

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

**Análisis Comparativo de los Parámetros para la Estabilidad y el Flujo de una
Mezcla Asfáltica MDC-25 con una Mezcla Asfáltica MDC-25 Modificada con Grano de
Caucho Reciclado.**

Yeison Javier Herrera Moreno

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director

Mónica Johanna Castro

Ingeniero Civil

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2021

Dedicatoria

Dedico la culminación de este trabajo primeramente a Dios quien es el responsable de que todas mis acciones tengan sentido, a mis padres por su constante apoyo incondicional, a mí por demostrarme que soy capaz y puedo lograr lo que me proponga y a todos mis familiares que de una u otra manera se vincularon para brindar un poco de su apoyo en este proceso.

Yeison Javier Herrera Moreno

Agradecimientos

Quiero agradecer a la ingeniera Mónica Johanna Castro por darme la oportunidad, brindarme su conocimiento y guiándome en este proyecto, por su paciencia y apoyo constante en este proceso que realice, por el acompañamiento que me brindo a lo largo de todo el proyecto.

Agradecer a la Universidad Santo Tomas por la formación como profesionales, y como personas, por fomentar los valores de responsabilidad y la dedicación, al laboratorio NHSQ INGENIERIA S.A.S por su apoyo y colaboración, a la empresa MURCIA MURCIA S.A.S. por el acceso a sus materiales y a todos los profesores que aportaron su granito de arena en mi formación académica, gracias por brindarme su conocimiento, por la paciencia y amor con la que nos enseñaron, gracias a ellos estoy alcanzando una de mis grandes metas.

Resumen

Este proyecto se enfoca en la comparación de la estabilidad y el flujo de una mezcla asfáltica MDC-25 y una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con agregado de grano de caucho reciclado, ofreciendo una alternativa de solución a los problemas medio ambientales, de salud y aquellos que afectan al asfalto. En los principales problemas medio ambientales y de salud que causan las llantas desechadas están: la quema al aire libre y daño en la capa de ozono, estas pueden ser ideales para la reproducción de mosquitos que causa el dengue. Por otra parte, los problemas que afectan al asfalto son: deformación permanente y fisuramiento.

Para la elaboración de la mezcla asfáltica MDC-25 se propuso un 5,5% de asfalto óptimo para realizar las diferentes briquetas que serán ensayadas por el método Marshall para obtener los resultados de la estabilidad y el flujo de cada muestra.

Con base en los resultados obtenidos se puede mencionar que se obtuvo la combinación de porcentaje de grano de caucho reciclado que cumplió con todos los criterios de diseño establecidos en la norma INVIAS, lo cual indica una alta resistencia a la deformación. Se pudo realizar un análisis de presupuesto en la mezcla asfáltica MDC-25 modificada teniendo un ahorro económico cerca del 30% respecto a la mezcla asfáltica MDC-25 sin modificar.

Palabras Clave: Asfalto modificado, grano de caucho reciclado (GCR), estabilidad, flujo, mezcla asfáltica en caliente, agregados pétreos, densidad Bulk.

Abstract

This project focuses on the comparison of the stability and flow of an MDC-25 asphalt mix and a modified MDC-25 asphalt mix with added recycled rubber grain, offering an alternative solution to environmental, health and environmental problems. Those that affect the asphalt. In the main environmental and health problems that waste tires cause are: burning in the open air and damage to the ozone layer, these can be ideal for the reproduction of mosquitoes that cause dengue. On the other hand, the problems that affect asphalt are: permanent deformation, cracking.

For the elaboration of the MDC-25 asphalt mixture, 5.5% optimal asphalt was proposed to make the different briquettes that will be tested by the Marshall method to obtain the stability and flow results of each sample.

Based on the results obtained, it can be mentioned that the combination of percentage of recycled rubber grain was obtained that met all the design criteria established in the INVIAS standard, which indicates a high resistance to deformation. A budget analysis could be performed on the modified MDC-25 asphalt mix, with an economic savings of about 30% compared to the unmodified MDC-25 asphalt mix.

Keys Words: Modified Asphalt, Recycled Rubber Grain (GCR), Stability, Flow, Hot Mix Asphalt, Stone Aggregates, Bulk Density.

Tabla de Contenido

Glosario.....	14
Introducción	16
1. Problemática	18
2. Objetivos.....	21
2.1. Objetivo General	21
2.2. Objetivos Específicos	21
3. Justificación	21
4. Estado del Arte	23
5. Marco Referencial	25
5.1. Marco Contextual.....	25
5.2. 5.2. Marco Conceptual	26
5.2.1. Asfalto.	26
5.2.2. Mezcla asfáltica en caliente.	26
5.2.3. Pavimento flexible.....	26
5.2.4. GCR (grano de caucho reciclado).	27
5.2.5. Agregados pétreos.	28
5.2.6. Gravedad específica Bulk.....	29
5.2.7. Fatiga.	29
5.2.8. Estabilidad.	29
5.2.9. Flujo.....	29
6. Marco de Teórico.....	30
6.1. Generalidades	30
6.2. Agregados pétreos.....	31
6.2.1. Clasificación de los agregados.	31
6.2.1.1. El agregado fino	31
6.2.1.2. El agregado grueso.....	31
6.2.1.3. El hormigón.....	32
6.2.2. Tipos de agregados pétreos.....	32

6.2.2.1. Agregados naturales.	32
6.2.2.2. Agregados de trituración.	32
6.2.2.3. Agregados artificiales.....	32
6.3. Asfalto	32
6.3.1. Propiedades Físicas.....	32
6.3.2. Composición química	33
6.3.3. Clasificación de asfaltos	35
6.3.4. Clasificación del asfalto para pavimentación	36
6.3.4.3. Emulsiones asfálticas.	36
6.3.5. Métodos de utilización.....	36
6.3.5.1.1. <i>Tecnologías.</i>	39
6.3.5.1.2. <i>Plusride.</i>	39
6.3.5.1.3. <i>Convencional</i>	39
6.3.5.1.4. <i>Aplicación</i>	40
6.4. Composición de caucho de llanta.....	42
6.4.1. Niveles de molienda del neumático para transformarlo en grano de caucho.	43
6.5. Grano de caucho reciclado (GCR).	43
6.5.1. Procesos de Obtención del Grano de Caucho Reciclado.....	45
6.5.2. Composición química de las llantas	45
6.5.3. Asfaltos modificados con GCR.....	46
6.5.4. Propiedades alcanzadas con los asfaltos modificados.	48
7. Metodología.....	49
7.1. Normativa.....	49
7.2. Tipo de investigación.	53
7.3. Instrumentos metodológicos de la investigación	54
7.3.1. Dispositivo para moldear probetas.	54
7.3.2. Extractor de Probeta.	55
7.3.3. Martillo de Compactación.	55
7.3.4. Pedestal de Compactación.	56
7.3.5. Sujetador para el molde.	56
7.3.6. Mordazas y medidor de deformación.	56
7.3.7. Prensa.....	57

7.3.8. Medidor de la estabilidad.	57
7.3.9. Elementos de calefacción.	57
7.3.10. Mezcladora.	57
7.3.11. Tanque para agua.	58
7.3.12. Tamices.	58
7.3.13. Termómetros blindados.	58
7.3.14. Balanzas.	58
7.3.15. Guantes.	58
7.3.16. Bandejas metálicas.	59
7.4. Fases de investigación y/o procedimiento.	59
7.4.1. Consultas bibliográficas.	59
7.4.2. Materiales utilizados.	59
7.4.2.1. Agregado pétreo.	59
7.4.2.2. Cemento asfáltico.	60
7.4.2.3. GCR.	60
7.5. Procedimiento ensayos de laboratorio.	61
7.6. Cálculos, Análisis y Resultados.	74
7.6.1. Cálculos de datos	74
7.6.2. Análisis de Resultado.	80
8. Análisis de graficas.	82
9. Análisis Comparativo de presupuesto	90
10. Ventajas y Desventajas MDC-25 con Agregado de GCR	92
11. Conclusiones	94
12. Recomendaciones	96
13. Referencia Bibliográfica	97
Apéndice	100

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación Geográfica de la Ciudad de Villavicencio	25
Figura 2. Grano de Caucho Reciclado	27
Figura 3. Agregado pétreo	28
Figura 4. Proceso de modificación por vía seca.	38
Figura 5. Proceso de modificación por vía húmeda.....	41
Figura 6. Composición del Caucho.....	42
Figura 7. Nivel de molienda del neumático.	43
Figura 8. Resistencia a la deformación plástica.....	47
Figura 9. Curva de fatiga.	47
Figura 10. Etapas Metodológicas del proyecto.....	51
Figura 11. Dispositivo para moldear probetas	54
Figura 12. Martillo de Compactación del equipo Marshall	55
Figura 13. Asfalto adquirido de MURCIA MURCIA S.A. Construcción de obras civiles, agregados pétreos, mezclas asfálticas.	60
Figura 14. Cuarteo grava $\frac{3}{4}$ "	61
Figura 15. Cuarteo arena lavada	62
Figura 16. Peso muestras para análisis granulométrico y determinación de humedad.....	62
Figura 17. Lavado de materiales.....	63
Figura 18. Lavado de materiales pasando por tamiz N°200	63
Figura 19. Secado en estufa del material para análisis granulométrico.	64
Figura 20. Granulometría por tamizado.....	64
Figura 21. Peso muestras para análisis granulométrico y determinación de humedad.....	65
Figura 22. Secado en estufa del material para determinación de humedad.	65
Figura 23. Peso de Grava 1 $\frac{1}{2}$ ", Grava $\frac{3}{4}$ " y Grava $\frac{1}{2}$ "	66
Figura 24. Peso de Arena Lavada $\frac{3}{4}$ " y Filler.....	67
Figura 26. Adicion del cemento asfaltico a la mezcla.	68
Figura 27. Adicion del cemento asfaltico modificado con el agregado de grano de caucho a la mezcla.	68

Figura 28. Mezcla asfáltica lista para elaboración de briquetas	69
Figura 29. Peso muestra 1200 gr briqueta, limpieza con ACPM de moldes y martillo del aparato Marshall.	69
Figura 30. Apisonamiento de material en el interior del molde 25 veces.	70
Figura 31. Compactación aplicando 75 golpes por ambas caras de la briqueta con el martillo de compactación del aparato de Marshall.....	70
Figura 32. Enfriamiento y numeración de briquetas.....	71
Figura 33. Extracción de briquetas.	71
Figura 34. Peso al aire, medición de altura y espesor de briquetas.	72
Figura 35. Obtención peso en inmersión de briquetas por medio de péndulo casero.....	73
Figura 36. Inmersión de briquetas a baño María.	73
Figura 37. Determinación de estabilidad y flujo de las briquetas por medio de la máquina de Marshall.	74

Lista de Tablas

Tabla 1. Características del Granulo de Caucho.....	44
Tabla 2. Proceso Industrial Molienda de Llantas.....	48
Tabla 3. Dosificación y cantidades del material	66
Tabla 4. Obtención densidad Bulk y porcentaje de agua absorbido	75
Tabla 5. Volumen del agregado pétreo	76
Tabla 6. Obtención de vacío del agregado pétreo	77
Tabla 7. Obtención de estabilidad (N)	78
Tabla 8. Obtención flujo (mm)	79
Tabla 9. Obtención de Rigidez máxima.....	80
Tabla 10. Criterios para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.	81
Tabla 11. Resultado de laboratorio	82
Tabla 12. Comparación de presupuestos para la pavimentación de 1 km con MDC-25 y MDC-25 modificada con GCR.....	91
Tabla 13. Ventajas y Desventajas mezcla asfáltica MDC-25 modificada con GCR.	92

Lista de Graficas

Grafica 1. Estabilidad vs Combinación % GCR.....	82
Grafica 2. Flujo vs % GCR.....	84
Grafica 3. Densidad de Bulk vs % GCR.....	85
Grafica 4. % Vacíos mezcla total vs Combinación % GCR.....	86
Grafica 5. % Vacíos llenos de asfalto vs Combinación % GCR	87
Grafica 6. % Vacíos agregado mineral vs Combinación % GCR	88
Grafica 7. Rigidez Marshall vs Combinación % GCR	89

Glosario

Asfaltos: es un material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, autovías o autopistas.

Agregados Pétreos: se refiere a partículas minerales granulares que se usan ampliamente para bases, sub base y relleno de carreteras. Los agregados también se usan en combinación con un material cementante por formar concretos para base, sub base, superficies de desgaste y estructuras de drenaje.

Fatiga: Falla de un material por repetición de carga.

GCR: Grano de caucho reciclado de llanta.

Mezcla Asfáltica: en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se utiliza para construir firmes.

Tamizado: es un método físico para separar mezclas. Consiste en hacer pasar una mezcla de partículas de diferentes tamaños por un tamiz, cedazo o cualquier cosa con la que se pueda colar. Las partículas de menos tamaño pasan por los poros del tamiz o colador atravesándolo y las grandes quedan retenidas por el mismo.

Estabilidad: la estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas.

Flujo: deformación del espécimen al punto de máxima carga.

Granulometría: la granulometría de una base de agregados se define como la distribución del tamaño de sus partículas, se determina haciendo pasar una muestra respectiva de agregados por una serie de tamices ordenados por abertura, de mayor a menos.

Introducción

El desarrollo de las estructuras viales son una prioridad fundamental para la sociedad y para la economía, las empresas y el comercio que en los últimos años atraen a muchas personas que se desplazan a diario por las principales vías del país, generando un crecimiento constante, ya que son el medio principal de comunicación de bienes y servicios, el mal estado o en su efecto que existan pocas vías genera una problemática para la comunidad y su desarrollo.

En la actualidad las mezclas asfálticas en caliente son una de las más empleadas en las construcciones de las vías municipales en el departamento del Meta, por su característica de flexibilidad, duración, uniformidad, resistencia a la fatiga entre otras características, por ello se realiza una comparación de la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica MDC-25 y una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con agregado de grano de caucho reciclado, la implementación de este material en la mezcla asfáltica tiene como finalidad mitigar factores ambientales como el cambio climático y la contaminación ocasionada por las llantas desechadas al finalizar su vida útil, actualmente es común escuchar el interés de la implementación de los materiales no convencionales en el área de las construcciones viales y otras áreas.

La adición de grano de caucho para la modificación de las mezclas asfálticas, se traduce en una gran cantidad de beneficios, debido a las investigaciones que se han avanzado en los últimos años, han demostrado que este tipo de modificaciones son más durables con respecto a las convencionales, económicas a largo plazo pues se disminuyen los mantenimientos y aumenta su durabilidad, además contribuyen a la reducción de impactos negativos para el medio ambiente como lo son, la quema indiscriminada de las llantas desechadas dando paso a las emisiones de CO₂, uno de los gases tóxicos más contaminantes del mundo causantes del calentamiento global, entre otros.

La malla vial del municipio de Villavicencio, está conformada por los tramos viales cuya principal función es permitir la accesibilidad a las unidades de vivienda y zonas industriales la cual se encuentra en permanente proceso de desgaste ya que está sometida a la acción de agentes climáticos y al tránsito constante de vehículos, lo que con lleva al deterioro de las vías y el espacio público, desmejorando la calidad de vida, reduciendo la productividad e incrementando el tiempo de desplazamiento de los habitantes del municipio.

El caucho granulado reciclado de neumáticos se obtiene a través de la trituración de éstos y la separación de los componentes que lo constituyen, principalmente el acero y las fibras. A través de dicho proceso, se obtiene migas de caucho con determinadas granulometrías para distintas aplicaciones.

La presente investigación está orientada en evaluar y analizar un comparativo de costos de la utilización del material de grano de caucho reciclado como agregado del asfalto, teniendo en cuenta los cambios que este le podría producir a sus propiedades y características consideradas en la mezcla como estabilidad y flujo mediante el método de Marshall, con los resultados obtenidos en el laboratorio NHSQ INGENIERIA S.A.S se verificaran que sean favorables y cumplan con los lineamientos técnicos de la norma INVIAS, a su vez se busca incentivar la conciencia del pensamiento verde y mitigar impactos ambientales que genera el mal manejo de las llantas deshechas.

1. Problemática

La problemática se abordará en dos factores muy importantes:

A. La contaminación de residuos sólidos.

- ¿Se logrará disminuir la contaminación del medio ambiente, utilizando el grano de caucho reciclado de las llantas en la elaboración de mezclas asfálticas?

En el mundo las llantas son parte principal de la economía, debido a que se encuentran en el medio de transporte diario del ser humano, carros, motos, buses, entre otros, permitiendo la movilización por las vías terrestres. Las llantas son uno de los elementos que más se desechan en el mundo y no son biodegradables (es decir que no pueden descomponerse). Las dificultades que se han presentado al gestionar el destino de las llantas han contribuido considerablemente en los problemas del medio ambiente en los últimos años.

Durante los últimos años, las llantas usadas se han convertido en tema de gran divulgación debido a los riesgos a la seguridad y salud pública durante su disposición y almacenamiento que no se ha efectuado de una forma segura y transparente especialmente en los últimos años en la ciudad de Bogotá, por ejemplo. Según el periódico El Tiempo “la situación es cada vez más crítica, pues en la capital cifras oficiales indican que tres de cada 10 llantas –750.000 de 2’500.000 que cumplen su vida útil por año– terminan en andenes, separadores, parques, humedales e incluso frente a las casas”. La acumulación de estos materiales, su inadecuado almacenamiento y equivocada disposición, han ocasionado problemas ambientales para los que desde hace varios años se ha buscado darles una completa solución, pero hasta el momento no se ha encontrado una alternativa óptima. [1]

En Colombia se presenta grandes problemas principalmente porque la mayoría de las llantas son dispuestas como basura en las calles, lo que representa impactos negativos y

contaminación, corriendo el riesgo de ser quemadas a cielo abierto, emisiones de CO₂, uno de los mayores contaminantes del mundo y uno de los gases prohibidos en el protocolo de Kioto. Este protocolo es un acuerdo internacional que tiene como objetivo principal eliminar o reducir las emisiones de 6 gases tóxicos que causan el calentamiento global, entre los cuales se encuentra el dióxido de carbono (CO₂).

Además, las acumulaciones de neumáticos forman arrecifes donde la proliferación de roedores, insectos y otros animales portadores de enfermedades constituye un problema para la salud. La reproducción de ciertos mosquitos, que transmiten por picadura fiebres y encefalitis, llega a ser 4.000 veces mayor en el agua estancada de un neumático que en la naturaleza. [2].

B. Mejorar la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas.

El tratamiento, reutilización y reciclaje de residuos sólidos se ha convertido en una oportunidad para lograr que diferentes materiales sean reincorporados a procesos productivos, alargando de esta manera la vida útil y disminuyendo los impactos ambientales negativos generados por los diferentes productos y materiales. [3].

En Colombia se han venido implementando cada vez más nuevas ideas que permitan el desarrollo y mejoramiento de los pavimentos, de modo que el país pueda contar con una infraestructura vial acorde a sus necesidades. Es por esto que surgen los estudios de investigaciones sobre modificación de asfaltos, como una forma de mejorar las propiedades del ligante y dar solución a ciertos inconvenientes que actualmente se presentan. La estabilidad es un problema que afecta a todos los asfaltos, debido a cambios subsecuentes en sus propiedades físicas y químicas lo cual tiene un efecto negativo en su comportamiento y durabilidad durante su vida útil. [4].

El deterioro exponencial de la malla vial del país, generado por las inclemencias del clima, el aumento de las cargas de tránsito, la falta de mantenimiento y otros factores que ayudan al daño y disminución de calidad de servicio de las vías.

Estos factores producen la necesidad de la evaluación de nuevas tecnologías en los pavimentos, los pavimentos flexibles siendo con mayor uso en las vías actualmente y en los que se incursiona con más fuerzas en el uso de modificadores que ayuden a mejorar las propiedades del ligante asfáltico y los materiales granulares que lo componen.

Se encuentran diversas investigaciones sobre la reutilización de llantas desechadas de una manera efectiva, muchas de estas, con aplicaciones en la ingeniería civil. Se empezó con una reutilización para las llantas desechadas, ya que estas alcanzan un tiempo de descomposición de hasta 100 años, por lo tanto, su vertimiento en rellenos sanitarios está causando contaminación y afectando al medio ambiente cada vez más, además representan el 7% del total de los residuos sólidos urbanos; un 3 a 4% corresponde a residuos de caucho reticulado (llanta), y un 0,1% corresponde a EPS (poli estireno expandido). [3] .

Las llantas son un material de gran potencial para el reciclaje y el aprovechamiento en varios campos, ya que, están compuestas por elementos como el caucho, el hierro y la fibra textil. La importancia de la innovación en nuevos métodos para el desarrollo de mezclas asfálticas modificadas, se espera obtener mejoras o adecuaciones en los proyectos viales; los beneficios que se pueden obtener a partir de la modificación de las mezclas asfálticas, son el mejoramiento y la elasticidad a bajas temperaturas, aumentar su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito, mejorar el comportamiento a la fatiga y aumentar la adhesividad del agregado ligante. [5].

