

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería de Pavimentos

**Evaluación de las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica de alto módulo
modificada con grano de caucho reciclado (GCR)**

Ing. Fabián Alejandro Nández Cerón
Ing. Cira Piedrahita Céspedes

Director:
Ing. Henry Mauricio Muñoz Trochez

Para optar al título de Magister en Ingeniería de Pavimentos
Modalidad profundización

Popayán (Cauca)
2022

Popayán, 11 de abril de 2022

Señores

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

Comité de Programa Maestría en Ingeniería de Pavimentos

Facultad de Ingeniería Civil

Campus de Tulcán Bloque P1 – 2do piso, Oficina 216

Edificio Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas

Popayán, Cauca

Asunto: Entrega documento final proyecto de grado

Respetados Señores:

Adjunto a la presente el informe final del proyecto de grado titulado: “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DE ALTO MÓDULO MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)”, con el propósito de que sea remitido al comité evaluador para su revisión y demás tramites respectivos.

Agradeciendo de antemano la atención y colaboración prestada;

Cira Piedrahita Céspedes
Estudiante
C.C.: 32.686.737 de Barranquilla

Fabián Alejandro Nández Cerón
Estudiante
C.C.: 1.061.784.390 de Popayán

Vo. Bo.
Henry Mauricio Muñoz Trochez
Director de tesis
Profesor titular
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad del Cauca
Adjunto: informe en medio magnético con un anexo.

Índice

Introducción	9
1. Descripción del problema	10
2. Justificación	12
3. Hipótesis	14
3.1 Hipótesis positiva	14
3.2 Hipótesis nula	14
4. Objetivos	15
4.1 Objetivo general	15
4.2 Objetivos específicos	15
4.3 Alcance del proyecto	15
5. Marco referencial	16
5.1 Antecedentes	16
5.1.1 Internacionales	16
5.1.2 Antecedentes Nacionales	18
5.2 Referentes teórico- conceptuales	20
5.2.1 Los pavimentos flexibles	20
5.2.2 El comportamiento mecánico de los materiales	21
5.2.2.1 Elasticidad	21
5.2.2.2 Plasticidad	22
5.2.2.3 Viscosidad	22
5.2.3 Las mezclas asfálticas	23
5.2.3.1 Componentes de las mezclas asfálticas	24
5.2.3.2 Algunos aditivos modificadores para las mezclas asfálticas	27
5.2.4 Las propiedades dinámicas de las mezclas asfálticas	30
5.2.4.1 Módulo Resiliente	30
5.2.4.2 Módulo dinámico	31
5.2.4.3 La Fatiga	32
5.2.5 Las mezclas asfálticas de alto módulo MAM	32
6. Metodología	34
6.1 Etapas para el desarrollo del estudio	34

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS...

6.1.1 Etapa I. Revisión bibliográfica.....	35
6.1.2 Etapa II. Recolección de muestras de materiales	35
6.1.3 Etapa III. Ejecución de los ensayos de laboratorio	35
6.1.4 Etapa IV. Análisis, discusión, conclusiones y recomendaciones	36
7. Resultados	37
7.1 Caracterización de los materiales utilizados en las mezclas ensayadas	37
7.1.1 Caracterización del agregado pétreo	37
7.1.2 Caracterización de los cementos asfálticos	40
7.2 Diseño de la mezcla asfáltica	44
7.3 Determinación del módulo resiliente y fatiga	45
7.3.1 Módulo resiliente	45
7.3.2 Determinación de las leyes de fatiga.....	47
8. Análisis de resultados	50
8.1 De la caracterización de los materiales	50
8.2 De la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica	53
8.3 De los parámetros de módulo resiliente y fatiga.....	56
9. Conclusiones.....	59
10. Recomendaciones	63
11. Referencia bibliográfica.....	66

Índice de tablas

Tabla 1. Hipótesis positiva.....	14
Tabla 2. Hipótesis nula	14
Tabla 3. Caracterización del cemento asfáltico respecto a la resistencia.	38
Tabla 4. Caracterización del cemento asfáltico	41
Tabla 5. Resumen de los parámetros estáticos obtenidos	44
Tabla 6. Módulo resiliente mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) cemento Asfáltico Tipo V modificado	45
Tabla 7. Reporte de ensayo de fatiga mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) cemento asfáltico Tipo V modificado.	47
Tabla 8. Ensayo de fatiga flexión en 4 puntos	48
Tabla 9. Esfuerzo y deformaciones esperada para el 1.000.000 ciclo de falla en las mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) cemento asfáltico Tipo V modificado (temperatura del ensayo 20°C y para una frecuencia de 30Hz).....	48

