. L. (2017). *Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso por vía seca respecto a la mezcla asfáltica convencional* [Tesis de maestría]. , Universidad Ricardo Palma.
- Instituto Nacional de Vías "INVIAS" (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras*. Bogotá: INVIAS.

- Lèbre, E., Corder, G. & Golev, A. (2017). Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*, (107), 34-42.
- Martínez, W., Tórres, A. A., Alonso, E. M., Chávez, H. L., Hernández, H., Lara, C., Martínez, W. Pérez, J. T., Bedolla, J. A. & González, F. M. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *Revista ALCONPAT*, 5(3), 235-248.
- Torres, E. G. & Noreña, A. J. (2012). *Mezclas tibias: una nueva tecnología para el mejoramiento de las mezclas asfálticas convencionales* [Tesis de grado]. Pontificia Universidad Javeriana.
- Rincón, J. M. & Sanabria, Y. L. (2017). *Modificación del concreto asfáltico (MDC-19) con la sustitución del llenante mineral por calamina y la incorporación del aditivo "Husil"* [Tesis de grado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Suarez, J. A. & Santos, M. A. (2009). *Mezclas asfálticas producto de la combinación de técnicas en mezclas de alto modulo y mezclas tibias* [Trabajo de grado]. Universidad Industrial de Santander.