2. Objetivos

2.1.Objetivo General

Establecer una comparación de los parámetros de estabilidad y flujo en una mezcla asfáltica MDC-25 con una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con el 15%, 20% y 25% de grano de caucho reciclado.

2.2.Objetivos Específicos

1°. Determinar los parámetros de estabilidad y flujo por medio de una mezcla asfáltica MDC -25 y una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con 15%, 20% y 25% de grano de caucho reciclado empleando la metodología de la norma INVIAS 2013, Materiales y mezclas asfálticas INV E-748.

2°. Analizar la comparación de presupuestos entre la mezcla asfáltica MDC-25 y la mezcla asfáltica MDC-25 modificada con grano de caucho reciclado.

3°. Identificar las ventajas y desventajas de la mezcla asfáltica MDC-25 modificada con grano de caucho reciclado para el mejoramiento de los pavimentos en comparación a la mezcla asfáltica MDC-25.

3. Justificación

Los asfaltos modificados son una gran solución en contra de la contaminación y el impacto sobre el medio ambiente, es fundamental mejorar las características físicas y mecánicas de los asfaltos colombianos, estableciendo otro parámetro y bajo desgaste a las inclemencias del clima y tráfico; garantizando una mejor malla vial, resistencia al envejecimiento y una mayor vida útil de esta, generando menores gastos en vías y obteniendo un cambio social y ambiental. [6].

Algunas razones para la implementación de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (GCR):

- Los neumáticos que han perdido su vida útil son un problema importante para el medio ambiente. Los neumáticos son posibles incubadoras de mosquitos durante la temporada de lluvias, al igual que cuando se tiran al aire libre. Son propensos al fuego. El método principal para deshacerse de estos objetos es quemarlos al aire libre para producir gas que afecta las emisiones de escape. sistema. Tracto respiratorio, piel, mucosas, sistema nervioso central y producción de gases que provocan degradación ambiental.
- El tráfico vehicular produce un fuerte sonido al tener contacto con el pavimento y esto causa una contaminación auditiva, los asfaltos modificados con GCR, están reduciendo el ruido producido por el tráfico vehicular en mezclas de pavimento asfáltico modificado con GCR. [7].
- Un cálculo aproximado de consumo de llanta para modificar un carril de un km de vía de 3.5 m de ancho y entre 3 y 33 cm de mezcla asfáltica modificada es de 2 y 27 toneladas respectivamente. De acuerdo con Botero et al. (2005), el consumo se estima en unos 1553 neumáticos por kilómetro-carril para una capa de 5.08 cm de espesor de mezcla modificada con asfalto-caucho. Según Rubber & Plastic News (1998b) reportan un promedio de utilización de llantas de 13.6 toneladas para un km de vía pavimentada con mezcla modificada con GCR.

4. Estado del Arte

Los nano-materiales tienen un gran potencial como modificadores para mejorar el rendimiento del ligante de asfalto base. Sin embargo, los estudios existentes en la literatura se centran en la mejora del rendimiento a altas temperaturas. Del ligante de asfalto base, mientras que se pasa por alto el rendimiento a baja temperatura del ligante de asfalto base. Los estudios han demostrado que los nano-materiales incluso debilitarán el rendimiento a baja temperatura de la base aglutinante de asfalto. Para abordar este problema, se estudian nano-materiales y polímeros como modificadores de compuestos para mejorar el rendimiento del asfalto base tanto a alta como a baja temperatura. Se cribaron y seleccionaron nano-materiales y polímeros de acuerdo con el indicador de rendimiento convencional del aglutinante de asfalto, incluido el punto de ablandamiento, la ductilidad a 5 C y la viscosidad a 60 C. [8].

El rendimiento de asfalto de mezcla en caliente (HMA) fabricado con hormigón reciclado de doble capa agregados (DCRCA). Tiene como objetivo evaluar las propiedades de rendimiento de HMA fabricado con DCRCA como formación de surcos, fatiga y módulo dinámico. Los agregados de hormigón reciclado (RCA) se recubrieron con pasta de escoria de cemento (CSP) y Sika Tite-BE para mejorar su resistencia y durabilidad. Se produjeron mezclas tener 0%, 20%, 40% y 60% de DCRCA. Los resultados indicaron que la adición de DCRCA a HMA puede. Disminuir la resistencia a la deformación permanente del HMA, pero las mezclas de asfalto y DCRCA aún se mantienen. Rendimiento aceptable contra la formación de surcos. Los resultados de la prueba del número de flujo (FN), sin embargo, mostraron que las mezclas con 40% y 60% de DCRCA lograron una mayor resistencia contra la formación de surcos en comparación con el control mezcla. [9].

Los aglutinantes de asfalto modificado con polímeros se han utilizado durante años para producir mezclas de asfalto con una resistencia mejorada a la formación de surcos, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico. Se requieren equipos y técnicas especiales, que pueden no estar siempre disponibles, para producir aglutinantes modificados con polímeros con las propiedades de ingeniería deseadas. Recientemente, se introdujo un nuevo enfoque para facilitar el uso de polímeros en mezclas asfálticas. El aditivo de mezcla de pellets polimerizados, que contiene una gran cantidad de estireno butadieno estireno y aglutinante asfáltico, se puede incorporar directamente a la mezcla durante la producción en la planta de asfalto sin necesidad de ningún equipo especial. [10].

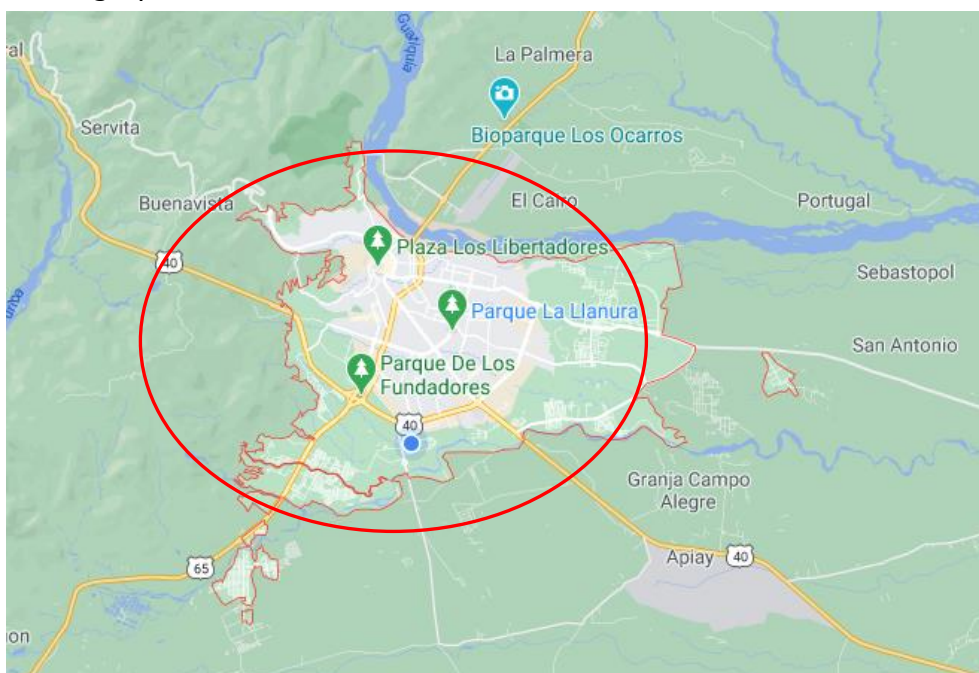
El uso de un polímero que reacciona con el agua como sustituto del aglutinante de asfalto en la construcción de superficies de desgaste de pavimentos para mitigar los impactos ambientales (por ejemplo, emisiones de carbono y efectos de isla de calor urbano). Una de las ventajas de un pavimento a base de polímeros es la reducción de la absorción de calor que podría reducir eficazmente las temperaturas del pavimento, así como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (como CO₂) durante y después de la construcción. El color natural del polímero es marrón claro, que tiene un albedo más alto que el hormigón asfáltico y, como resultado, refleja más la radiación solar que cae sobre el pavimento. [11].

5. Marco Referencial

5.1.Marco Contextual

La ejecución de esta investigación se realizó en el laboratorio NHSQ INGENIERIA S.A.S situado en la ciudad de Villavicencio, Meta, esta se encuentra situado el noroccidente del departamento del Meta, en el pie del monte de la cordillera oriental en la margen izquierda del río Guatiquia, localizado a los $04^{\circ} 07' 00.30''$ de la latitud norte y $73^{\circ} 36' 29.07''$ de la longitud oeste y una altura de 391 m sobre el nivel del mar, limita al norte con El Calvario y Restrepo, al sur con San Carlos de Guaroa y Acacías, al oriente con Puerto López y al Occidente con Acacías y el departamento de Cundinamarca, presenta un clima cálido con una temperatura media de 27°C .

Figura 1. *Ubicación Geográfica de la Ciudad de Villavicencio*



Fuente: Google Earth

Este laboratorio cuenta con equipos adecuados para la realización de la investigación además de personal capacitado y eficiente, que será indispensable para la correcta y optima ejecución de las pruebas y ensayos que se requieren.

5.2.5.2. Marco Conceptual

A continuación, se definirán las palabras clave más importantes del proyecto.

5.2.1. *Asfalto.*

Se define como un material cementante, de color oscuro y de consistencia variable, los materiales aglomerantes solidos o semisólidos de color que varía de negro a pardo oscuro cuya rigidez depende de la temperatura en que se encuentre, los constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza en forma sólida o semisólida o se obtienen de la destilación del petróleo; o combinación de estos entre sí o con el petróleo o productos de estas combinaciones. [12]

5.2.2. *Mezcla asfáltica en caliente.*

Consiste en la combinación de áridos con ligantes determinando las propiedades físicas de la mezcla, el proceso consiste en calentar agregados pétreos y el ligante a temperaturas mayores de 130°C, con proporciones de asfalto y demás materiales para luego ser colocado en sitio.

5.2.3. *Pavimento flexible.*

Son estructuras viales conformadas por una capa asfáltica apoyada sobre capas de menor rigidez, compuesta por materiales granulares no tratados o ligantes (base, sub base, afirmado y en algunos casos sub rasante mejorada o material de conformación), que a su vez se soportan sobre el terreno natural o sub rasante. Los esfuerzos que generan las cargas vehiculares se disipan a través de cada una de las capas de la estructura de tal forma que, al llegar a la sub

rasante, la resistencia mecánica del suelo que la compone debe ser capaz de resistir dicho esfuerzo sin generar deformaciones que permitan el deterioro funcional o estructural de la vía. Adicionalmente, cada una de las capas de la estructura debe resistir la influencia del medio ambiente. [13]

5.2.4. GCR (*grano de caucho reciclado*).

Es el material obtenido a partir de la trituración del caucho obtenido de las llantas usadas desechas de vehículos de transporte se le conoce como grano de caucho reciclado GCR está compuesto por caucho vulcanizado proveniente de la trituración mecánica y separación de materiales de las llantas usadas, no es tóxico. El GCR es un material obtenido de las llantas en desuso de los vehículos automotores, que por lo general tiene un destino no muy controlado ambientalmente, rellenos sanitarios, plantas térmicas, basureros a cielo abierto, entre otros, que generan un daño ambiental importante. [14]

Figura 2. *Grano de Caucho Reciclado*



Fuente: <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016>

5.2.5. Agregados pétreos.

La denominación técnica “agregados pétreos” en pavimentos se refiere a un conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas, finos y/o filler (naturales o triturados), utilizados ya sea para la fabricación de mezclas asfálticas, concreto hidráulicos y materiales estabilizados o para la construcción de capas de terraplén, afirmado, sub base y/o base granular. [13]

Figura 3. Agregado pétreo



Fuente: <http://www.materialesdeconstruccion.com.mx/productos-agregados.php>

5.2.6. Gravedad específica Bulk.

Es una mezcla compactada en la relación entre la masa (o peso en el aire) de un volumen de mezcla (teniendo en cuenta los vacíos que queden entre las partículas recubiertas con asfalto) y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.

5.2.7. Fatiga.

El fenómeno de fatiga es uno de los principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas y ocurre en las capas ligantes del pavimento, para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica producto de las cargas impuestas por el parque automotor (cargas repetidas). El paso continuo de vehículos hace que la capa asfáltica flexione, generando esfuerzos de tensión en su extremo inferior. Este fenómeno se produce, por lo general, al final de la vida de un pavimento. [13]

5.2.8. Estabilidad.

Es la capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamiento, ondulaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.

5.2.9. Flujo.

Es medido en milímetros, lo cual representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta. Para la medición de la estabilidad como el flujo se requiere de la prueba por el método Marshall, esta nos ayudara a medir la resistencia a la deformación de la mezcla.

6. Marco de Teórico

6.1. Generalidades

En las investigaciones que se han realizado en las mezclas asfálticas modificadas con GCR, se determina que existen diferentes factores que se ven alterados en comportamiento mecánico de las mezclas. Algunos factores que se presentan son la temperatura de reacción del asfalto y el GCR, el tamaño y granulometría de los agregados, la adicción de aditivos y utilización de diferentes técnicas para el reciclaje de pavimentos. [15]

De acuerdo con la revisión de los estudios en el estado del arte, se demuestra que la incorporación de GCR en las mezclas asfálticas convencionales, ya sea por vía seca o por la vía húmeda aumenta ampliamente los comportamientos mecánicos de los pavimentos flexibles. [15]

Una mezcla asfáltica modificada con GCR compactada con la prueba de tracción indirecta (RTI) señala que la mezcla asfáltica para el valor óptimo de asfalto calculado presenta baja susceptibilidad a los daños producidos por el agua, debido a que presenta un valor de RTI del 90%, cumpliendo con las especificaciones IDU-560-11, el cual el porcentaje mínimo esperado es del 75% según el numeral 560.4.3. 3.6. [16]

El grado de desempeño buscado en la estimación por la tecnología SHRP del Asfalto modificado con GCR, identifica un rango de temperatura de trabajo holgado del asfalto con un PG 94-34, por ende, una buena resistencia al ahuellamiento, a la fatiga producida por las cargas del tránsito y fisuración inducida por bajas temperaturas, esto es congruente con los resultados obtenidos en la caracterización mecánica. [16]

Los valores de una mezcla asfáltica con GCR aumentan en comparación con una mezcla asfáltica convencional, aumentan en un 26% cuando se utiliza 1% de GCR, y 42% cuando se utiliza el 2% por vía seca, la molienda de llantas que se obtienen de llantas usadas fuera de uso se ha demostrado que mejora las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas adicionándolo por la vía seca o modificando el ligante por el proceso de la vía húmeda. De igual manera el uso de GCR mitiga la contaminación ambiental al utilizar el GCR proveniente de las llantas usadas, dándoles un aprovechamiento final amigable con el ambiente. [17]

6.2. Agregados pétreos.

6.2.1. Clasificación de los agregados.

Los agregados pueden ser naturales o artificiales, siendo los naturales de uso frecuente, además los agregados utilizados en el concreto se pueden clasificar en: agregado grueso, fino y hormigón.

6.2.1.1. El agregado fino.

Se define como aquel que pasa el tamiz 3/8" y queda retenido en la malla N° 200, el más usual es la arena producto resultante de la desintegración de las rocas.

6.2.1.2. El agregado grueso.

Es aquel que queda retenido en el tamiz N° 4 y proviene de la desintegración de las rocas; puede a su vez clasificarse en piedra chancada y grava.

6.2.1.3. El hormigón.

Es el material conformado por una mezcla de arena y grava este material mezclado en proporciones arbitrarias se encuentra en forma natural en la corteza terrestre y se emplea tal cual se extra en la cantera.

6.2.2. Tipos de agregados pétreos.

El tipo de agregados pétreos se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

6.2.2.1. Agregados naturales.

Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a la exigencia según su disposición final.

6.2.2.2. Agregados de trituración.

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

6.2.2.3. Agregados artificiales.

Son los sub productos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

6.3. Asfalto

6.3.1. Propiedades Físicas.

El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero; capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor

o cargas permanentes. El asfalto contiene componentes del petróleo, es líquido, viscoso, color negro o gris oscuro. Los compuestos básicos son los hidrocarburos y derivados. Además, es un material súper impermeable, adherente e ideal para construir pavimentos. Su consistencia depende de la temperatura. Respecto a la durabilidad, sus propiedades se mantienen igual a pesar del tiempo y de los efectos de elementos envejecedores.

6.3.2. Composición química

Es de mucha utilidad un amplio conocimiento de la constitución y composición química de los asfaltos, para el control de sus propiedades físicas y así obtener un mejor funcionamiento en la pavimentación. Al igual que el petróleo crudo, el asfalto, es una mezcla de numerosos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos.

La mayoría de los hidrocarburos livianos se eliminan durante el proceso de refinación, quedando los más pesados y de moléculas complejas. Al eliminar los hidrocarburos más ligeros de un crudo, los más pesados no pueden mantenerse en disolución y se van uniéndose por absorción a las partículas coloidales ya existentes, aumentando su volumen dependiendo de la destilación que se les dé. Las moléculas más livianas constituyen el medio dispersante o fase continua. [18]

Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de hidrocarburos pesados (asfáltenos) se encuentran dispersas en un medio aceitoso más ligero (máltenos) compuesto por hidrocarburos saturados, resinas y aromáticos, sin que exista una separación entre estas dos fases sino una transición.

6.3.2.1. Asfáltenos. Son moléculas asociadas, altamente polares, solubles en benceno, CCL₄ y CS₂, e insolubles en n-alcanos de bajo peso molecular, tales como hexano y heptano. Los asfáltenos son sólidos amorfos negros o marrones que contienen carbono, hidrogeno, azufre, nitrógeno, oxígeno y metales pesados con vanadio, níquel e hierro. Los átomos de azufre y oxígeno actúan como enlace entre los grupos anillados.

6.3.2.2. Saturados. Son líquidos incoloros compuestos de cadena lineales, ramificadas con trazas de ciclo parafinas. Los hidrocarburos saturados actúan como antioxidantes e impermeabilizantes, tienen menor poder de adherencia y causan deformidad al asfalto en pavimentos. Estructuralmente los saturados son muy similares a los aceites lubricantes y su peso molecular semejante al de los aromáticos.

6.3.2.3. Resinas. Son compuestos solubles en n-alcanos de bajo peso molecular y son retenidos por adsorbentes tales como la alúmina activada o tierras de fuller. Además, son líquidos viscosos de color oscuro, son muy adhesivas y son los agentes fertilizantes para los asfáltenos. Las resinas presentan estructuras aromáticas o naftenicas con grupos polares, así como hidrocarburos infatuados y heterocíclicos; algunas moléculas contienen múltiples átomos de azufre, nitrógeno y oxígeno, también contienen grupos hidroxilos.

6.3.2.4. Aromáticos. Son líquidos de color amarillo o rojo a temperaturas ambiente, los cuales poseen estructuras que contienen anillos aromáticos mono, di y polinucleares con conjuntos condensados de anillos nafténicos y cadenas parafinas asociadas.

6.3.3. Clasificación de asfaltos

Los asfaltos se pueden clasificar según su uso o aplicación en:

- Pavimentación: Mezclas cerradas (Stone Mastic Asphalt), Mezclas abiertas (Gap Graded), Drenantes, Base asfáltica.
- Riegos: Matapolvos, imprimaciones, Riesgos de liga.
- Tratamientos y lechadas: sellos de arena, tratamientos superficiales, Slurry Seal, Cape Seal.
- Otras aplicaciones: Micro aglomerados, asfalto espumado.

De la anterior clasificación cabe destacar que el más importante uso es sin duda, la utilización del asfalto como ligante en la pavimentación, ya que ningún otro material garantiza en mayor grado la satisfacción simultánea y económica de dos importantes funciones:

- Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.
- Proporcionar una íntima unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir su espesor.

Finalmente, el asfalto le confiere al pavimento una estructura con característica flexible, que permite cierto grado de acomodo sin fisurarse, a eventuales movimientos de las capas subyacentes.

6.3.4. Clasificación del asfalto para pavimentación

Este tipo de asfalto se puede dividir de la siguiente manera.

6.3.4.1. Cemento asfáltico. Es el más ampliamente conocido y utilizado; presenta la típica apariencia de material visco-elástico rígido a bajas temperaturas y fluido a altas, por su denominación en inglés se conoce como A.C. (Asphalt Cement) y se obtiene a partir de la refinación del crudo, en la corriente de fondos de las etapas de destilación.