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de los pavimentos flexibles	20
Figura 2. Curva de elasticidad	21
Figura 3. Curva del comportamiento plástico.....	22
Figura 4. Viscosidad	23
Figura 5. Esquema coloidal de Pfeiffer.....	25
Figura 6. Estructura fisicoquímica del asfalto	25
Figura 7. Efecto del Betún (asfalto)modificado con polímero sobre la rigidez y temperatura.....	26
Figura 8. Estructura metodológica.....	34
Figura 9. Gráficas módulo resiliente mezclas asfálticas y a las diferentes frecuencias de carga (2.5Hz, 5.0Hz y 10.0Hz)	46
Figura 10. Gráficas ensayo de fatiga mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) cemento asfáltico Tipo V modificado, ensayadas a una temperatura de 20°C y a los diferentes niveles de esfuerzo utilizados fueron 120, 150, 200, 250, 300 kpa	49

Resumen

El creciente aumento del tráfico vehicular y los cambios ambientales registrados en los últimos años exige mezclas asfálticas de alta resistencia y durabilidad, lo que ha llevado a los investigadores a experimentar con diversos materiales, donde el grano de caucho reciclado (GCR) es uno de los más representativos, debido a sus grandes beneficios en el fortalecimiento de estas mezclas. En este sentido, el presente estudio tuvo como objetivo general, evaluar las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica de alto modulo (MAM-25) modificada con dicho material, una alternativa para contribuir a la solución de problemas mecánicos en los pavimentos y a la mitigación de los impactos ambientales causados por la disposición a cielo abierto y la quema indiscriminada de llantas usadas. Por ello, se recurre a la metodología cuantitativa de carácter experimental aplicada a nivel de laboratorio, soportado en el método Marshall y la normatividad colombiana para la construcción de pavimentos flexibles, lo cual permitió la caracterización de los materiales, la fórmula de trabajo y la realización de las pruebas de desempeño de la MAM modificada con y sin GCR, respecto a los parámetros módulo resiliente y fatiga. Los resultados mostraron que, aunque las mezclas diseñadas tienen altos valores de flujo, presentan una estabilidad superior en las MAM convencionales sin GCR, dado que con la adición de un 3% de GCR el módulo dinámico, superó los 10.000 MPa a 20 °C que exigen las especificaciones del INVIAS 2013.

Palabras Claves: mezcla asfáltica, grano de caucho reciclado (GCR), ensayo, módulo resiliente, fatiga

Abstract

The increasing increase in vehicular traffic and the environmental changes registered in recent years demand asphalt mixtures of high strength and durability, which has led researchers to experiment with various materials, where recycled rubber grain (GCR) is one of the most representative, due to its great benefits in strengthening these mixtures. In this sense, the general objective of this study was to evaluate the dynamic properties of a high modulus asphalt mixture (MAM-25) modified with this material, an alternative to contribute to the solution of mechanical problems in the pavements and to the mitigation of the environmental impacts caused by the open-air arrangement and the indiscriminate burning of used tires. Therefore, the quantitative methodology of an experimental nature applied at the laboratory level is used, supported by the Marshall method and the Colombian regulations for the construction of flexible pavements, which allowed the characterization of the materials, the work formula and the performance tests of the modified MAM with and without GCR, regarding the resilient module and fatigue parameters. The results showed that, although the designed mixtures have high flow values, they present a higher stability in conventional MAM without GCR, since with the addition of 3% of GCR the dynamic module, exceeded the 10,000 MPa at 20 °C required by the specifications of INVIAS 2013.

Keywords: asphalt mix, recycled rubber grain (GCR), test, resilient modulus, fatigue.

Introducción

El creciente tránsito vehicular sumado las inclemencias climáticas de los últimos tiempos, exige a los países desarrollar pavimentos de alta calidad, esto ha llevado a integrar al uso de diversos aditivos o modificadores en la fabricación de las mezclas asfálticas, para obtener un producto que responda a tales exigencias acompañados de un costo asequible. En este sentido, el Grano de Caucho Reciclado (GCR) es uno de los materiales más importantes en la actualidad, puesto que su integración en dichas mezclas podría proporcionar amplios beneficios a nivel de resistencia y durabilidad, además de aportar con el cuidado del medio ambiente.

Cabe mencionar que en Colombia no se cuenta con suficiente información sobre las propiedades dinámicas de las mezclas de alto módulo adicionadas con GCR, lo que despertó el interés del presente estudio, el cual se estructura de la siguiente manera: se da inicio con la caracterización de los materiales pétreos y los cementos asfálticos, posteriormente, se realiza el diseño de la fórmula de trabajo y por último se efectúan las pruebas de desempeño de acuerdo con las exigencias establecidas en las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras expedida por el Instituto Nacional de Vías – Ministerio de Transporte – República de Colombia (2013).

Los hallazgos encontrados en el estudio sientan un precedente para la utilización de GCR en mezclas asfálticas de alto módulo, pueden mejorar sus propiedades físico-mecánicas, en la medida que proporciona un mayor rango de estabilidad, un aumento progresivo de su resistencia al desgaste.

1. Descripción del problema

La infraestructura vial es un aspecto relevante en el crecimiento y desarrollo de un país, por ser el medio más utilizado para la movilización de las materias primas y mercancías, lo que hacen de este un sistema generador de valor, en un escenario global que exige una mayor optimización de las cadenas logísticas (Durango, 2016). En Colombia, por ejemplo, el 80% de carga se transporta por carretera y solo un 20% por otros medios como el acuático y el aéreo, lo que ha llevado al gobierno nacional a desarrollar una serie de mecanismos para fortalecer la infraestructura, de cara a insertarse en la dinámica global estipulada en los tratados de libre comercio (Rodríguez, 2013).

Un problema específico en materia vial en Colombia se focaliza en las vías de alto volumen de tránsito, por presentar limitaciones en su capacidad de carga, toda vez que la construcción de capas estructurales convencionales, integran materiales con características insuficientes para enfrentar a los desafíos actuales como el incremento del flujo vehicular, el calentamiento global, la intensidad de lluvias entre otros fenómenos naturales que contrastan con las difíciles condiciones geográficas en algunas regiones del país. Esta situación ha ocasionado un aumento en los gastos de mantenimiento de la red vial, y ha llevado a explorar alternativas que buscan incorporar nuevos materiales para el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a pavimentos con el fin de proporcionar mayor durabilidad y así lograr gran beneficio a los bienes o capitales públicos, al medio ambiente y al ecosistema en general.

En este sentido, la fabricación de mezclas asfálticas modificadas con GCR, ha sido un tema de gran interés en los últimos años en el país, gracias a sus ventajas en materia de durabilidad, asociadas a su alta resistencia al agrietamiento de la capa de rodadura, debido entre otras cosas a que ofrecen mayor flexibilidad a baja temperaturas, menor plasticidad en altas temperaturas y menor susceptibilidad térmica. Así mismo, aportan grandes beneficios ambientales, toda vez que, permite la reutilización de llantas fuera de uso que hoy por hoy constituyen un foco de contaminación (Días y Castro, 2017).

Se estima que en Colombia se desechan alrededor de 5.000.000 llantas al año como consecuencia del alto flujo vehicular, siendo Bogotá la ciudad que más contribuye a la contaminación por este rubro, pues según la Secretaría de Ambiente, anualmente, en la capital se arrojan a cielo abierto alrededor de 750.000 unidades, dando lugar a diversos focos de

contaminación (Malaver, 2014). Frente a esta realidad, se viene realizando importantes esfuerzos para aprovechar este desecho como aditivo de mezclas asfálticas, encaminadas a mejorar la vida útil de los pavimentos y a su vez, contribuir con el cuidado del medio ambiente.