6.3.4.2. Asfaltos líquidos. También denominados asfaltos rebajados o “Cut Backs” están compuestos de una base asfáltica (cimento asfáltico) y un fluidificante volátil, donde el solvente es agregado con el fin de disminuir la viscosidad del asfalto para poderlo mezclar y trabajar con los agregados.

6.3.4.3. Emulsiones asfálticas. Son un sistema heterogéneo de dos fases inmiscibles, como son el asfalto y el agua, a la que se le incorpora un activador de superficie, tenso activo o emulsificante de base jabonosa, el cual mantiene en dispersión el sistema de fase continua (agua) y discontinuidad (diminutos glóbulos de asfalto). Las emulsiones asfálticas deben ser afines a la polaridad negativa o positiva, tomando el nombre de emulsiones aniónicas o catiónicas respectivamente.

6.3.5. Métodos de utilización

El caucho de llantas usadas puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados proceso húmedo y proceso seco. En el proceso húmedo, el caucho actúa modificando el ligante, mientras que en el proceso seco el caucho es usado como una

porción de agregado fino. Una de las principales características que presenta el cemento asfáltico modificado con GCR es el aumento en la viscosidad de la mezcla resultante, haciéndola más flexible a bajas temperaturas y menos plástica a altas. Entre los principales beneficios en los pavimentos están las mejoras a la deformación permanente, a la fatiga, y la resistencia a la fisuramiento a bajas temperaturas. (Armando Villamizar, 2014).

6.3.5.1. Proceso por vía seca

El proceso seco es cualquier método donde el CRL (caucho reciclado de llanta) es adicionado directamente a la mezcla asfáltica caliente, siendo usualmente mezclado con los agregados antes de adicionar el cemento asfáltico. Este proceso se lleva a cabo cuando se quiere usar el CRL como un agregado en la mezcla asfáltica, por lo general, como un sustituto de una pequeña parte del agregado fino, el cual puede estar entre 1 y 3 % del peso total de los agregados en la mezcla. A diferencia del proceso húmedo, este proceso no requiere un equipo especial, solo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad de CRL y que sea suministrada en el momento indicado para que se mezcle con el agregado cuando estos alcancen cierta temperatura y antes de que el ligante sea adicionado. [19]

Figura 4. *Proceso de modificación por vía seca.*

Fuente: Fernández, Ricardo. Pavimentos Sustentables. 2016

En este proceso de aplicación como se observa en la figura 4 se encuentra el GCR sustituyendo una parte muy pequeña de los agregados (entre el uno (1) y el tres (3) por ciento del peso total de los agregados). Esta aplicación ocurre en el momento antes de agregar el cemento asfáltico en la mezcla, justo cuando los agregados alcanzan una temperatura específica. En este proceso de aplicación no se necesita ningún equipo especial para poder realizar la mezcla ya que el GCR entra a mezclarse con los agregados de manera directa.

En algunos casos las partes más diminutas del GCR entran a modificar el cemento asfáltico. Existen varias tecnologías utilizadas para el proceso por vía seca, que son las siguientes: tecnología PlusRide, tecnología Genérica y tecnología Convencional.

6.3.5.1.1. Tecnologías.

Las dos tecnologías más comunes en Estados Unidos para el uso del GCR por vía seca son las tecnologías PlusRide y la tecnología Genérica o sistema TAK, otra tecnología muy popular es la que emplea granulometrías convencionales, la cual fue desarrollada en España y es actualmente usada en muchos países.

6.3.5.1.2. Plusride.

Esta tecnología fue originalmente desarrollada en Suecia a finales de los años 1960, y registrada en los estados unidos bajo el nombre comercial PlusRide por la firma EnviroTire. El GCR es agregado a la mezcla asfáltica en proporciones que van de 1 a 3 por ciento del peso total de los agregados. El GCR son partículas que van desde 4.2 mm (1/4") a 2.0 mm. El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre 2 y 4 por ciento, y por lo general son obtenidos con contenidos de ligante entre 7.5 a 9 por ciento.

6.3.5.1.3. Convencional.

Esta tecnología fue desarrollada en España para usar GCR en la mejora de mezclas asfálticas empleando granulometrías convencionales que no implican consumos elevados de cemento asfáltico, pero que aporten menos cantidad de caucho, aproximadamente en dos por ciento del peso total de los agregados. Estas mezclas asfálticas han sido evaluadas dinámicamente en el laboratorio y colocadas en la vía con buenos resultados.

6.3.5.1.4. Aplicación.

El proceso seco puede ser usado para mezclas asfálticas en caliente en granulometrías densas, abiertas o discontinuas. No puede ser usado en otro tipo de aplicaciones como mezclas en frío, sellos, o tratamientos superficiales por ser un proceso en el que no se modifica el ligante.

6.3.5.2. Proceso por vía húmeda

En este proceso, se unen los granos de caucho con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada llamada asfalto-caucho, que es usada de la misma manera que un ligante modificado. Este proceso se encuentra definido en la norma ASTM D8-88. La fabricación de asfalto-caucho consiste en la mezcla de los granos de caucho, usualmente de tamaño máximo 0.85 mm, con el cemento asfáltico en un estanque con agitación.

Generalmente, el porcentaje de adición de caucho es entre 18-24% con respecto al peso del ligante. Para promover la unión del asfalto y el caucho, es necesario establecer una temperatura y un tiempo de reacción dentro del estanque. Usualmente, la mezcla es formulada a temperaturas entre 180-210° C por 1 a 4 horas. Dentro de los requerimientos del proceso húmedo, se establece que el estanque agitador debe estar en terreno, ubicado junto a la planta asfáltica. Una vez que el asfalto-caucho alcance los parámetros requeridos, especialmente la viscosidad de la mezcla, se incorpora, en un proceso continuo, al mezclador de la planta asfáltica para unirse con los agregados pétreos, (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2002).

Figura 5. *Proceso de modificación por vía húmeda*

Fuente: Fernández, Ricardo. Pavimentos Sustentables. 2016

En la Figura 5 se describe este proceso que es conocido también como proceso McDonald y específicamente consta de un tanque donde se mezcla el betún (cemento asfáltico) con el GCR con una serie de tornillos sin fin para asegurar la circulación de la mezcla para que haya una reacción óptima entre estos dos materiales durante un periodo suficiente (por lo general este periodo está entre los 45 y 60 minutos), paralelo a esto se calientan los agregados pétreos en el proceso (4 y 5) para una mezcla posterior con el cemento asfáltico modificado (6) y poder así ser transportado al lugar de construcción (7). En este transporte se debe mantener una temperatura específica que va desde los 160°C a los 190°C, para evitar problemas de manejabilidad del material en el campo y pérdidas de propiedades mecánicas [20].

6.4. Composición de caucho de llanta.

Los módulos dinámicos son el valor absoluto del módulo complejo, que define la elasticidad de un material de viscosidad lineal sometido a una carga. Especificando la relación entre esfuerzo y deformación. En este ensayo se somete la probeta de cemento asfáltico de 15 cm de diámetro y una altura que varía entre 15 y 20 cm, a una compresión axial inconfínada. A esta probeta se le aplican una serie de cargas a diferentes frecuencias (1, 4, 10 y 16 Hz), variando la temperatura (5 °C, 25 °C y 40°C). El resultado de esta aplicación de cargas a diferentes frecuencias y temperaturas es un esfuerzo axial y una deformación unitaria recuperable. Donde la relación de estos dos es el Módulo dinámico. [21]

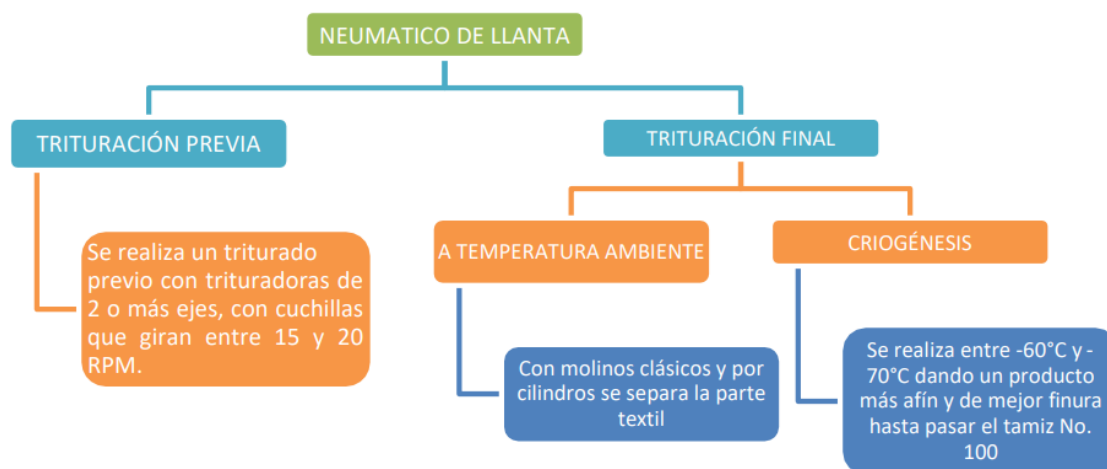
Figura 6. *Composición del Caucho*



Fuente: Elaboración propia apoyado en (Correa, 2018)

6.4.1. Niveles de molienda del neumático para transformarlo en grano de caucho.

Figura 7. Nivel de molienda del neumático.



Fuente (Correa, 2018)

6.5. Grano de caucho reciclado (GCR).

Es el material obtenido a partir de la trituración del caucho obtenido de las llantas usadas desechas de vehículos de transporte se le conoce como grano de caucho reciclado GCR está compuesto por caucho vulcanizado proveniente de la trituración mecánica y separación de materiales de las llantas usadas, no es tóxico. El GCR es un material obtenido de las llantas en desuso de los vehículos automotores, que por lo general tiene un destino no muy controlado ambientalmente, rellenos sanitarios, plantas térmicas, basureros a cielo abierto, entre otros, que generan un daño ambiental importante. Se obtiene mediante procesos de molienda de llantas usadas, disminuido en tamaño, este material es utilizado en diferentes obras de ingeniería civil, como lo son en rellenos de terraplenes, materiales de contención, pisos de parques, como modificador en las mezclas asfálticas, entre otros. [14]

En las diferentes revisiones bibliográficas realizadas en esta investigación se encontró que el grano de caucho se ablanda y se expande a medida que va reaccionando con el asfalto. La adición de éste a las mezclas produce un bitumen más espeso, lo cual tiene que ver con que se presente mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación.

Tabla 1. *Características del Granulo de Caucho.*

Característica	Requisitos
Humedad	- Máximo 0.75% de la masa total de la mezcla - El GCR debe fluir libremente
Gravedad Especifica	1.12 +- 0.05
Contenido de metales no ferrosos	No debe haber presencia visible
Contenido de metales ferrosos, en masa	Máximo 0.01%
Contenido de fibra en masa, en masa: - Para mezclas en calientes - Para riegos	Máximo 0.5% Máximo 0.1%
Contenido de polvo mineral (como talco): se suele usar para prevenir que los granos se peguen	Máximo 4.0%
Contenido total de otros elementos extraños, en masa; incluye: - Vidrio - Arena - Madera, etc	Máximo 0.25%

Fuente Norma INV E-413-07

6.5.1. Procesos de Obtención del Grano de Caucho Reciclado.

Estos procesos de molienda tienen como objetivo llegar a un tamaño máximo de partícula de $\frac{1}{4}$ “. Además, estos se diferencian en cuanto a la forma y la textura del GCR. Cada proceso debe evaluarse según los costos, como también el que se garantice que las partículas de GCR se encuentren libres de acero, fibras y otros productos que afecten de manera negativa la calidad del producto.

Aumentando la viscosidad, dependiendo de la cantidad y tipo de polímero, disminuye la penetración, aumenta el punto de reblandecimiento del asfalto entre 8 y 12 grados y así disminuye la susceptibilidad a las variaciones de temperatura.

6.5.2. Composición química de las llantas

La llanta está compuesta principalmente de tres productos: caucho (natural y sintético), un encordado de acero y fibra textil. A su vez, el caucho usado en la fabricación de neumáticos está compuesto por un grupo de polímeros (compuestos químicos de elevado peso molecular) entre los que se cuentan el polisopreno sintético, el polibutadieno y el más común que es el estireno-butadieno, todos basados en hidrocarburos.

Se agregan además, otros materiales al caucho para mejorar sus propiedades, tales como: suavizantes, que mejoran el manejo del caucho antes de la vulcanización; óxido de Zinc y de Magnesio, comúnmente denominados activadores, que son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias horas a pocos minutos; antioxidantes, para dar mayor vida al caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono; y finalmente negro de humo, especie de humo negro obtenido por combustión incompleta de gases naturales, que entrega mayor resistencia a la abrasión y la tensión.

Aunque suelen variar según el tipo de neumáticos y el país de fabricación, los diferentes elementos químicos que componen un neumático se muestran en tabla 1 junto a sus porcentajes respectivos.

En el proceso de vulcanizado, en la fabricación de la llanta, la goma virgen es mezclada con otros productos (caucho sintético, azufre y óxidos) y llevada a temperaturas que provocan cambios en su estructura química interna y en sus propiedades físicas.

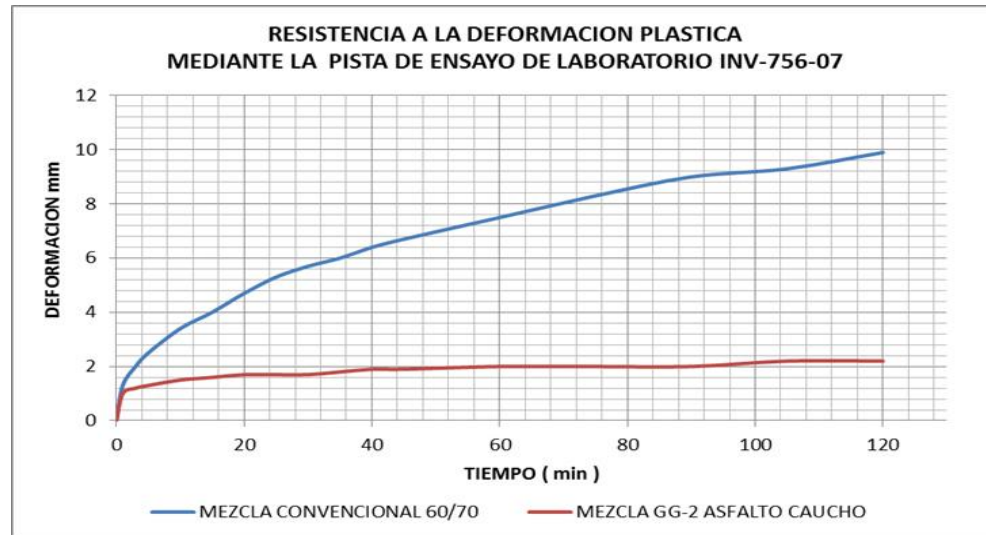
6.5.3. Asfaltos modificados con GCR

La empresa IncoAsfaltos inició producción de Asfalto Modificado con Grano de Caucho Reciclado (GCR), con resultados altamente satisfactorios, al producir 800 Toneladas de este producto, ayudando a reciclar aproximadamente 7.200 llantas usadas. Con 800 Toneladas métricas (TM) de Asfalto-Caucho entregadas por IncoAsfaltos, se han fabricado 5.300 m³ compactos de Mezclas Asfálticas, que han permitido la rehabilitación de 16,5 Km/Carril en diversas localidades de la ciudad capital Bogotá. [22]

Las mezclas asfálticas producidas con Asfalto agregando caucho reciclado, además de contribuir con la sostenibilidad del planeta utilizando un producto reciclado, son altamente resistentes a la fatiga y a las deformaciones permanentes, permitiendo construir pavimentos duraderos y verdaderamente ecológicos. Según registros internacionales donde ya se ha utilizado el GCR se ha podido lograr reducciones de espesor de capa hasta un 50%, generando una disminución en los costos de mantenimiento. Mediante ensayos realizados se ha establecido incrementos en las leyes de fatiga del orden de 6 veces versus asfaltos modificados con otros

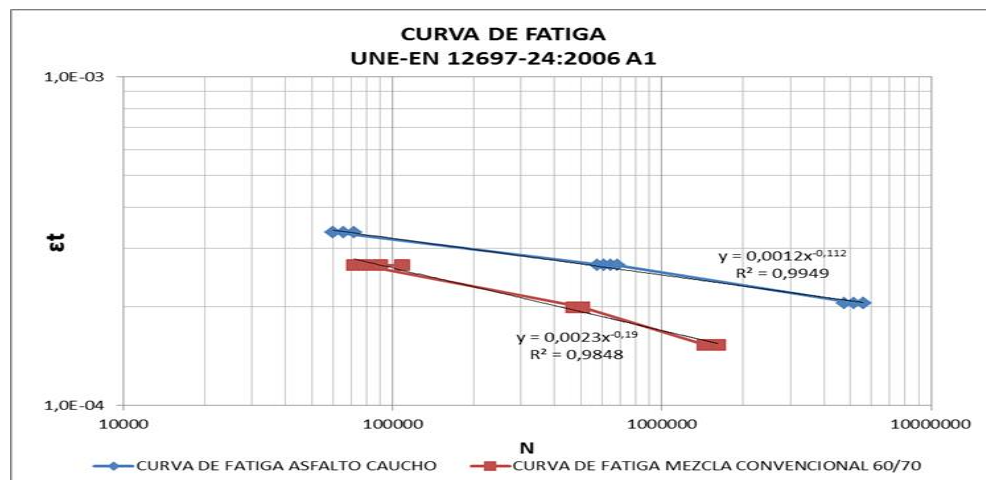
polímeros y de 20 veces con relación a mezclas tradicionales fabricadas con asfaltos de refinería 60/70, con deformaciones permanentes inferiores a 2 mm. [22]

Figura 8. Resistencia a la deformación plástica.



Fuente: IncoAsfalto 2015

Figura 9. Curva de fatiga.



Fuente: IncoAsfalto 2015

Tabla 2. *Proceso Industrial Molienda de Llantas.*

Tipo de Llanta	Peso Neto de Llanta	Porcentajes	Equivalente
Llanta de Camión	50 kg	20 % acero	10 kg
		6% fibra nylon	3 kg
		74% caucho susceptible de ser reutilizado	37 kg
Llanta de automóvil	7 kg	7% acero	10 kg
		10% fibra nylon	3 kg
		83% caucho susceptible de ser reutilizado	37 kg

Fuente Norma INV E-413-07

Considerando el promedio de 20 kg de grano de caucho reciclado (GCR) por llanta, para pavimentar 1 kilómetro de calzada de red vial nacional de 9,5 m de ancho, con espesor de 0.10 m de mezcla asfáltica tipo “Gap Graded” se reutilizarían 1.270 llantas por cada kilómetro intervenido.

6.5.4. Propiedades alcanzadas con los asfaltos modificados.

El objetivo perseguido con las adiciones de polímero en el asfalto, es cambiar las propiedades físicas y geológicas del ligante, buscando: Aumenta la viscosidad, dependiendo de la cantidad y tipo de polímero, disminuye la penetración, aumenta el punto de reblandecimiento del asfalto entre 8 y 12 grados y así disminuye la susceptibilidad a las variaciones de temperatura. Eleva la recuperación elástica del asfalto hasta arriba del 30%. Eleva la resiliencia por encima de 25. Amplio rango de temperatura en el manejo y almacenamiento. Mayor intervalo de plasticidad. Mayor cohesión. Mayor resistencia a la acción del agua. Mayor resistencia al envejecimiento. Las

propiedades que estos imparten dependen de los siguientes factores: Tipo y composición del polímero incorporado. Características y estructura coloidal del asfalto base. Proporción relativa del asfalto base. Es un modificador de asfaltos que mejoran la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de 19 temperaturas. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Muchos análisis de experimentación se han realizado, utilizando diferentes modificadores, tratando de lograr lo que en la teoría y en la práctica se dice de los asfaltos modificados.

7. Metodología

El tipo de investigación que se realizará, será experimental y comparativo, ya que se abordará el problema a través de ensayos, experimentos, pruebas y costos, contrastando las investigaciones anteriores para de esta manera determinar unos resultados concretos con el fin de establecer variables e influencia del GCR en el proceso técnico de la investigación.

En este capítulo se dará una breve descripción de la información, normativa, técnica y experimental relacionada con la mezcla modificada con GCR.

7.1. Normativa

Dentro de la normativa vigente en Colombia para la construcción de carreteras, existen las siguientes:

- Especificaciones INVIAS 2013. INV E-123-13. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.

- Especificaciones INVIAS 2013. Capítulo 4-Pavimentos asfálticos, Artículo 413-13.

Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado

- Especificaciones INVIAS 2013. Capítulo 4-Pavimentos asfálticos, Artículo 450-13.

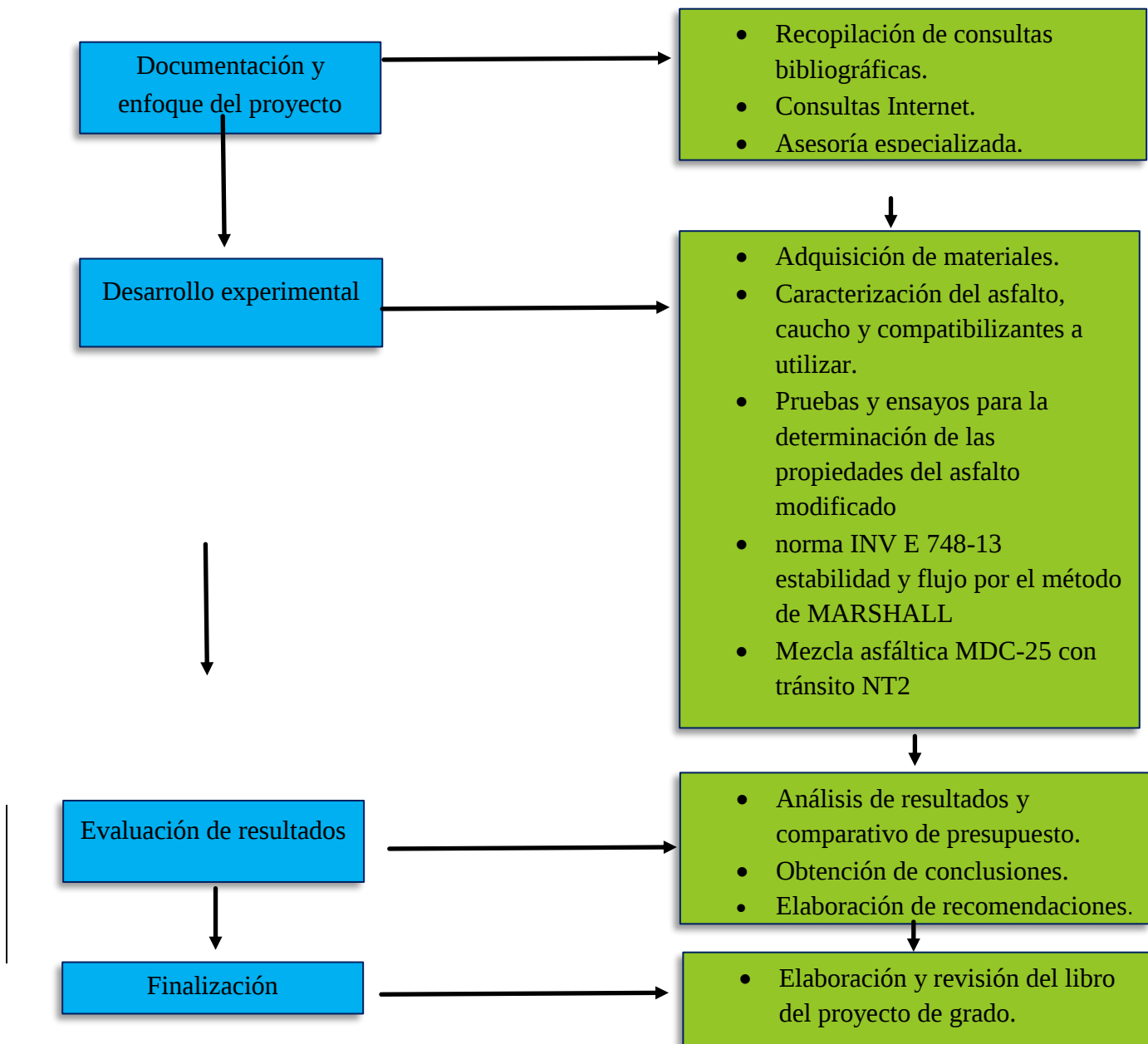
Mezcla asfáltica en caliente de gradación continua (concreto asfáltico).

- Especificaciones INVIAS 2013. INV E-748-13. Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.

La ejecución de este proyecto se realizará por medio de un proceso metodológico la cual se ve reflejado por medio de una fase experimental mediante ensayos y pruebas en el laboratorio NHSQ S.A.S. INGENIERIA en la ciudad de Villavicencio.

Para la ejecución de este proyecto, se dividirá en 4 etapas con el fin de resolver y analizar los resultados de las muestras de MDC-25.

A continuación, se mencionan las etapas previas para dar inicio al proyecto encaminado a una mezcla asfáltica modificada con grano de caucho reciclado.

Figura 10. *Etapas Metodológicas del proyecto.*

Fuente: Propia

Etapas 1: Documentación y enfoque del proyecto

En esta primera etapa se requiere hacer una recopilación de consultas bibliográficas, asesoría especializada y requisitos al diseño.

Etapas 2: Desarrollo experimental.

En esta etapa se adquieren los agregados pétreos de la cantera de la empresa MURCIA MURCIA S.A.S. cuya fuente de explotación es el Rio Guayuriba, Mina las Mercedes, vía Villavicencio a Acacias Km 14, Vereda las Mercedes en el departamento del Meta.

El cemento asfáltico utilizado en la investigación tuvo un índice de penetración 60-70 suministrada por la empresa Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. A la empresa MURCIA MURCIA S.A. para la elaboración de los diseños de mezcla asfálticas en caliente.

El grano de caucho reciclado Fue adquirido de una empresa de la ciudad de Villavicencio llamada VIPAL Rencauchadora de llantas, es una empresa encargada de la venta grano de caucho, parches para llantas, reparación de llantas y sellantes, esta empresa tiene sede principal en Bogotá, D.C. y en Villavicencio.

Luego de tener los agregados para el diseño de la mezcla asfáltica MDC-25, se realizará la granulometría.

Se realizó un diseño de mezclas asfáltica MDC-25 y mezcla asfáltica MDC-25 modificada con agregado de grano de caucho variando de 0%, 15%, 20%, 25%, (15% es lo mínimo que nos pide la norma INV E-413-13, y se trabaja cada 0,5% porque lo dice la norma Invias INV-E 748-13), se realizaron 5 briquetas por porcentaje de agregado de grano de caucho para la determinación de la estabilidad y flujo mediante el método de Marshall.

Resistencia de mezcla asfáltica en caliente empleando el aparato Marshall INV-E-748-13.

Se estiman para los ensayos un número de 20 briquetas, las cuales se distribuyen:

- MDC-25 con 0% de agregado de grano de caucho.
- MDC-25 con 15% de agregado de grano de caucho.
- MDC-25 con 20% de agregado de grano de caucho.
- MDC-25 con 25% de agregado de grano de caucho.

Etapas 3: Evaluación de resultados

Se realizaron un análisis de los resultados obtenidos de la estabilidad y flujo de las muestras, de acuerdo a los análisis podremos obtener nuestras conclusiones respecto a la comparación de la mezcla asfáltica MDC-25 y la mezcla asfáltica MDC-25 modificada con agregado de grano de caucho reciclado, después, se realizó un análisis comparativo de costos mediante un presupuesto de las mezclas asfálticas para una pavimentación de un tramo de 1 km y las ventajas y desventajas que esta trae para el mejoramiento de los pavimentos en comparación a la mezcla asfáltica MDC-25.

Etapas 4: Finalización

Se realizó la elaboración del documento final del proyecto de grado para la previa entrega.

7.2. Tipo de investigación.

El tipo de investigación que se realizó fue experimental y comparativo, ya que se aborda el problema a través de ensayos, experimentos y pruebas, contrastando las investigaciones

anteriores para de esta manera determinar unos resultados concretos con el fin de establecer variables e influencia del PET en el proceso técnico de la investigación.

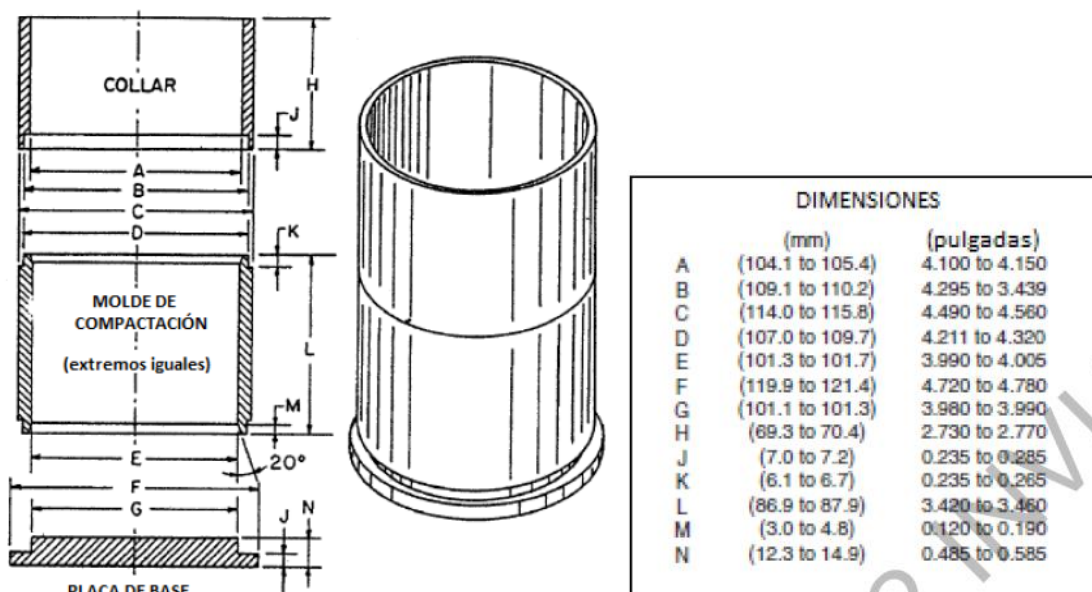
7.3. Instrumentos metodológicos de la investigación

De acuerdo a la norma INVE-748-13 Resistencia de Mezclas Asfálticas en caliente Empleando el Aparato Marshall. (2013), los instrumentos necesarios son:

7.3.1. Dispositivo para moldear probetas.

Consistente en un molde cilíndrico con un collar de extensión y una placa de base plana. El molde deberá tener un diámetro interior de 101.6 mm (4") y una altura interna aproximada de 76.2 mm (3"); la placa de base y el collar de extensión deberán ser intercambiables, es decir ajustables en cualquiera de los dos extremos del molde. Se recomienda disponer de tres (3) moldes.

Figura 11. Dispositivo para moldear probetas



Fuente: Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall, I.N.V. E-748-13

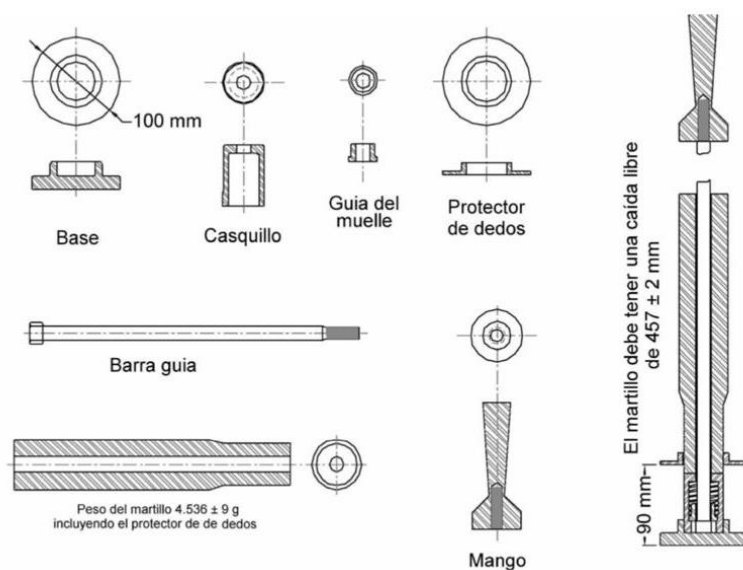
7.3.2. Extractor de Probeta.

Elemento de acero en forma de disco con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (1/2") de espesor, utilizado para extraer la probeta compactada del molde, con la ayuda del collar de extensión. Se requiere de un elemento adecuado para transferir la carga a la probeta, de manera que ésta pase suavemente del molde al collar.

7.3.3. Martillo de Compactación.

Consistente en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro y un pistón deslizante de 4536 ± 9 g (10 ± 0.02 lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de 457.2 ± 1.524 mm (18 ± 0.06 "), como se describe en la Figura 2. El martillo de compactación puede estar equipado con un protector de dedos.

Figura 12. Martillo de Compactación del equipo Marshall



Fuente: Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall, I.N.V.E-748-13

7.3.4. Pedestal de Compactación.

Consistente en una pieza prismática de madera de base cuadrada de 203.2 mm de lado y 457.2 mm de altura (8" x 8" x 18") y provista en su cara superior de una platina cuadrada de acero de 304.8 mm de lado x 25.4 mm de espesor (12" x 12" x 1"), firmemente sujeta en la misma. La madera será roble u otra clase cuya densidad seca sea de 0.67 a 0.77 g/cm³ (42 a 48 lb/pie³). El conjunto se fijará firmemente a una base de concreto, debiendo quedar la platina de acero en posición horizontal.

7.3.5. Sujetador para el molde.

Consiste en un dispositivo con resorte de tensión, diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal, deberá asegurar el molde completo en su posición durante el proceso de compactación.

7.3.6. Mordazas y medidor de deformación.

Las mordazas consisten en dos segmentos cilíndricos, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") maquinado con exactitud. La mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella y que sirven de guía a la mordaza superior. El movimiento de la mordaza superior se debe efectuar sin un rozamiento apreciable.

El medidor de deformación consiste en un deformímetro de lectura final fija, con divisiones en 0.25 mm (0.01"). En el momento del ensayo, el medidor deberá estar firmemente apoyado sobre la mordaza superior y su vástago se apoyará en una palanca ajustable acoplada a la mordaza inferior.

7.3.7. Prensa.

Para la rotura de las probetas se empleará una prensa mecánica o hidráulica capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50.8 mm por minuto (2"/min.). Su capacidad de carga mínima deberá ser de 40 kN

7.3.8. Medidor de la estabilidad.

La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 22.2 kN (2265 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 44.5 N (4.54 kgf) hasta 4.45 kN (454 kgf) y 111.2 N (11.4 kgf) hasta 22.2 kN (2265 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.0025 mm (0.0001").

7.3.9. Elementos de calefacción.

Para calentar los agregados, el material asfáltico, el conjunto de compactación y la muestra, se empleará un horno o placa de calefacción, provisto de control termostático, capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 2.8° C (5° F).

7.3.10. Mezcladora.

Es recomendable que la operación de mezclado de los materiales se realice con una mezcladora mecánica capaz de producir, en el menor tiempo posible, una mezcla homogénea a la temperatura requerida. Si la operación de mezclado se realiza a mano, este proceso se debe realizar sobre una placa de calefacción o estufa, para evitar el enfriamiento de los materiales, tomando las precauciones necesarias para evitar los sobrecalentamientos locales.

7.3.11. Tanque para agua.

De 152.4 mm (6") de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$ ($140^{\circ} \pm 2.0^{\circ} \text{ F}$). El tanque deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para sostener las probetas por lo menos a 50.8 mm (2") sobre el fondo del tanque.

7.3.12. Tamices.

Los necesarios para reproducir en el laboratorio la granulometría exigida por la especificación a los agregados para la mezcla que se va a diseñar.

7.3.13. Termómetros blindados.

De 9.9° C a 204° C (50° F a 400° F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 2.8° C . Para la temperatura del baño de agua se utilizará un termómetro con escala de 20° C a 70° C y sensibilidad de 0.2° C (68° F a $158^{\circ} \text{ F} \pm 0.4^{\circ} \text{ F}$).

7.3.14. Balanzas.

Una de cinco (5) kg de capacidad, sensible a un (1) g para pesar agregados y asfalto; otra de dos (2) kg de capacidad, sensible a 0.1 g para las probetas compactadas.

7.3.15. Guantes.

De soldador para manejar equipo caliente y de caucho para sacar las muestras del baño de agua.

7.3.16. Bandejas metálicas.

De fondo plano para calentar agregados y cubetas metálicas redondas de 4 litros (1 galón) de capacidad, para mezclar asfalto y agregados, cucharones, recipientes, espátulas, papel de filtro, etc.

7.4.Fases de investigación y/o procedimiento.

Las principales etapas que se adelantarán a nivel metodológico y cronológico en la investigación son:

7.4.1. Consultas bibliográficas.

Antes de comenzar la investigación se realizó una consulta bibliográfica acerca de las normas requeridas para la elaboración de mezclas asfálticas de acuerdo a la línea de investigación, estudiamos los datos y conclusiones obtenidos de las investigaciones anteriores para demostrar la evolución y viabilidad del proyecto.

7.4.2. Materiales utilizados.

Luego de conocer la normatividad y las exigencias de los materiales que se deben usar en el diseño de mezclas asfálticas se procedió a adquirir los siguientes materiales:

7.4.2.1.Agregado pétreo.

Los materiales pétreos utilizados durante el proceso de investigación se adquirieron de la cantera de la empresa MURCIA MURCIA S.A. Construcción de obras civiles, agregados

pétreos, mezclas asfálticas, cuya fuente de explotación es el Rio Guayuriba, Mina las Mercedes, vía Villavicencio a Acacias Km 14, Vereda las Mercedes en el departamento del Meta, las cuales fueron sometidas a las pruebas de caracterización conforme a los lineamientos de INVÍAS (2007).

7.4.2.2.Cemento asfáltico.

El cemento asfáltico utilizado en la investigación tuvo un índice de penetración 60-70 suministrada por la empresa Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. A la empresa MURCIA MURCIA S.A. para la elaboración de los diseños de mezcla asfálticas en caliente.

Figura 13. *Asfalto adquirido de MURCIA MURCIA S.A. Construcción de obras civiles, agregados pétreos, mezclas asfálticas.*



Fuente: Propia

7.4.2.3.GCR.

Fue adquirido de una empresa de la ciudad de Villavicencio llamada VIPAL Rencauchadora de llantas, es una empresa encargada de la venta grano de caucho, parches para

llantas, reparación de llantas y sellantes, esta empresa tiene sede principal en Bogotá, D.C. y en Villavicencio.

7.5.Procedimiento ensayos de laboratorio.

Después de obtener los materiales anteriormente mencionados, nos dirigimos al laboratorio a realizar los ensayos necesarios cumpliendo los requisitos de seguridad establecidos por el laboratorio.

El ensayo se realiza una gradación del material según la norma INVIAS, para ello se deberá hacer un cuarteo de cada material, para los agregados de características de grava se escogerá una muestra para realizar el análisis granulométrico por tamizado, tomando su peso y la muestra diagonal para la determinación de contenido de humedad, tomando su respectivo peso.

Figura 14. Cuarteo grava $\frac{3}{4}$ ''



Fuente. Propia

Para los agregados de características de arena se deberá hacer un cuarteo, se eliminan dos $\frac{1}{4}$ en diagonal, realizamos una mezcla de este material y se realizará nuevamente un cuarteo,

se escogerá una muestra para realizar el análisis granulométrico por tamizado, tomando su peso y la muestra diagonal para la determinación de contenido de humedad tomando su respectivo peso.

Figura 15. Cuarteo arena lavada



Fuente: propia

Figura 16. Peso muestras para análisis granulométrico y determinación de humedad.



Fuente: propia

Para el análisis granulométrico por tamizado, se deberá lavar cada muestra de material y pasarlo por el tamiz N° 200, luego se deberá secar en la estufa con una temperatura de 135 °C según la norma INVIAS, y por último se pasa por los diferentes tamices de tamaño que van desde

1 ½", 1", ¾", ½", 3/5", ¼", N°4, N°8, N°10, N°16, N°30, N°40, N°50, N°80, N°200 y el tamiz del fondo.

Figura 17. *Lavado de materiales.*



Fuente: propia

Figura 18. *Lavado de materiales pasando por tamiz N°200*



Fuente: propia

Figura 19. *Secado en estufa del material para análisis granulométrico.*



Fuente: propia

Figura 20. *Granulometría por tamizado.*



Fuente: propia

Para la determinación de contenido de humedad se deberá poner la muestra a secar en la estufa con una temperatura de 135°C según la norma INVIAS, luego se tomará nuevamente su peso para la determinación de la humedad.

Figura 21. *Peso muestras para análisis granulométrico y determinación de humedad.*



Fuente: propia

Figura 22. *Secado en estufa del material para determinación de humedad.*



Fuente: propia

El ensayo se realiza con la granulometría establecida por la norma INVIAS para un diseño de mezcla MDC-25. Para la determinación de la estabilidad y el flujo mediante el método de Marshall se realizaron 5 briquetas por porcentaje de GCR que varía entre 0%, 15%, 20% y 25% del cemento asfáltico.