El uso del GCR en ligante para la fabricación de las Mezclas Asfálticas de Alto Módulo, MAM, es un tema poco investigado en Colombia, debido entre otras cosas a la falta de estudios contextualizados en el territorio nacional que documenten su funcionamiento y aplicabilidad, acorde con las condiciones económicas, geográficas y ambientales de las diferentes regiones del país. Por consiguiente, el Instituto Nacional de Vías- INVIAS (2013), dio vía libre su utilización, solo en casos excepcionales y con la debida justificación (IDU ET 2011 versión 3.0). Teniendo en cuenta las situaciones antes expuestas, surge la iniciativa de llevar a cabo una investigación experimental a nivel de laboratorio, para documentar las propiedades dinámicas de las MAM con GCR adicionado, haciendo énfasis en el módulo dinámico y resistencia a la fatiga, con el fin de contribuir a la generación del conocimiento científico que impulse la aplicación de dicho material en la infraestructura vial.

2. Justificación

Las MAM se caracterizan por tener un módulo de rigidez superior al de las mezclas convencionales, debido a que deben soportar mayores cargas vehiculares, una situación que se hace cada vez más compleja con los cambios ambientales registrados en los últimos años. Por esta razón, la formulación y el desarrollo de mezclas a partir del uso de aditivos como el GCR, exige un esfuerzo investigativo de las propiedades mecánicas, toda vez que de su estas últimas depende en gran medida el éxito de la infraestructura en su fase operativa (Díaz y Castro, 2017).

A partir de esta perspectiva, el presente estudio se considera importante porque describe la influencia de la adición del GCR en la respuesta de desempeño de las MAM-25 y evalúa la factibilidad técnica de su implementación, en aspectos como el módulo resiliente y fatiga, lo cual representa otra alternativa para la construcción y/o el mejoramiento de las vías de alto flujo vehicular. Lo anterior permitirá entre otras cosas documentar los procesos de diseño y desarrollo de este tipo de mezclas, en aras de contribuir a la complementación de la normatividad, de tal manera que los contratistas viales cuenten con un referente que les permita implementarlas en la construcción de infraestructura vial.

Así mismo, desde el punto de vista ingenieril, los beneficios a corto plazo de este tipo de mezcla, sería la alta recuperación elástica de la deformación bajo la acción de las cargas vehiculares y su mayor capacidad adherente con los neumáticos, mientras que a largo plazo se evidenciaría en la prolongación de la vida útil de la infraestructura y por ende una reducción de los costos en el mantenimiento de la misma (Contreras y Granados, 2008).

En este sentido, la iniciativa expuesta también tiene un impacto en la gestión pública, en la medida que constituye una opción viable para mejorar la movilidad vial, dado que, en Colombia, un 80% del transporte empresarial se mueve por carreteras hacia los puertos y zonas fronterizas, beneficiando sectores económicos, como el agropecuario, minero y petrolero especialmente (El País, 2013).

Desde el punto de vista ambiental, el estudio responde a la necesidad de contar con otras alternativas para disminuir su impacto generado por las llantas usadas, dado que las quemadas a cielo abierto generan emisiones de material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), los cuales disminuyen la calidad del aire (Colfecar, 2015). Así mismo, cuando son abandonadas en los

espacios públicos se convierten en focos para la proliferación de vectores patógenos que afectan la salud de las personas (Bohórquez y Ballesteros, 2016).

En este sentido, el estudio aporta desde lo académico, toda vez que se encuentra alineado con los propósitos de la Universidad del Cauca, dado que hace parte de la línea de investigación caracterización de nuevos materiales Viales del grupo de investigación de Geotecnia Vial y Pavimentos – GEPAV, donde se abordan temáticas relacionadas con los materiales bituminosos, la evaluación de estructuras de pavimento flexible y la caracterización de desempeño de las mezclas.

En complemento, el presente estudio, puede tener un impacto social, en la medida que estimula el reciclaje de las llantas y la transformación de estas en GCR integrando a recicladores e industriales, contribuyendo oportunamente a la generación de empleos y por ende al desarrollo económico regional, para hacer frente a las dificultades económicas derivadas de la crisis de salud actual.

3. Hipótesis

3.1 Hipótesis positiva

La mezcla asfáltica de alto módulo modificada con grano de caucho reciclado presenta mejor desempeño en comparación con las mezclas de alto módulo convencional (sin GCR), respecto a los parámetros de módulo y la resistencia a la fatiga.