De acuerdo a la norma INV E-748-13 cada briqueta contiene 1200 gr el cual multiplicamos por 5 que serán las briquetas elaboradas por porcentaje de asfalto, por tanto, nos da una masa total de 6000 gr que por motivos de desperdicio se aproxima en 8000 gr.

$$\text{Masa Total} = (1200\text{gr} * 5)$$

$$6000 \text{ gr} \approx \mathbf{8000 \text{ gr}}$$

Después de tener la masa total por porcentaje de asfalto y dosificación, procedemos a pesar los materiales necesarios para la mezcla, estos materiales ya secados para cumplir la cantidad establecida.

Tabla 3. Dosificación y cantidades del material

Masa total (gr)	% de asfalto	Asfalto (gr)	% de GCR	GCR (gr)	15% Grava 1 ½" (gr)	15% Grava ¾" (gr)	20% Grava ½" (gr)	45% Arena Lavada (gr)	5% Filler (gr)
8000	5.5	440	0	0	1200	1200	1600	3600	400
	4.675	374	15	66	1200	1200	1600	3600	400
	4.4	352	20	88	1200	1200	1600	3600	400
	4.125	330	25	110	1200	1200	1600	3600	400

El material lo pesamos cumpliendo el peso indicado en la tabla 3.

Figura 23. Peso de Grava 1 ½", Grava ¾" y Grava ½"



Fuente: propia

Figura 24. *Peso de Arena Lavada $\frac{3}{4}$ " y Filler*

Fuente: propia

Se vierten los materiales pétreos (Grava 1 $\frac{1}{2}$ ", Grava $\frac{3}{4}$ ", Grava $\frac{1}{2}$ ", Arena lavada y Filler) en un recipiente más amplio, en el cual se combinan de manera que quede una mezcla homogénea, este procedimiento se realiza sobre una estufa para que los agregados vayan adquiriendo la temperatura de 135°C.

Figura 25. *Homogenización obtención de la temperatura ideal para el material.*

Fuente: propia.

Después de tener lista la mezcla y verificar la temperatura optima de los materiales, el cemento asfaltico se deberá poner en la estufa, la temperatura del asfalto se deberá encontrar entre 180 y 200°C, para ser adicionada con los agregados pétreos.

Figura 26. Adicion del cemento asfaltico a la mezcla.



Fuente: propia

Para realizar la mezcla con porcentaje de grano de caucho, luego de que el cemento asfaltico se encuentre en temperatura entre 180 y 200°C podremos añadir el grano de caucho. No se permitirán aglomeraciones de partículas de caucho de tamaño mayor a 5cm dentro de la cámara de mezclado según la norma INV E 413-13

Figura 27. Adicion del cemento asfaltico modificado con el agregado de grano de caucho a la mezcla.



Fuente: propia

Al finalizar el proceso de mezclado de los agregados con el cemento asfáltico y el grano de caucho reciclado, observamos al adicional el GCR de esta manera se evidencia una mezcla más homogénea respecto las mezclas asfálticas sin el agregado de GCR.

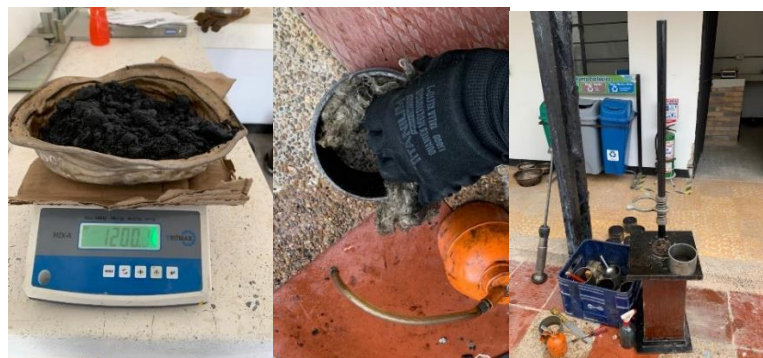
Figura 28. *Mezcla asfáltica lista para elaboración de briquetas*



Fuente: Propia

Procedemos a seleccionar los 1200gr para cada briketa, este proceso de selección debe realizarse lo más rápido posible ya que la mezcla no puede perder temperatura, antes de verter el material seleccionado en los moldes del aparato de Marshall y el martillo se deben limpiar y lubricar con ACPM para evitar adherencia de material a dichos objetos, además de facilitar la extracción de las briquetas.

Figura 29. *Peso muestra 1200 gr briketa, limpieza con ACPM de moldes y martillo del aparato Marshall.*



Fuente: Propia.

Vertido el material comenzamos a apisonar 25 veces en su interior con un elemento metálico liso, posteriormente compactamos aplicando 75 golpes por ambas caras de la briqueta con el martillo de compactación del aparato de Marshall.

Figura 30. *Apisonamiento de material en el interior del molde 25 veces.*



Fuente: Propia

Figura 31. *Compactación aplicando 75 golpes por ambas caras de la briqueta con el martillo de compactación del aparato de Marshall.*



Fuente: Propia.

Terminada la compactación procedemos a retirar la base dejando enfriar la briqueta al aire hasta que no se produzca ningún tipo de deformación al retirar del molde, esta actividad se realiza al día siguiente por medio de un gato mecánico.

Figura 32. *Enfriamiento y numeración de briquetas.*



Fuente: Propia.

Figura 33. *Extracción de briquetas.*



Fuente: Propia.

Una vez retiradas las briquetas de los moldes, pesamos cada una de las muestras, medimos su altura y espesor verificando que cumpla con el espesor óptimo establecido por la norma INV E-748 de 63.5mm y 101,6 mm respectivamente.

Figura 34. *Peso al aire, medición de altura y espesor de briquetas.*



Fuente: Propia.

Para las briquetas de nuestro ensayo que dieron con una altura superior a la indicada por la norma, se corregirá la cantidad inicial de agregados, de acuerdo a la expresión, en el sistema internacional SI:

$$\text{Masa correcta del agregado (gr)} = \frac{63.5 * \text{Masa usada de agregados (gr)}}{\text{Altura obtenida de la probeta (mm)}}$$

Luego que se hayan pesado al aire y medido todas las briquetas procedemos a determinar la masa de las briquetas sumergidas en agua, por medio de un péndulo casero con una balanza.

Figura 35. *Obtención peso en inmersión de briquetas por medio de péndulo casero.*

Fuente: Propia.

Se toma lectura de los pesos indicados por la balanza, retiramos la muestra del agua, la secamos de forma superficial y se pesan nuevamente.

Después de obtener todos los pesos de las briquetas, se colocan las probetas en un baño maría durante 30 minutos a una temperatura de 60°C, cumpliendo el tiempo estimado se retiran del baño de agua y se ubican en la prensa de la máquina de Marshall para aplicar la carga del ensayo, todos estos datos los anotamos y almacenamos para realizar análisis, cálculos y resultados.

Figura 36. *Inmersión de briquetas a baño María.*

Fuente: Propia

Figura 37. Determinación de estabilidad y flujo de las briquetas por medio de la máquina de Marshall.



Fuente: Propia.

7.6. Cálculos, Análisis y Resultados.

7.6.1. Cálculos de datos

Después de realizado el laboratorio, realizamos algunos cálculos con los datos obtenidos y remplazamos algunas ecuaciones indicadas en las normas trabajadas.

- Densidad de Bulk:

$$D_{bulk} = \frac{A}{B - C}$$

- Porcentaje de agua absorbido:

$$\% \text{Agua abs} = \frac{B - A}{B - C} * 100$$

Donde:

A: Masa briqueta seca al aire

B: Masa briqueta saturada superficialmente seca

C: Masa briqueta sumergida en agua

Tabla 4. *Obtención densidad Bulk y porcentaje de agua absorbido*

COMBINACIÓN		Briqueta N°	Masa Seca (gr)	Masa en el agua (gr)	Masa saturada superficialment e seca (gr)	Densidad de Bulk	% de agua absorbida
% de GCR	% de Asfalto						
0%	5,5%	1	1220,8	707,8	1225	2,360	0,81
		2	1213,2	700,6	1215,2	2,358	0,39
		3	1196,5	692,1	1198,6	2,362	0,41
		4	1202,5	695,2	1204,4	2,362	0,37
		5	1197,4	691	1198,6	2,359	0,24
15%	4,675%	1	1188,6	680,1	1190,9	2,327	0,45
		2	1177,4	671,8	1179,2	2,320	0,35
		3	1227,1	701,5	1230,3	2,321	0,61
		4	1197,8	682,5	1200	2,315	0,43
		5	1194,9	684,5	1198,2	2,326	0,64
20%	4,4%	1	1310,6	743,7	1312,8	2,303	0,39
		2	1330,1	754,8	1332,7	2,302	0,45
		3	1329,2	752,4	1332,4	2,292	0,55
		4	1288,2	730,2	1289,5	2,303	0,23
		5	1202,8	682,8	1206,9	2,295	0,78
25%	4,125%	1	1224	703,8	1225,3	2,347	0,25
		2	1236	697,2	1238,2	2,285	0,41
		3	1227,9	681,3	1230,7	2,235	0,51
		4	1213,4	678,1	1215,9	2,256	0,46
		5	1206,9	663,1	1210	2,207	0,57

Fuente: Propia

Tabla 5. *Volumen del agregado pétreo*

COMBINACIÓN		Densidad de Bulk	% Volumen agregados pétreo
% de GCR	% de Asfalto		
0%	5,5%	2,360	84,62
		2,358	84,52
		2,362	84,69
		2,362	84,66
		2,359	84,57
15%	4,675%	2,327	83,42
		2,320	83,19
		2,321	83,19
		2,315	82,98
		2,326	83,39
20%	4,4%	2,303	82,56
		2,302	82,51
		2,292	82,16
		2,303	82,57
		2,295	82,27
25%	4,125%	2,347	84,14
		2,285	81,9
		2,235	80,12
		2,256	80,89
		2,207	79,11

Fuente: Propia

- Vacíos en agregado pétreo:

$$\%Vap = 100 - Vap$$

Tabla 6. *Obtención de vacío del agregado pétreo*

COMBINACIÓN		% Volumen agregados pétreo	% Vacíos de agregado pétreo
% de GCR	% de Asfalto		
0%	5,5%	84,62	15,38
		84,52	15,48
		84,69	15,31
		84,66	15,34
		84,57	15,43
15%	4,675%	83,42	16,58
		83,19	16,81
		83,19	16,81
		82,98	17,02
		83,39	16,61
20%	4,4%	82,56	17,44
		82,51	17,49
		82,16	17,84
		82,57	17,43
		82,27	17,73
25%	4,125%	84,14	15,86
		81,9	18,1
		80,12	19,88
		80,89	19,11
		79,11	20,89

Fuente: Propia

- Estabilidad mima (N) de 7500

Tabla 7. *Obtención de estabilidad (N)*

COMBINACIÓN		N° de Briqueta	Estabilidad (kg)	Factor de corrección	Estabilidad (N)
% de GCR	% de Asfalto				
0%	5,5%	1	1133	0,89	9881
		2	1126	0,89	9819
		3	1099	0,96	10342
		4	1071	0,96	10073
		5	1127	0,96	10601
15%	4,675%	1	1288	0,96	12117
		2	1398	0,89	12194
		3	1486	0,83	12085
		4	1396	0,89	12176
		5	1386	0,89	12087
20%	4,4%	1	1675	0,81	13299
		2	1664	0,81	13210
		3	1702	0,81	13510
		4	1614	0,86	13605
		5	1508	0,86	13381
25%	4,125%	1	1434	0,86	12083
		2	1532	0,86	12908
		3	1444	0,89	12594
		4	1433	0,89	12496
		5	1477	0,89	12879

Fuente: Propia

- Flujo (mm) de 2.0 a 4.0

Tabla 8. Obtención flujo (mm)

COMBINACIÓN			N° de Briqueta	Flujo (mm)
% de GCR	% de Asfalto			
0%	5,5%		1	2,65
			2	2,72
			3	2,77
			4	2,64
			5	2,69
15%	4,675%		1	3,15
			2	3,09
			3	3,21
			4	3,04
			5	3,34
20%	4,4%		1	3,31
			2	3,35
			3	3,13
			4	3,06
			5	3,24
25%	4,125%		1	4,02
			2	4,49
			3	4,12
			4	4,3
			5	4,4

Fuente: Propia

- Rigidez máxima (estabilidad/flujo) de 3.0 a 5.0

$$R = \frac{E}{F}$$

Tabla 9. *Obtención de Rigidez máxima*

COMBINACIÓN		N° de Briqueta	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	Rigidez Máxima
% GCR	% de Asfalto				
0%	5,5%	1	9,88	2,65	3,73
		2	9,82	2,72	3,61
		3	10,34	2,77	3,73
		4	10,07	2,64	3,82
		5	10,60	2,69	3,94
15%	4,675%	1	12,12	3,15	3,85
		2	12,19	3,09	3,95
		3	12,09	3,21	3,76
		4	12,18	3,04	4,01
		5	12,09	3,34	3,62
20%	4,4%	1	13,30	3,31	4,02
		2	13,21	3,35	3,94
		3	13,51	3,13	4,32
		4	13,61	3,06	4,45
		5	13,38	3,24	4,13
25%	4,125%	1	12,08	4,02	3,01
		2	12,91	4,49	2,87
		3	12,59	4,12	3,06
		4	12,50	4,3	2,91
		5	12,88	4,4	2,93

Fuente: Propia

7.6.2. Análisis de Resultado

Los parámetros requeridos para una mezcla asfáltica en caliente para transito NT2 según las especificaciones técnicas del INVIAS (ART 450-13).

Tabla 10. *Criterios para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente de gradación continúa por el método Marshall.*

PARAMETROS O ENSAYO		ESPECIFICACION INVIAS (ART 450-13)
		NT2
ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS AGREGADOS INV 782-13		VER CURVA
RESISTENCIA DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL INV E 748-13	ESTABILIDAD	7,500 (16,875)
	FLUJO	2,0 mm – 4, 0mm
PORCENTAJES DE VACÍOS DE AIRE EN MEZCLAS ASFALTICAS PARA RODADURA INV E 736- 13		3,0 % - 5,0%
PORCENTAJE DE VACIOS LLENOS DE ASFALTO INV E 799-13		65% - 78%
RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO (KN/mm)		3,0 KN/mm – 5,0 KN/mm

Fuente: Especificaciones técnicas de INV E 450-13

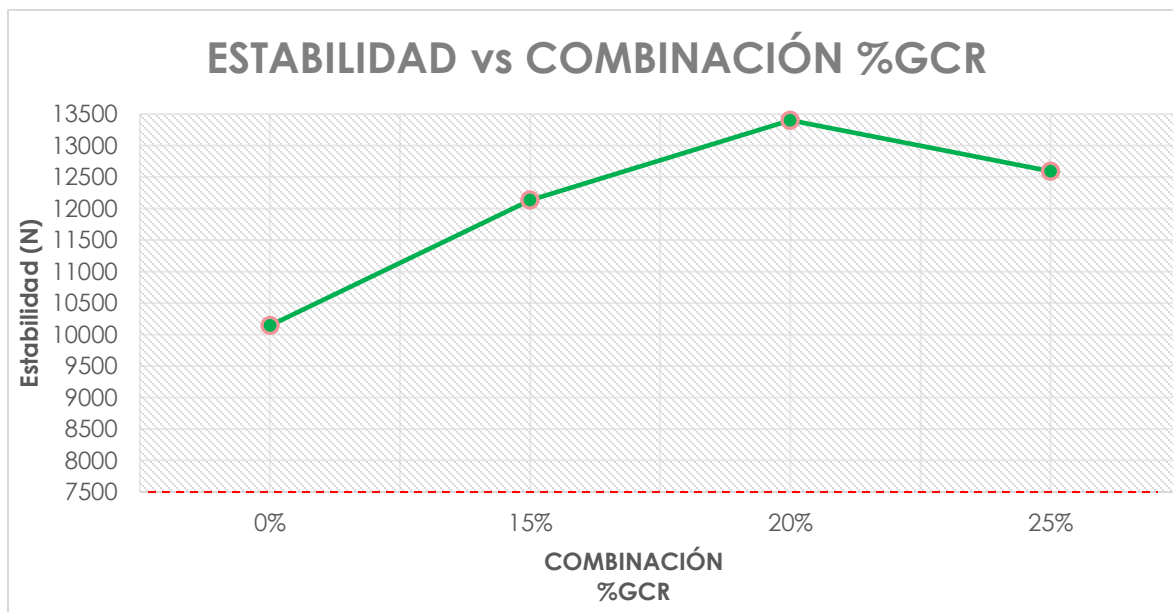
De acuerdo a los datos obtenidos con los ensayos de laboratorio realizados y mencionados anteriormente, se realizaron los cálculos para determinar las propiedades necesarias de un diseño de mezcla asfáltica caliente MDC-25 modificado con agregado de grano de caucho reciclado, para un tipo de transito NT2, en la tabla N° 9 se puede visualizar el promedio de los resultados de dichos cálculos para cada porcentaje de GCR.

Tabla 11. Resultado de laboratorio

% GCR	% Asfalto	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Estabilidad /Flujo (KN/mm)	Densidad de Bulk	% Vacíos mezcla total	% Vacíos llenos de asfalto	% Vacíos Agregado mineral
0%	5,5%	10143	2,69	3,77	2,36	2,68	82,62	15,39
15%	4,675%	12132	3,17	3,84	2,32	4,26	74,60	16,77
20%	4,4%	13401	3,22	4,17	2,29	5,20	70,43	17,59
25%	4,125%	12592	4,27	2,95	2,26	6,56	65,76	18,77

Fuente: Propia

8. Análisis de graficas

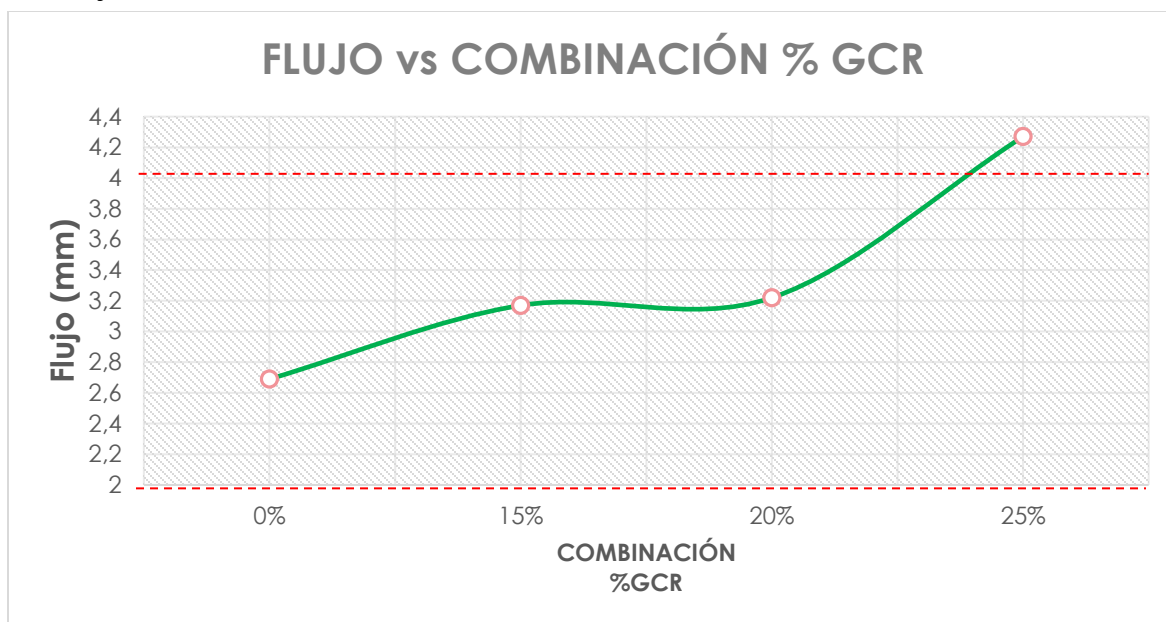
Grafica 1. Estabilidad vs Combinación % GCR

Fuente: Propia

En la gráfica 1 se evidencia la conducta de las 4 muestras de una mezcla MDC-25 modificado con agregado de grano de caucho reciclado, de los diferentes porcentajes de este agregado varían de 0%, 15%, 20%, 25% vs estabilidad.

El instituto nacional de vías INVIAS, en el artículo 450-13 en la tabla 10. “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall”, la estabilidad mínima para un pavimento flexible debe ser de 7.500 N. Según la gráfica 1 podemos observar que en los cuatro porcentajes de combinación de GCR cumple con su estabilidad mínima requerida por la norma INVIAS, sin embargo, se debe tener en cuenta que entre más bajo sea la estabilidad puede llegar a producir patologías de ahuellamiento y hundimiento. Si aumentamos el porcentaje de combinación de GCR la estabilidad también aumenta, pero podemos darnos cuenta que el valor máximo lo alcanza es con el 20% que llega a tener una estabilidad por encima de 13000 N y luego empieza a decaer con el 25% de la combinación de GCR.

Teniendo en cuenta la investigación “Comparación de la estabilidad y el flujo de una mezcla asfáltica MDC-25 y una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con agregado de grano de caucho reciclado”, comparando el porcentaje de combinación de GCR se tiene una mejor estabilidad con este agregado.

Grafica 2. *Flujo vs % GCR*

Fuente: Propia

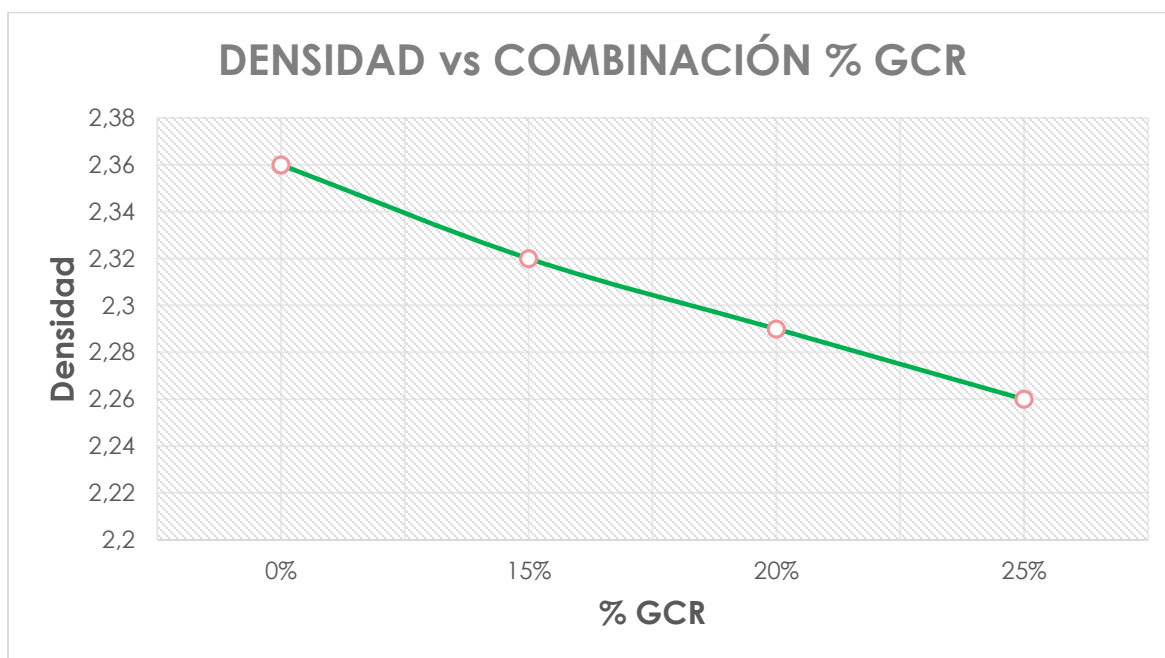
En la gráfica 2 podemos observar el flujo obtenido para una mezcla asfáltica MDC-25 con combinación de diferentes porcentajes de GCR, el flujo está en milímetros y esto hace referencia a la deformación que sufre la mezcla dependiendo el porcentaje de esta combinación.

El Instituto Nacional de Vías INVIAS, en el artículo 450-13 en la tabla 10. “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall”, el flujo debe encontrarse entre 2,0 a 4,0 milímetros, de acuerdo a la norma INVIAS, observamos que, si nos cumple los criterios establecidos por la norma INVIAS las combinaciones con porcentajes de 0%, 15%, y 20% de GCR, la combinación de 25% de GCR tiene un flujo de 4,27 milímetros y no nos cumple con los criterios de INV E-450-13.

Teniendo en cuenta la investigación “Comparación de la estabilidad y el flujo de una mezcla asfáltica MDC-25 y una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con agregado de grano de caucho reciclado”, podemos observar que a medida que aumenta el porcentaje de combinación de

GCR va en aumento el valor del flujo, sin embargo, en la gráfica 1 de estabilidad observamos que después de la combinación de 20% de GCR , empieza a disminuir su estabilidad, pero aun así cumple con los parámetros de la norma INVIAS, mientras que la combinación de 25% de GCR en el flujo tiene el valor máximo, teniendo en cuenta la norma INVIAS esta combinación no cumple con los parámetros de diseño.

Grafica 3. *Densidad de Bulk vs % GCR*

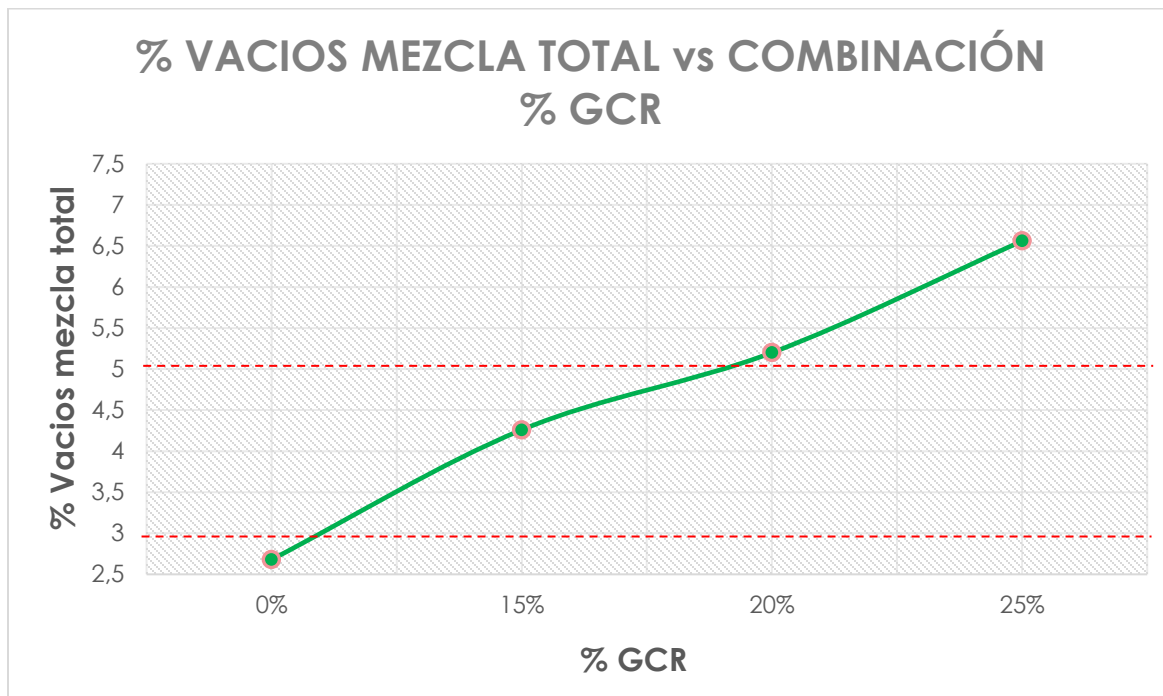


Fuente: Propia

En la gráfica 3 podemos observar el comportamiento de la densidad de Bulk para una mezcla MDC-25 con las diferentes combinaciones de agregado de grano de caucho reciclado. Se observa que a menor cantidad de cemento asfáltico tenemos mayor porcentaje de vacíos y esto hace que sea menos densa la mezcla. La norma INVIAS no maneja ningún criterio de diseño,

debido a que esto depende del diseño de mezcla donde la densidad puede ser un valor relativo, la densidad no es una propiedad que genere un riesgo al pavimento.

Grafica 4. % Vacíos mezcla total vs Combinación % GCR



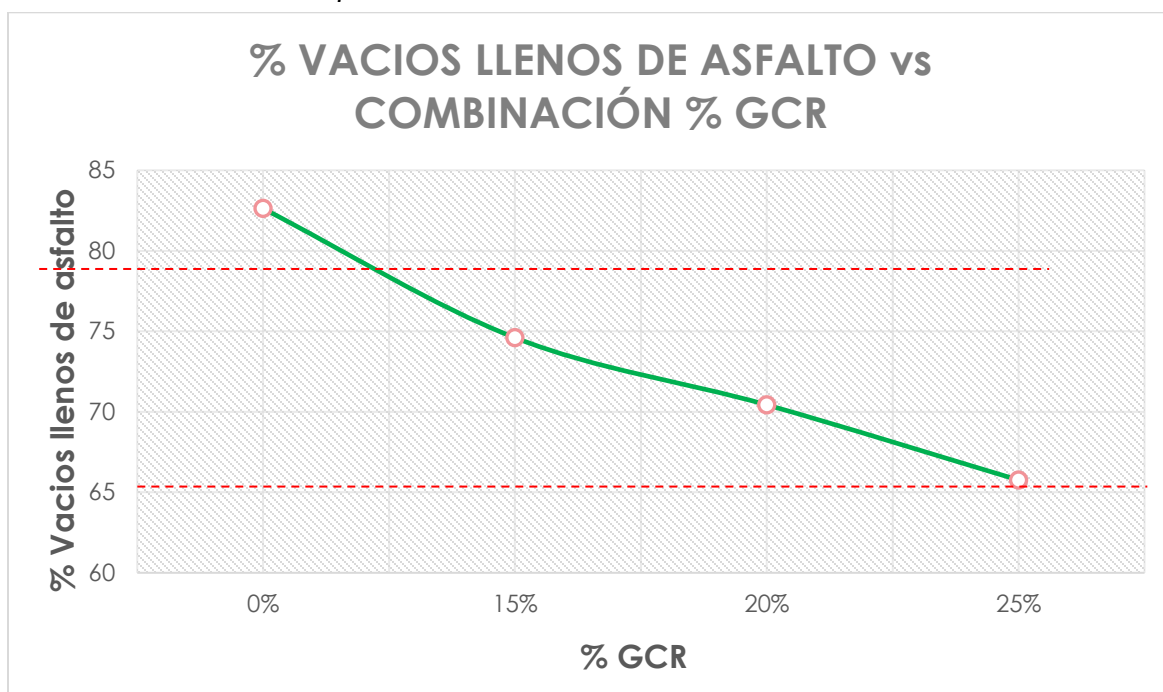
Fuente: Propia

En la gráfica 4 podemos observar el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica MDC-25 con diferentes combinaciones de porcentajes de GCR, en esta grafica podemos determinar qué tan permeable puede ser el diseño de mezcla conforme lo establecido en la norma INVIAS la cual debe estar entre 3% a 5%.

Observando la gráfica 4 se puede evidenciar que a mayor cantidad de combinación de porcentaje de GCR mayor será el porcentaje de vacíos de la mezcla total, debido a que el asfalto va cubriendo los diferentes vacíos que se van presentando en la mezcla, sin embargo, no será suficiente para cumplir la norma, los cuales la mezcla permite el ingreso de agua o aire a la estructura del pavimento.

Teniendo en cuenta la investigación “Comparación de la estabilidad y el flujo de una mezcla asfáltica MDC-25 y una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con agregado de grano de caucho reciclado”, podemos evidenciar que la única mezcla asfáltica MDC-25 que cumple con los criterios de diseño según la norma INVIAS es la combinación de 15% de GCR.

Grafica 5. % Vacíos llenos de asfalto vs Combinación % GCR



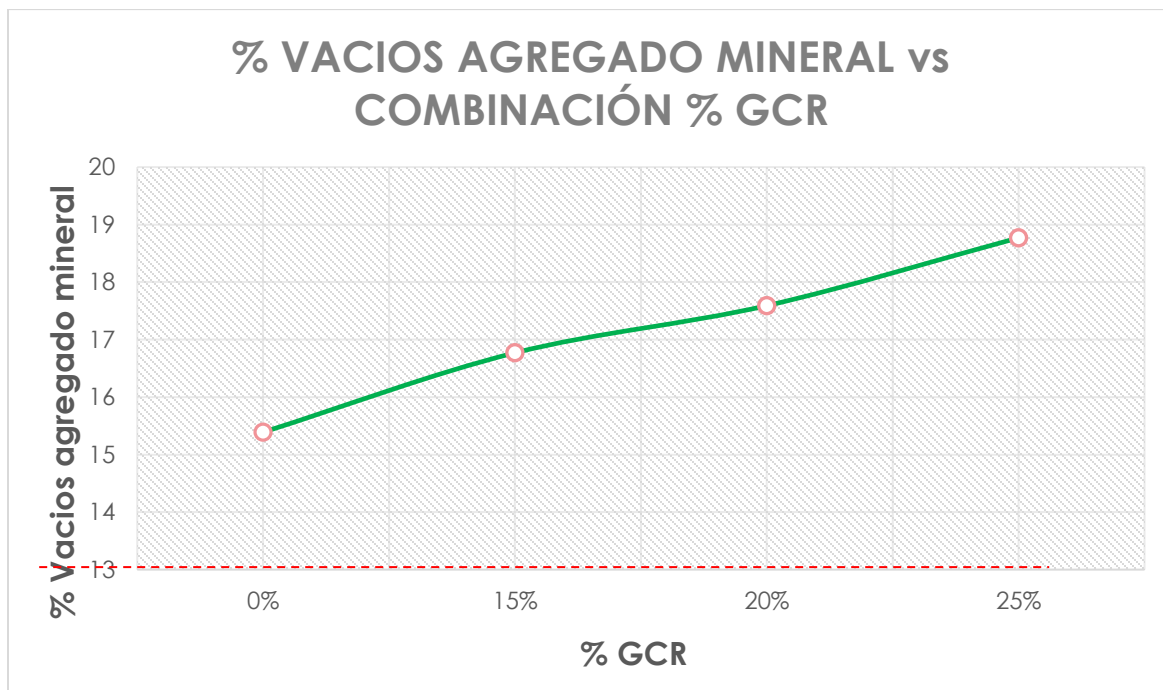
Fuente: Propia

En la grafica 5 podemos observar el porcentaje de vacios llenos de asfalto para una mezcla MDC-25, teniendo en cuenta con los criterios de diseño según la norma INVIAS, el porcentaje con 0% de GCR no cumple con estos parametros, el porcentaje de vacios llenos de asfalto debe estar entre 65% y 78%.

Teniendo en cuenta la investigación “Comparación de la estabilidad y el flujo de una mezcla asfáltica MDC-25 y una mezcla asfáltica MDC-25 modificada con agregado de grano de

caucho reciclado”, podemos evidenciar que la presencia del GCR nos ayuda a encontrarnos dentro de los parámetros y cumplir con los criterios de diseño de la norma INVIAS.

Grafica 6. % Vacíos agregado mineral vs Combinación % GCR



Fuente: Propia

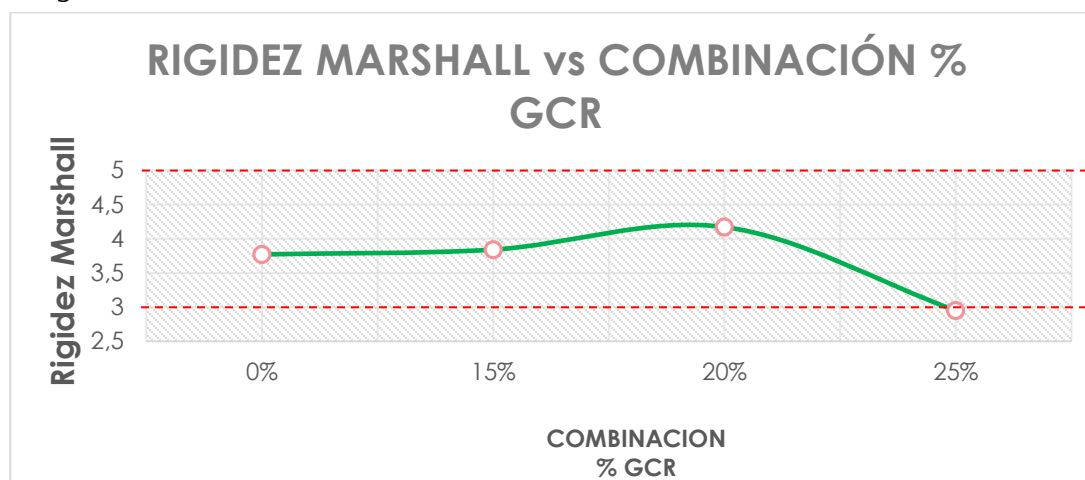
En la gráfica 6 podemos observar el porcentaje de vacíos de agregado mineral para una mezcla asfáltica MDC-25 con diferentes combinaciones de porcentaje de GCR, cumpliendo los criterios establecidos por la norma INVIAS, donde establece que el tamaño máximo es de 38mm y un valor mínimo de 13% de vacíos de agregado mineral.

Debemos de tener en cuenta que son los vacíos en el agregado mineral, estos vacíos son los espacios de aire que se encuentran en las partículas de agregado en las mezclas compactadas de pavimentos, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto, también podemos decir que

representa el espacio disponible para el asfalto y el volumen de vacíos que podemos encontrar en la mezcla.

Podemos observar que en la gráfica 6 que, a mayor cantidad de grano de caucho reciclado, menor será el porcentaje que vacíos que tendrá el agregado mineral, teniendo en cuenta los criterios de la norma INVIAS que con cualquier porcentaje de combinación de porcentaje de GCR cumple, ya que la norma nos dice que lo mínimo es 13%.

Grafica 7. Rigidez Marshall vs Combinación % GCR



Fuente: Propia

En la gráfica 7 podemos observar la rigidez Marshall vs combinación de porcentaje de GCR, de acuerdo con los datos recolectados durante el laboratorio, la rigidez está dada en KN/mm y esta es la relación entre la resistencia y la deformación que la mezcla permite dependiendo de la combinación de porcentaje de GCR, y podemos determinar si el pavimento es flexible o rígido.

Según los criterios de diseño en la norma INVIAS, la rigidez Marshall debe estar entre 3,0 y 5,0 KN/mm, teniendo en cuenta esto, observamos la gráfica 7 y la combinación de 25% de GCR no cumple relación estabilidad/flujo con lo establecido en la norma por el método Marshall.

9. Análisis Comparativo de presupuesto

Para el siguiente presupuesto se tuvo en cuenta precios y materiales con los que se desarrollaron los ensayos de laboratorio; los agregados pétreos adquiridos de la cantera de la empresa MURCIA MURCIA S.A.S., el cemento asfáltico suministrado por la empresa Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. A la empresa MURCIA MURCIA S.A. para la elaboración de los diseños de mezclas asfálticas en caliente, y el grano de caucho reciclado fue adquirido de una empresa de la ciudad de Villavicencio llamada VIPAL Rencauchadora de llantas.

En el presupuesto con mezcla asfáltica MDC-25, con 5,5% de cemento asfáltico y 0% de grano de caucho reciclado; para el presupuesto con mezcla asfáltica MDC-25 modificada con 4,675% de cemento asfáltico y un 15% de grano de caucho reciclado, se escoge este porcentaje de grano de caucho reciclado teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el laboratorio cumpliendo con los parámetros de la norma INVIAS 2013.

La siguiente comparación de análisis de presupuesto se tuvo en cuenta para la pavimentación de un tramo de 1 kilometro, con 2 carriles de 3,5m, con bermas de 0,5m y con un espesor mínimo según INVIAS tabla 450-7 para NT2 de 6 cm.

Tabla 12. Comparación de presupuestos para la pavimentación de 1 km con MDC-25 y MDC-25 modificada con GCR.