Tabla 1

Hipótesis positiva

Variable independiente	Variable dependiente
La mezcla asfáltica de alto módulo modificada con GCR.	Presenta mejor desempeño dinámico, que las mezclas asfálticas de alto modulo convencional (Cemento asfáltico Tipo V sin GCR).

Nota. La tabla presenta la hipótesis positiva del estudio. Fuente. Elaboración Propia

3.2 Hipótesis nula

Tabla 2

Hipótesis nula

Variable independiente	Variable dependiente
La mezcla asfáltica de alto módulo modificada con GCR.	No presenta mejor desempeño dinámico, que las mezclas asfálticas de alto modulo convencionales (Cemento asfáltico Tipo V sin GCR).

Nota. La tabla presenta la hipótesis nula del estudio. Fuente. Elaboración Propia

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades dinámicas de las mezclas asfálticas de alto módulo modificadas con y sin grano de caucho reciclado (GCR).

4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales utilizados en la fabricación de mezclas asfálticas de alto modulo modificado con y sin grano de caucho reciclado.
- Definir la fórmula de trabajo y el diseño de la mezcla asfáltica de alto modulo modificadas con y sin GCR, que permita obtener las propiedades dinámicas requeridas por las especificaciones para este tipo de mezclas de alto modulo con y sin grano de caucho reciclado.
- Determinar los parámetros de desempeño: módulo dinámico y fatiga de la mezcla asfálticas de alto modulo modificada con y sin GCR, partir de ensayos efectuados a nivel laboratorio.

4.3 Alcance del proyecto

El alcance del presente estudio abarca la ejecución de los ensayos en laboratorio para las mezclas asfálticas de alto modulo modificada con grano de caucho reciclado, haciendo énfasis en dos parámetros específicos como: módulo dinámico y la fatiga, encaminado a contribuir con la generación de conocimiento de gran utilidad para su aplicación en campo de los pavimentos.

5. Marco referencial

5.1 Antecedentes

Los estudios sobre las mezclas asfálticas modificadas con GCR han tenido un avance significativo en los últimos años, debido a la complejidad teórica y conceptual que encierra esta temática, lo que ha a vez ha despertado el interés de muchos investigadores. Por ende, es de gran importancia citar algunos autores que se han venido destacando en el ámbito nacional e internacional, en la medida que sus aportes constituyen la columna vertebral para el análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación.

5.1.1 Internacionales

Razmi (2018), en uno de sus estudios realizado en Estados Unidos, tuvo como objetivo determinar la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica modificada con CGR, mediante el análisis de 3 tipos de mezclas: una sin ningún porcentaje de GCR denominada patrón y otras dos con una adición del 3%. Los ensayos comprendieron pruebas de flexión semicircular agrietadas, se calcularon los factores de estrés, entre otros. El estudio establece que la mezcla adicionada con GCR presenta mayor resistencia al agrietamiento por fatiga a bajas temperaturas, en comparación con la muestra patrón, debido a que son más flexibles a baja temperaturas, menos plásticas ante altas temperaturas y por ende una disminución de susceptibilidad térmica. Sin embargo, al necesitar mayores temperaturas de mezclado y compactación, demandan más energía en comparación con la mezcla de referencia.

Kalgin y Strokin (2016) en su estudio desarrollado en Rusia, tuvieron como objeto analizar el comportamiento por fatiga de una mezcla asfáltica para alto flujo vehicular. Para ello se realizan pruebas a nivel de laboratorio de dos mezclas asfálticas, una modificada con cutback (divinil-estireno termo elastolayer) y otra con cutback (caucho de estireno sintético). Con el desarrollo del estudio se logra establecer que la segunda mezcla ofrece mayores beneficios a nivel de resistencia y durabilidad, puesto que la vida útil puede aumentar 4 años, respecto al tiempo que duran las mezclas asfálticas convencionales, siempre y cuando la vía cuente con un adecuado sistema de drenaje.