PRESUPUESTO PARA LA PAVIMENTACION DE 1 KM CON MDC-25					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANT.	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
1	MATERIAL PETREO				\$ 18.302.400
1.1.	Grava 1 1/2"	M3	72	\$ 33.000	\$ 2.376.000
1.2.	Grava 3/4"	M3	72	\$ 43.500	\$ 3.132.000
1.3.	Grava 1/2"	M3	96	\$ 43.500	\$ 4.176.000
1.4.	Arena lavada	M3	216	\$ 36.400	\$ 7.862.400
1.5.	Filler	M3	24	\$ 31.500	\$ 756.000
2.	CEMENTO ASFALTICO	GL	6974	\$ 14.564	\$ 101.569.336
VALOR OBRA					\$ 119.871.736
IVA				19%	\$ 22.775.629,8
VALOR TOTAL OBRA					\$ 142.647.366

PRESUPUESTO PARA LA PAVIMENTACION DE 1 KM CON MDC-25 MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND.	CANT.	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
1	MATERIAL PETREO				\$ 18.302.400
1.1.	Grava 1 1/2"	M3	72	\$ 33.000	\$ 2.376.000
1.2.	Grava 3/4"	M3	72	\$ 43.500	\$ 3.132.000
1.3.	Grava 1/2"	M3	96	\$ 43.500	\$ 4.176.000
1.4.	Arena lavada	M3	216	\$ 36.400	\$ 7.862.400
1.5.	Filler	M3	24	\$ 31.500	\$ 756.000
2.	CEMENTO ASFALTICO	GL	5928	\$ 14.564	\$ 86.335.392
3.	GRANO DE CAUCHO RECICLADO	KG	3766	\$ 1.000	\$ 3.766.000
VALOR OBRA					\$ 108.403.792

IVA	19%	\$ 20.596.720,5
VALOR TOTAL OBRA		\$ 129.000.512
DIFERENCIA ENTRE PRESUPUESTOS		\$ 13.646.854

Fuente: Propia

10. Ventajas y Desventajas MDC-25 con Agregado de GCR

Tabla 13. *Ventajas y Desventajas mezcla asfáltica MDC-25 modificada con GCR.*

MEZCLA ASFALTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO.	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
- Mejoras en la estabilidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito, permitiendo tener pavimentos más seguros para la circulación de los usuarios. - La modificación de MDC-25 con GCR, disminuye los vacíos llenos de asfalto permitiendo estar entre los parámetros establecidos por la norma INVIAS	- A mayor cantidad q se agregue de GCR para modificar la mezcla asfáltica MDC-25, hace que la deformación del espécimen al punto de máxima carga no cumpla con los criterios de diseño de esta mezcla. - Para que una mezcla asfáltica cumpla con la rigidez Marshall, debe tener una relación entre 3,0 y 5,0 que permita que la mezcla tenga una resistencia y la deformación para que esta no tenga fallas por ahuellamiento, para

- Al modificar la MDC-25 podremos obtener un mayor porcentaje de vacíos de los agregados minerales que nos podrá permitir el diseño de esta mezcla. - Mejora adhesividad entre agregados y ligantes.	no comprometer el confort y seguridad de la circulación de los usuarios. - Entre mayor sea el porcentaje de GCR la mezcla asfáltica tendrá parámetros de diseño que no cumplirá según lo establecido por la norma INVIAS.
--	--

Fuente: Propia

11. Conclusiones

- El análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio de una mezcla asfáltica MDC-25 para un nivel de tránsito NT2, se pudo obtener que la combinación de porcentaje de GCR más óptimo para que cumpla con todos los criterios de diseño establecidos por la norma INV E-450-12 es la combinación de que contiene 15% de grano de caucho reciclado del 5,5 % de asfalto.
- Las llantas desechadas son un problema ambiental que va en crecimiento, la reutilización de este residuo ayudara a disminuir estos problemas, mediante este documento se evidenció que se puede implementar el grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica MDC-25 mejorando los problemas de ahuellamiento, disminuyendo los contenidos de vacíos de aire en la mezcla asfáltica, creando pavimentos sostenibles y más seguros para la circulación de los usuarios.
- El flujo para una mezcla asfáltica MDC-25 con una combinación de 25% DE GCR, no fue favorable para el nivel de tránsito estudiado teniendo en cuenta la norma INVIAS.
- Según lo observando en la gráfica 5. Vacíos llenos de asfalto vs combinación de % GCR, podemos concluir que sin contenido de GCR la mezcla asfáltica MDC-25 no es apta para este nivel de tránsito estudiado debido a que su porcentaje de vacíos supera lo establecido por la norma INVIAS, un motivo por el cual no cumpla con los parámetros es que la cantidad de agregados produzca exceso de vacíos en la mezcla que pueden ser llenados por el asfalto, una solución a esto puede ser agregando GCR, en la

gráfica 5 podemos observar que la combinación del 15% GCR cumplimos con los parámetros establecidos en la norma para un nivel de tránsito NT2.

- Teniendo en cuenta el laboratorio realizado en este trabajo, y teniendo en cuenta el porcentaje de caucho presente en las llantas, así como la cantidad de éste usado en la mezcla asfáltica MDC-25, se obtuvo una relación de aprovechamiento de 136 kilogramos de llantas desechadas por cada tonelada de asfalto modificado producido, creando una propuesta de una alternativa de carácter ambiental para un manejo de estos residuos sólidos.

- Se puede evidenciar en el presupuesto que la mezcla asfáltica MDC-25 es un 11% más costosa que la mezcla asfáltica MDC-25 modificada con grano de caucho reciclado, teniendo que la mezcla asfáltica modificada tiene un ahorro de un 17% en la inversión del cemento asfáltico.

- Para la pavimentación de 1 km con mezcla asfáltica MDC-25 modificada necesitaremos aproximadamente 3.766 kg de grano de caucho reciclado, creando un impacto positivo en el medio ambiente, ya que estamos ayudando a reciclar este residuo que tanto daño causa.

12. Recomendaciones

- El presente proyecto fue realizado para una iniciativa de investigación y los beneficios que genera el reciclaje de llantas en este caso el grano de caucho reciclado, de esta misma manera motivar a los futuros ingenieros a seguir investigando teórica y experimentalmente el uso de este agregado en asfaltos.
- Realizar la pavimentación de un tramo experimental, teniendo en cuenta la combinación del porcentaje de GCR que nos fue más óptimo para cumplir con los parámetros de INVIAS en el laboratorio, para verificar las propiedades mejoradas.
- Este proyecto pretende ayudar a utilizar nuevos métodos de implementación en los agregados de las mezclas asfálticas, específicamente en los diseños de pavimentos generando cambios positivos en el medio ambiente.

13. Referencia Bibliográfica

- C. Guevara, «El problema de las llantas en Bogotá,» 28 Febrero 2015. [En línea].
[1] Available: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15317455>. [Último acceso: 12 10 2020].
- B. Carreño, «scientific american,» Llantas de desecho se transforman en trampas para mosquitos, 2016 mayo 2016. [En línea]. Available: <https://www.scientificamerican.com/espanol/noticias/llantas-de-desecho-se-transforman-en-trampas-para-mosquitos/#:~:text=En%20la%20remota%20ciudad%20de,como%20zika%2C%20dengue%20y%20chikungunya..> [Último acceso: 13 10 2020].
- L. M. S. M. LAURA CARDONA GÓMEZ, «Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos,» Tesis para obtener especialización en PML, Medellín, 2015. pp. 11-12. Recuperado de: https://www.idu.gov.co/web/content/7461/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas
- J. Puello Méndez y N. Afanasjeva, «Técnicas instrumentales para la evaluación del envejecimiento en los asfaltos,» *Dialnet*, vol. 6, pp. 1-2, 2016.
- I. L. L. R. J. P. R. R. ARMANDO RAMÍREZ VILLAMIZAR, «DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO CAUCHO TECNOLOGÍA GAP GRADED PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ,» Bogotá D.C., 2014.
- S. e. i. p. e. asfalto, «IncoAsfaltos,» julio 2014. [En línea]. Available: http://www.incoasfaltos.com/links/PRESENTACI%C3%93N_ASFALTO_CAUCHO_MARZO%202015.pdf. [Último acceso: 09 2019].
- I. D. D. URBANO, «SEGUNDA FASE DEL ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS – PISTA DE PRUEBA,» Bogotá D.C., 2015.
- b. X. X. J. R. Lu Sun a, «Modificación de asfalto utilizando nano-materiales y compuestos de polímeros considerando el rendimiento a alta y baja temperatura,» *ELSEVIER*, 2016.
- c. H. N. H. A. Abbaas I. Kareem a, «Rendimiento de asfalto de mezcla en caliente producido con agregados de hormigón reciclado de doble capa,» *ELSEVIER*, 2019.
- M. Z. A. O. Hamidreza Sahebzamani, «Evaluación de la efectividad de los aditivos de mezcla de gránulos polimerizados para mejorar las propiedades de la mezcla de asfalto,» *ScienceDirect*, 2018.

- [11] S. D. E. P. L. F. W. M. G. L. Shahin Khoeini, «Uso de mezclas a base de polímeros como alternativa a las mezclas de asfalto en carreteras de bajo volumen,» *ScienceDirect*, 2019.
- [12] P. G. Anguas, *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*, Lima: Universidad nacional de ingeniería, 2014.
- [13] F. A. R. Hugo Alexander Rondón, *Pavimentos. Materiales, construcción y diseño*, Bogota: ECOE, 2015.
- [14] Y. M.-M. A. M. T.-L. Hugo A. Rodón-Quintana, «Influencia de la Temperatura de Compactación Sobre La Resistencia Bajo Carga Monotonica de Mezcla Asfálticas Modificadas Con Grano de Caucho Reciclado de Llantas,» *TecnoLógicas*, 31 Agosto 2012.
- [15] C. M. C. C. L. C. Díaz Claros, «Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá,» *Repositorio USTA*, Bogota, 2017.
- [16] I. d. D. U. IDU, «<https://www.idu.gov.co>,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.idu.gov.co/web/content/7632/560-11.pdf>. [Último acceso: 2020].
- [17] N. I. RAMÍREZ, «Efecto del grano de caucho en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12.,» *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, Tunja, 2018.
- [18] Grupocad, «<https://es.slideshare.net>,» 2015. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/grupocad/asfaltos-49510214>. [Último acceso: 2020].
- [19] J. L. D. A. RICARDO ALBERTO ANGULO RODRÍGUEZ, «MODIFICACIÓN DE UN ASFALTO CON CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS,» *UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER*, Bucaramanga, 2005.
- [20] R. Fernandez, «Pavimentos Sustentables,» 2016. [En línea]. Available: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>.
- [21] H. Ospina., «Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho. magister en ingeniería civil con énfasis en estructuras,» *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*, Bogota-Colombia, 2014.
- [22] IncoAsfaltos, «Asfaltos Modificados con GCR,» Chía, 2014.
- [23] R. Verdugo, «Realidades y percepciones del uso de los asfaltos modificados en Colombia,» *Santafé de Bogotá D.C.*, 2014.

- M. d. A. y. D. Sostenible, «Minambiente,» 2017. [En línea]. Available:
[24] <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/248-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-14#plan-posconsumo-llantas-usadas>.
- M. d. A. y. D. sostenible, «Minambiente,» 2010. [En línea]. Available:
[25] <http://WWW.andesco.com/site/assets/media/camara/ambiente/Normativa/Resolucion%201457%20de%202010%20del%20MAVDT%20-%20Postconsumo%20llantas%20usadas.pdf>.
- R. L. R. R. R. Villamizar, «Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap graded para la ciudad de Bogotá,» Bogotá D.C., 2014.
[26]
- M. d. A. y. D. Sostenible, «Minambiente,» 2018. [En línea]. Available:
[27] <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/458-plantilla-cambio-climatico-14>.
- B. Carreño, «Llantas de desecho se transforman en trampas para mosquitos,» 2016.
[28]
- N. y. A. M. C. Afanasieva, «Estudio del proceso de envejecimiento de los asfaltos colombianos bajo la acción de algunos factores climáticos,» Bogotá, 2017.
[29]
- O. R. Hernández, «www.scielo.org.,» 08 2015. [En línea]. Available:
[30] http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000300009. [Último acceso: 08 2020].
- U. D. L. ANDES, « SEGUNDA FASE DEL ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS – PISTA DE PRUEBA,» Bogotá, 2005.
[31]

Apéndice

Resultados de Laboratorio Estabilidad y Flujo de la mezcla asfáltica MDC-25 y mezcla asfáltica MDC-25 modificada con GCR.

Pág. 100 - 111

	CONSECUTIVO: ASF-001-4841-20		ISO 9001:2015  BUREAU VERITAS Certification CO18.01105
	PAGINAS: 1 DE 12		
RESULTADOS DE LABORATORIO – TESIS DE GRADO (MDC-25)			
Este documento es propiedad de NHSQ INGENIERIA y no debe ser modificado, copiado o difundido por ningún medio a persona alguna no autorizada sin el permiso o aprobación del propietario. El solicitante o usuario será responsable por cualquier uso indebido. Este documento no es válido sin la firma en original.		DEPARTAMENTO: META	MUNICIPIO: VILLA VICENCIO
		FECHA DE ENTREGA: 21/SEPTIEMBRE/2020	
ELABORADO Y APROBADO:  LABORATORIO DE SUELOS, ING. NESTOR HERNAN SUAREZ Q. Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos Especialista en Patología de la Construcción M.P. 25202-158140 CND	VERSIÓN	FECHA	
	DESCRIPCIÓN		
SOLICITANTE: YEISON JAVIER HERRERA MORENO CC: 1121950286	PROYECTO: COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.		

		LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS "PROFESIONALES FORJANDO PAÍS"		
RESULTADOS DE LABORATORIO (MDC-25) COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.				
VERSIÓN	FECHA DE VIGENCIA	CÓDIGO	CONSECUTIVO	
004	15/07/2019	#LAB-016	ASF-001-4841-20	
ESTE DOCUMENTO ES VALIDO CON LA FIRMA Y SELLO EN ORIGINA DE NHSQ INGENIERÍA S.A.S				

Villavicencio, 21 de septiembre de 2020



Señores:
YEISON JAVIER HERRERA MORENO
 NIT: 1121950286
 Ciudad.

Ref. COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.

Tema: Resultados de laboratorio – Tesis de Grado (MDC-25).

Cordial saludo,

Por medio del presente informe nos permitimos entregar los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la MDC-25 modificada con agregado de grano de caucho reciclado. Todo esto de acuerdo con los requerimientos exigidos por la norma INVIAS -13.

El presente informe consta de doce (12) páginas y no debe reproducirse sin la aprobación por escrito del laboratorio, los resultados contenidos en él se relacionan únicamente a la muestra ensayada.

Espero que todas las labores realizadas sean de su entera satisfacción, cualquier inquietud no dude en comunicarse con nosotros.

Recuerde que usted es lo más importante para nuestra empresa.

Atentamente,



NIT: 901002361-5

LABORATORIO DE SUELOS,

Ing. NESTOR HERNÁN SUAREZ QUINONES

Especialista en Ingeniería Vial y Pavimentos

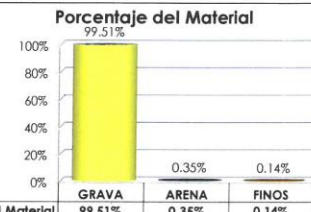
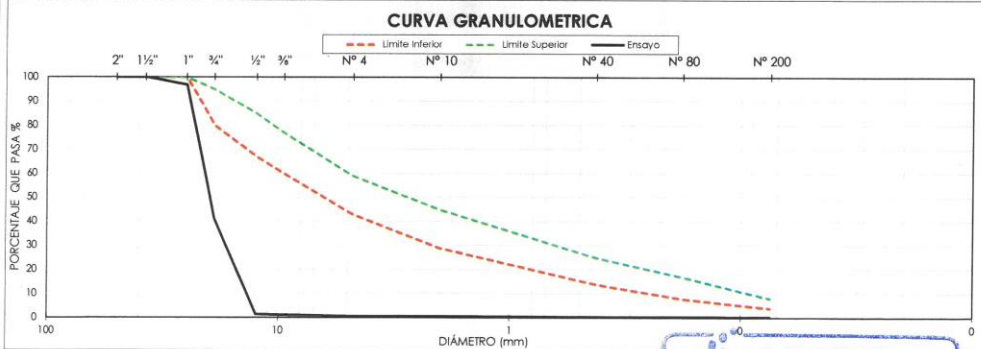
Especialista en Patología de la Construcción

Gerente NHSQ INGENIERÍA S.A.S

	LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS "PROFESIONALES FORJANDO PAÍS"		
	RESULTADOS DE LABORATORIO (MDC-25) COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.		
VERSIÓN	FECHA DE VIGENCIA	CÓDIGO:	CONSECUTIVO:
004	15/07/2019	JF-LAB-016	ASF-001-4841-20
ESTE DOCUMENTO ES VÁLIDO CON LA FIRMA Y SELLO EN ORIGINA DE NHSQ INGENIERÍA S.A.S			



Anexo 1. Dosificación teórica de agregados

 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS HACEMOS LO CORRECTO, CORRECTAMENTE																																																																																																																							
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS EXTRAÍDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS																																																																																																																							
ESPECIFICACIÓN/NORMA INV E-782-13/INV E 732-13	FECHA DE VIGENCIA 02/ENERO/2020	CÓDIGO F-LAB-017-V6	ESTE DOCUMENTO ES VÁLIDO CON LA FIRMA Y EL SELLO ORIGINAL DEL LABORATORIO NHSQ INGENIERÍA																																																																																																																				
PROYECTO: COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.		PLANTA:																																																																																																																					
DIRIGIDO A: YEISON JAVIER HERRERA MORENO	TIPO DE MATERIAL: AGREGADO GRUESO Tmax N 25.00 mm	DESTINO: INVESTIGACIÓN																																																																																																																					
NIT: 1121950286	O.T./MUESTRA N°: MAR-001-4841-20	FECHA DE MUESTREO: 10-sep-20																																																																																																																					
MUNICIPIO: VILLAVICENCIO	FECHA DEL ENTREGA: 21-sep-20																																																																																																																						
DEPARTAMENTO: META																																																																																																																							
SECTOR:																																																																																																																							
NORMA ART-450-13	BANDA GRANULOMÉTRICA MDC-25	TAMAÑO MÁXIMO DEL MATERIAL Pulg 1 - 1/2" mm 37.50	Porcentaje del Material  <table border="1"> <thead> <tr> <th>% del Material</th> <th>GRAVA</th> <th>ARENA</th> <th>FINOS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>99.51%</td> <td>0.35%</td> <td>0.14%</td> </tr> </tbody> </table>	% del Material	GRAVA	ARENA	FINOS		99.51%	0.35%	0.14%																																																																																																												
% del Material	GRAVA	ARENA		FINOS																																																																																																																			
	99.51%	0.35%		0.14%																																																																																																																			
MASA INICIAL (g) 7522.3 g	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL Pulg 1" mm 25.00																																																																																																																						
MASA FINAL (g) 7512.1 g																																																																																																																							
PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)																																																																																																																							
MASA HUMEDA (g) 1364.70	MASA SECA (g) 1359.40	MASA REC. (g) 142.10	% HUMEDAD 0.44%																																																																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">TAMIZ</th> <th rowspan="2">MASA RETENIDA (g)</th> <th rowspan="2">PORCENTAJE RETENIDO (%)</th> <th rowspan="2">PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)</th> <th rowspan="2">PORCENTAJE PASA (%)</th> <th colspan="2">PARAMETROS DE LA NORMA</th> </tr> <tr> <th>Pulgadas</th> <th>mm</th> <th>INFERIOR</th> <th>SUPERIOR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2"</td> <td>50</td> <td>0.0</td> <td>0.00%</td> <td>0.00</td> <td>100%</td> <td>100%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>1 - 1/2"</td> <td>37.5</td> <td>0.0</td> <td>0.00%</td> <td>0.00</td> <td>100%</td> <td>100%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>1"</td> <td>25</td> <td>237.8</td> <td>3.16%</td> <td>3.16</td> <td>97%</td> <td>100%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>3/4"</td> <td>19</td> <td>4170.9</td> <td>55.45%</td> <td>58.61</td> <td>41%</td> <td>80%</td> <td>95%</td> </tr> <tr> <td>1/2"</td> <td>12.5</td> <td>3009.1</td> <td>40.00%</td> <td>98.61</td> <td>1%</td> <td>67%</td> <td>85%</td> </tr> <tr> <td>3/8"</td> <td>9.5</td> <td>30.8</td> <td>0.41%</td> <td>99.02</td> <td>1%</td> <td>60%</td> <td>77%</td> </tr> <tr> <td>Nº4</td> <td>4.75</td> <td>37.1</td> <td>0.49%</td> <td>99.51</td> <td>0%</td> <td>43%</td> <td>59%</td> </tr> <tr> <td>Nº10</td> <td>2</td> <td>5.8</td> <td>0.08%</td> <td>99.59</td> <td>0%</td> <td>29%</td> <td>45%</td> </tr> <tr> <td>Nº40</td> <td>0.425</td> <td>6.5</td> <td>0.09%</td> <td>99.68</td> <td>0%</td> <td>14%</td> <td>25%</td> </tr> <tr> <td>Nº80</td> <td>0.18</td> <td>5.8</td> <td>0.08%</td> <td>99.75</td> <td>0%</td> <td>8%</td> <td>17%</td> </tr> <tr> <td>Nº200</td> <td>0.075</td> <td>8.3</td> <td>0.11%</td> <td>99.86</td> <td>0%</td> <td>4%</td> <td>8%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">FONDO</td> <td>10.2</td> <td>0.14%</td> <td>100.00</td> <td>0%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">TOTAL</td> <td>7522.3</td> <td>100.00%</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				TAMIZ		MASA RETENIDA (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASA (%)	PARAMETROS DE LA NORMA		Pulgadas	mm	INFERIOR	SUPERIOR	2"	50	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%	1 - 1/2"	37.5	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%	1"	25	237.8	3.16%	3.16	97%	100%	100%	3/4"	19	4170.9	55.45%	58.61	41%	80%	95%	1/2"	12.5	3009.1	40.00%	98.61	1%	67%	85%	3/8"	9.5	30.8	0.41%	99.02	1%	60%	77%	Nº4	4.75	37.1	0.49%	99.51	0%	43%	59%	Nº10	2	5.8	0.08%	99.59	0%	29%	45%	Nº40	0.425	6.5	0.09%	99.68	0%	14%	25%	Nº80	0.18	5.8	0.08%	99.75	0%	8%	17%	Nº200	0.075	8.3	0.11%	99.86	0%	4%	8%	FONDO		10.2	0.14%	100.00	0%			TOTAL		7522.3	100.00%				
TAMIZ		MASA RETENIDA (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASA (%)					PARAMETROS DE LA NORMA																																																																																																													
Pulgadas	mm					INFERIOR	SUPERIOR																																																																																																																
2"	50	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%																																																																																																																
1 - 1/2"	37.5	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%																																																																																																																
1"	25	237.8	3.16%	3.16	97%	100%	100%																																																																																																																
3/4"	19	4170.9	55.45%	58.61	41%	80%	95%																																																																																																																
1/2"	12.5	3009.1	40.00%	98.61	1%	67%	85%																																																																																																																
3/8"	9.5	30.8	0.41%	99.02	1%	60%	77%																																																																																																																
Nº4	4.75	37.1	0.49%	99.51	0%	43%	59%																																																																																																																
Nº10	2	5.8	0.08%	99.59	0%	29%	45%																																																																																																																
Nº40	0.425	6.5	0.09%	99.68	0%	14%	25%																																																																																																																
Nº80	0.18	5.8	0.08%	99.75	0%	8%	17%																																																																																																																
Nº200	0.075	8.3	0.11%	99.86	0%	4%	8%																																																																																																																
FONDO		10.2	0.14%	100.00	0%																																																																																																																		
TOTAL		7522.3	100.00%																																																																																																																				
CURVA GRANULOMÉTRICA 																																																																																																																							
OBSERVACIONES:																																																																																																																							
ELABORÓ: Ing. HAIVER DAVID OLIVO MELGAREJO Director Técnico		REVISÓ/ APROBÓ: Ing. NESTOR HERNÁNDEZ SUÁREZ QUINONES Gerente Técnico LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS ORIGINAL																																																																																																																					

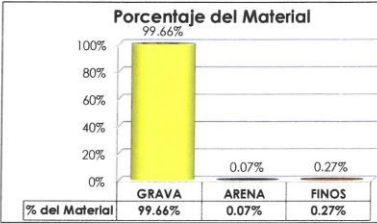
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS HACEMOS LO CORRECTO, CORRECTAMENTE			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS EXTRAÍDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS			
ESPECIFICACIÓN/NORMA INV E-782-13/INV E 732-13	FECHA DE VIGENCIA 02/ENERO/2020	CÓDIGO F-LAB-017-V6	ESTE DOCUMENTO ES VÁLIDO CON LA FIRMA Y EL SELLO ORIGINAL DEL LABORATORIO NHSQ INGENIERIA
PROYECTO: COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.		PLANTA:	
DIRIGIDO A:	YEISON JAVIER HERRERA MORENO	TIPO DE MATERIAL:	AGREGADO GRUESO Tmax N 19.00 mm
NIT:	1121950286	DESTINO:	DM MARSHALL
MUNICIPIO:	VILLAVICENCIO	O.T./MUESTRA N°:	MAR-004-3503-19
DEPARTAMENTO:	META	FECHA DE MUESTREO:	9-ago-19
SECTOR:		FECHA DEL ENTREGA:	15-ago-19

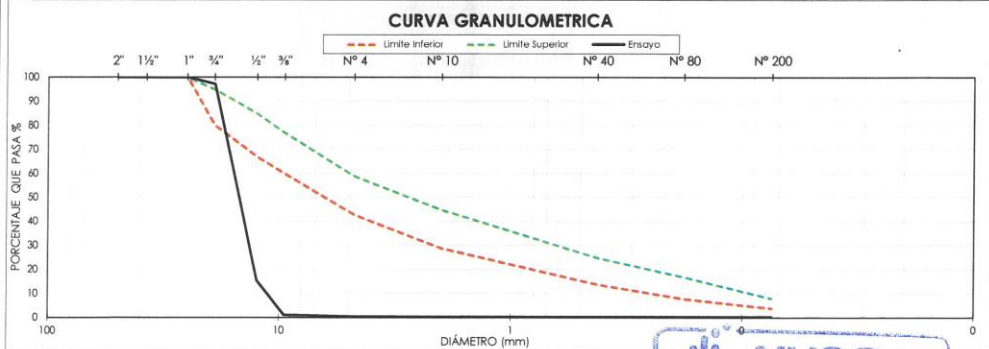
NORMA	BANDA GRANULOMETRICA	TAMAÑO MAXIMO DEL MATERIAL	Pulg	mm
ART-450-13	MDC-25		1"	25.00

MASA INICIAL (g)	7843.5 g	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	Pulg	mm
MASA FINAL (g)	7822.4 g		3/4"	19.00

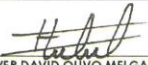
PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)			
MASA HUMEDA (g)	MASA SECA (g)	MASA REC. (g)	% HUMEDAD
1580.70	1577.30	236.00	0.25%

TAMIZ		MASA RETENIDA (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASA (%)	PARAMETROS DE LA NORMA	
Pulgadas	mm					INFERIOR	SUPERIOR
2"	50	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
1 1/2"	37.5	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
1"	25	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
3/4"	19	217.6	2.77%	2.77	97%	80%	95%
1/2"	12.5	6409.2	81.71%	84.49	16%	67%	85%
3/8"	9.5	1134.4	14.46%	98.95	1%	60%	77%
Nº4	4.75	56.0	0.71%	99.66	0%	43%	59%
Nº10	2	1.7	0.02%	99.69	0%	29%	45%
Nº40	0.425	1.0	0.01%	99.70	0%	14%	25%
Nº80	0.18	0.7	0.01%	99.71	0%	8%	17%
Nº200	0.075	1.8	0.02%	99.73	0%	4%	8%
FONDO		21.1	0.27%	100.00	0%		
TOTAL		7843.5	100.00%				





OBSERVACIONES:

ELABORO: 

Ing. HAIVER DAVID OLIVO MELGAREJO
Director Técnico



Ing. NESTOR HERNANDEZ QUINONES
Gerente Técnico

LABORATORIO DE SUELOS,
CONCRETOS Y PAVIMENTOS
ORIGINAL

LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS HACEMOS LO CORRECTO, CORRECTAMENTE			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS EXTRAÍDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS			
ESPECIFICACION/NORMA INV E-782 -13/INV E 732-13	FECHA DE VIGENCIA 02/ENERO/2020	CÓDIGO F-LAB-017-V6	ESTE DOCUMENTO ES VÁLIDO CON LA FIRMA Y EL SELLO ORIGINAL DEL LABORATORIO NHSG INGENIERIA
PROYECTO: COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.		PLANTA: 	
DIRIGIDO A: YEISON JAVIER HERRERA MORENO		TIPO DE MATERIAL: AGREGADO GRUESO Tmax N 12.50 mm	
NIT: 1121950286		DESTINO: DM MARSHALL	
MUNICIPIO: VILLAVICENCIO		O.T./MUESTRA N°: MAR-004-3503-19	
DEPARTAMENTO: META		FECHA DE MUESTREO: 9-ago-19	
SECTOR: 		FECHA DEL ENTREGA: 15-ago-19	

NORMA	BANDA GRANULOMETRICA	TAMAÑO MAXIMO DEL MATERIAL	Pulg	3/4"
ART-450-13	MDC-25		mm	19.00

MASA INICIAL (g)	5954.5 g	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	Pulg	1/2"
MASA FINAL (g)	5941.1 g		mm	12.50

PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)			
MASA HUMEDA (g)	MASA SECA (g)	MASA REC. (g)	% HUMEDAD
1750.50	1739.10	243.90	0.76%

% del Material	GRAVA	ARENA	FINOS
	99.34%	0.44%	0.23%

TAMIZ		MASA RETENIDA (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASA (%)	PARAMETROS DE LA NORMA	
Pulgadas	mm					INFERIOR	SUPERIOR
2"	50	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
1 - 1/2"	37.5	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
1"	25	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
3/4"	19	0.0	0.00%	0.00	100%	80%	95%
1/2"	12.5	91.6	1.54%	1.54	98%	67%	85%
3/8"	9.5	2130.6	35.78%	37.32	63%	60%	77%
Nº4	4.75	3692.8	62.02%	99.34	1%	43%	59%
Nº10	2	15.1	0.25%	99.59	0%	29%	45%
Nº40	0.425	5.6	0.09%	99.68	0%	14%	25%
Nº80	0.18	1.4	0.02%	99.71	0%	8%	17%
Nº200	0.075	4.0	0.07%	99.77	0%	4%	8%
FONDO		13.4	0.23%	100.00	0%		
TOTAL		5954.5	100.00%				

OBSERVACIONES:

ELABORO: *H. Melgarejo*
Ing. HAIVER DAVID OLIVO MELGAREJO
Director Técnico

REVISO Y APROBO: *N. Hernández*
Ing. NESTOR HERNÁNDEZ QUIRÓNES
Gerente Técnico

LABORATORIO DE SUELOS,
CONCRETOS Y PAVIMENTOS
ORIGINAL

LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS HACEMOS LO CORRECTO, CORRECTAMENTE							
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS EXTRAÍDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS							
ESPECIFICACION/NORMA		FECHA DE VIGENCIA		CÓDIGO		ESTE DOCUMENTO ES VÁLIDO CON LA FIRMA Y EL SELLO ORIGINAL DEL LABORATORIO NISO INGENIERIA	
INV E-782-13/INV E 732-13		02/ENERO/2020		F-LAB-017-V6			
PROYECTO:				PLANTA:			
COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.							
DIRIGIDO A:				TIPO DE MATERIAL:			
YEISON JAVIER HERRERA MORENO				ARENA DE PLANTA			
NIT:				DESTINO:			
1121950286				DM MARSHALL			
MUNICIPIO:				O.T./MUESTRA N°:			
VILLAVICENCIO				MAR-004-3503-19			
DEPARTAMENTO:				FECHA DE MUESTREO:			
META				9-ago-19			
SECTOR:				FECHA DEL ENTREGA:			
				15-ago-19			

NORMA	BANDA GRANULOMETRICA	TAMAÑO MAXIMO DEL MATERIAL	Pulg	mm
ART-450-13	MDC-25		3/8"	9.50

MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	Pulg	mm
3120.5 g	3068.1 g		Nº4	4.75

PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)			
MASA HUMEDA (g)	MASA SECA (g)	MASA REC. (g)	% HUMEDAD
1450.10	1429.80	234.00	1.70%

TAMIZ		MASA RETENIDA (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASA (%)	PARAMETROS DE LA NORMA	
Pulgadas	mm					INFERIOR	SUPERIOR
2"	50	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
1-1/2"	37.5	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
1"	25	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
3/4"	19	0.0	0.00%	0.00	100%	80%	95%
1/2"	12.5	0.0	0.00%	0.00	100%	67%	85%
3/8"	9.5	0.0	0.00%	0.00	100%	60%	77%
Nº4	4.75	528.0	16.92%	16.92	83%	43%	59%
Nº10	2	1057.1	33.88%	50.80	49%	29%	45%
Nº40	0.425	1116.4	35.78%	86.57	13%	14%	25%
Nº80	0.18	270.6	8.67%	95.24	5%	8%	17%
Nº200	0.075	96.0	3.08%	98.32	2%	4%	8%
FONDO		52.4	1.68%	100.00	0%		
TOTAL		3120.5	100.00%				

Porcentaje del Material

% del Material	Grava	Arena	Finos
	16.92%	81.40%	1.68%

CURVA GRANULOMETRICA

OBSERVACIONES:

ELABORO:

Ing. HAIVER DAVID OLIVO MELGAREJO

Director Técnico

REVISO Y APROBO:

Ing. NESTOR HERNÁN NÚÑEZ QUINONES

Gerente

LABORATORIO DE SUELOS,
CONCRETOS Y PAVIMENTOS
ORIGINAL

LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS HACEMOS LO CORRECTO, CORRECTAMENTE							
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS EXTRAÍDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS							
ESPECIFICACION/NORMA		FECHA DE VIGENCIA		CÓDIGO		ESTE DOCUMENTO ES VÁLIDO CON LA FIRMA Y EL SELLO ORIGINAL DEL LABORATORIO NISO INGENIERÍA	
INV E-782-13/INV E 732-13		02/ENERO/2020		F-LAB-017-V6			
PROYECTO:				PLANTA:			
COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.							
DIRIGIDO A:				TIPO DE MATERIAL:			
YEISON JAVIER HERRERA MORENO				FILLER [ARENA FINA]			
NIT:				DESTINO:			
1121950286				DM MARSHALL			
MUNICIPIO:				O.T./MUESTRA N°:			
VILLAVICENCIO				MAR-004-3503-19			
DEPARTAMENTO:				FECHA DE MUESTREO:			
META				9-ago-19			
SECTOR:				FECHA DEL ENTREGA:			
				15-ago-19			

NORMA	BANDA GRANULOMETRICA	TAMAÑO MAXIMO DEL MATERIAL	Pulg	3/8"
ART-450-13	MDC-25		mm	9.50

MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	Pulg	N°4
3495.9 g	3366.6 g		mm	4.75

PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)			
MASA HUMEDA (g)	MASA SECA (g)	MASA REC. (g)	% HUMEDAD
1320.80	1274.70	243.60	4.47%

TAMIZ		MASA RETENIDA (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASA (%)	PARAMETROS DE LA NORMA	
Pulgadas	mm					INFERIOR	SUPERIOR
2"	50	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
1 1/2"	37.5	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
1"	25	0.0	0.00%	0.00	100%	100%	100%
3/4"	19	0.0	0.00%	0.00	100%	80%	95%
1/2"	12.5	0.0	0.00%	0.00	100%	67%	85%
3/8"	9.5	0.0	0.00%	0.00	100%	60%	77%
N°4	4.75	312.7	8.94%	8.94	91%	43%	59%
N°10	2	907.5	25.96%	34.90	65%	29%	45%
N°40	0.425	1601.3	45.81%	80.71	19%	14%	25%
N°80	0.18	450.3	12.88%	93.59	6%	8%	17%
N°200	0.075	94.8	2.71%	96.30	4%	4%	8%
FONDO		129.3	3.70%	100.00	0%		
TOTAL		3495.9	100.00%				

Porcentaje del Material

% del Material	GRAVA	ARENA	FINOS
	8.94%	87.36%	3.70%

CURVA GRANULOMETRICA

OBSERVACIONES:

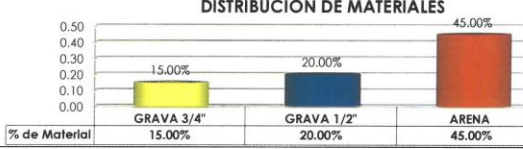
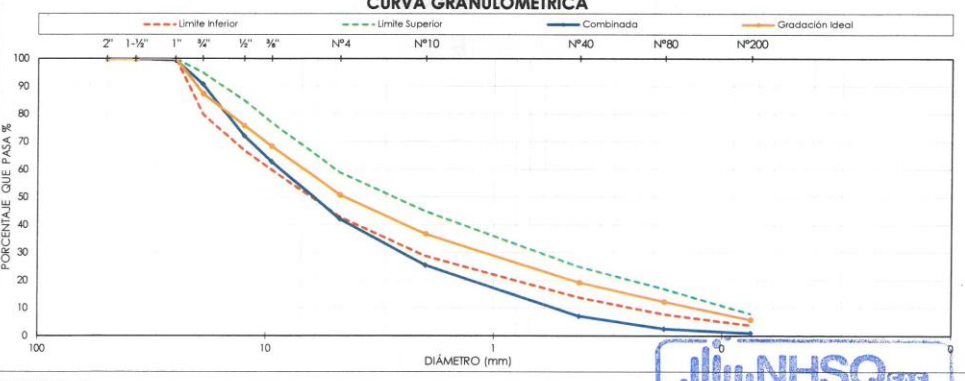
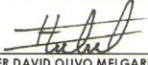
ELABORO:

Ing. HAIVER DAVID OLIVO MELGAREJO
Director Técnico

REVISO Y APROBO:

Ing. NESTOR HERNÁN SUÁREZ QUINONES
Gerente Técnico

LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS
ORIGINAL

		LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS HACEMOS LO CORRECTO, CORRECTAMENTE									
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS EXTRAÍDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS											
901047361-5		FECHA DE VIGENCIA		CÓDIGO	ESTE DOCUMENTO ES VÁLIDO CON LA FIRMA Y EL SELLO ORIGINAL DEL LABORATORIO NHSQ INGENIERIA						
ESPECIFICACIÓN/NORMA		02/ENERO/2020		F-LAB-017-V6							
INV E-782-13/INV E 732-13											
PROYECTO: COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.		PLANTA: -----									
DIRIGIDO A: YEISON JAVIER HERRERA MORENO		TIPO DE MATERIAL: COMBINACIÓN									
NIT: 1121950286		DESTINO: DM MARSHALL									
MUNICIPIO: VILLAVICENCIO		O.T./MUESTRA N°: MAR-004-3503-19									
DEPARTAMENTO: META		FECHA DE MUESTREO: 9-ago-19									
SECTOR: -----		FECHA DEL ENTREGA: 15-ago-19									
NORMA ART-450-13 BANDA GRANULOMETRICA MDC-25		DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES 									
TAMIZ		COMBINACIÓN EN FRIO DE AGREGADOS A MEZCLAR					CÁLCULO DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA IDEAL				
Pulg	mm	GRAVA "	GRAVA 3/4"	GRAVA 1/2"	ARENA LAVADA	FILLER (ARENA FINA)	GRADACIÓN FINAL	PARAMETROS DE LA NORMA ART-450-13		GRADACIÓN IDEAL	
% DE MEZCLADO		15.00%	15.00%	20.00%	45.00%	5.00%	100.0%	INFERIOR	SUPERIOR	PROMEDIO	
2"	50	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100%	100%	100%	
1-1/2"	37.5	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100%	100%	100%	
1"	25	96.8%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	99.5%	100%	100%	100%	
3/4"	19	41.4%	97.2%	100.0%	100.0%	100.0%	90.8%	80%	95%	88%	
1/2"	12.5	1.4%	15.5%	98.5%	100.0%	100.0%	72.2%	67%	85%	76%	
3/8"	9.5	1.0%	1.0%	62.7%	100.0%	100.0%	62.8%	60%	77%	69%	
N°4	4.75	0.5%	0.3%	0.7%	83.1%	91.1%	42.2%	43%	59%	51%	
N°10	2	0.4%	0.3%	0.4%	49.2%	65.1%	25.6%	29%	45%	37%	
N°40	0.425	0.3%	0.3%	0.3%	13.4%	19.3%	7.2%	14%	25%	20%	
N°80	0.18	0.2%	0.3%	0.3%	4.8%	6.4%	2.6%	8%	17%	13%	
N°200	0.075	0.1%	0.3%	0.2%	1.7%	3.7%	1.0%	4%	8%	6%	
CURVA GRANULOMÉTRICA 											
OBSERVACIONES: ELABORÓ:  Ing. HAIVER DAVID OLIVO MELGAREJO Director Técnico REVISÓ Y APROBÓ:  Ing. NESTOR HERNAN QUAREZ QUIRONES LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS ORIGINAL											

	LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS "PROFESIONALES FORJANDO PAÍS"		
	RESULTADOS DE LABORATORIO (MDC-25) COMPARACIÓN DE ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25 MODIFICADA CON AGREGADO DE GRANO DE CUACHO RECICLADO.		
VERSIÓN	FECHA DE VIGENCIA	CÓDIGO:	CONSECUTIVO:
004	15/07/2019	IF-LAB-016	ASF-001-4841-20
ESTE DOCUMENTO ES VALIDO CON LA FIRMA Y SELLO EN ORIGINA DE NHSQ INGENIERÍA S.A.S			



Anexo 2. Resultados de briquetas

[illegible]

INGENIEROS DE HERRAMIENTAS RECUBRIMIENTOS
LABORATORIO DE SUELOS
CONCRETOS Y PAVIMENTOS
ORIGINAL

LABORO:  Ing. HA-VER DAVID OLIVO MELGAREJO