Mashaan et al. (2014) en su estudio desarrollado en Malasia, tuvo como finalidad evaluar el efecto del modificador de caucho granulado (MCG) sobre las propiedades de rigidez y fatiga de las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA) en condiciones óptimas. Para ello se utilizó un contenido

de aglutinante distribuido en cuatro niveles de modificación: al 6%, 8%, 10% y 12% de MCG, mediante la realización de pruebas de tracción directa, fluencia de carga repetida, y resistencia a la fatiga. Esta última prueba se realizó con base al método tracción indirecta, sometiéndola a tres niveles de estrés con valores de 200, 300 y 400 kPa. El estudio establece que las SMA reforzadas con MCG, albergan beneficios significativos, especialmente en la resistencia a la fatiga, en comparación con las mezclas sin CRM. Adicionalmente, se obtuvo un coeficiente de correlación más alto entre la fatiga y módulo resiliente en comparación con la deformación permanente, un aspecto positivo en la medida que, a mayor durabilidad de la capa de rodadura, menores son los costos de mantenimiento vial.

Karacasu et al. (2014) en su estudio desarrollado en Turkia, tuvo como finalidad analizar las características reológicas de una mezcla asfáltica modificado con caucho (RMA) en condiciones de carga estática y dinámica, mediante la realización pruebas de columna resonante para evaluar el módulo de corte y los valores de amortiguación. Así mismo, se realizaron pruebas de tensión-deformación, para pronosticar la capacidad de soporte a la carga de tráfico. El estudio establece que la modificación del caucho aumenta la rigidez y la relación de amortiguación de la mezcla, lo que lo convierte en un material muy atractivo para su uso en Construcción vial, dado que otorga mayor durabilidad al pavimento, disminuye las vibraciones generadas por la carga del tráfico y por ende reduce el daño por el esfuerzo.

Souliman y Annie (2016) en un estudio realizado en Estados Unidos, tuvo como objetivo general analizar el impacto del caucho agregado en los atributos mecánicos, mecanicistas y económicos de las mezclas asfálticas, mediante un programa de pruebas de laboratorio en un sistema convencional y de caucho asfáltico (AR) clasificado con huecos. Para ello se realizaron pruebas de fatiga con control de deformación, acorde al protocolo de la Asociación Estadounidense de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO), resultados que fueron complementados con un análisis mecanicista con la ayuda del software 3D-Movejunto.

Los resultados obtenidos indican que las mezclas de asfalto modificado AR presenta mayor resistencia a la deformación por fatiga en comparación con las mezclas convencionales, debido entre otras cosas a que disminuye la susceptibilidad térmica. De igual manera, se estableció que la implementación de este tipo de mezclas implica menores costos de mantenimiento y por ende una

mayor optimización de presupuesto en la infraestructura vial en comparación con la mezcla convencional de HMA.

Nguyen y Tran (2018) en uno de sus estudios desarrollado en Jordania, tuvo como objetivo principal, analizar el comportamiento del GCR en una mezcla asfáltica de alto módulo, adicionando porcentajes con valores del 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6% y de 10%, 20%, 30% y 40%. Para ello, se recurre a la Prueba Marshall para mezcla asfáltica en caliente (HMA), para evaluar las propiedades respecto al flujo, estabilidad, volumen, densidad, porcentaje de vacíos de aire y vacíos en agregado mineral, con base a 72 especímenes.

Los estudios demostraron que el GCR tiene efectos benéficos para el fortalecimiento de la mezcla, dado que aumentando el flujo Marshall, mejoró la estabilidad y disminuyendo la densidad aparente. Con estos resultados se evidencia que la incorporación del GCR, constituye una opción viable para alargar la vida útil de los pavimentos, pero al mismo tiempo aprovechar la reutilización de llantas en desuso.

Orellana (2019) desarrollo un estudio en Ecuador, el cual tuvo como finalidad estudiar la incorporación de grano de caucho reciclado (GCR) a una mezcla asfáltica, encaminada al aprovechamiento de los residuos de llantas usadas. Para ello, se recurre al método de Marshall, el cual inicia con la caracterización de los materiales, luego se preparan dos tipos de mezclas una convencional y otra modificada con GCR. Después de realizar ensayos a 68 muestras diferentes, se pudo determinar que la mezcla con el 6.56% de asfalto, y con el 10% de grano de caucho fue la que más se ajustó a las especificaciones técnicas, por lo que se considera viable para la construcción de pavimentos, en la medida que aporta beneficios mecánicos y promueve el reciclado de llantas fuera de uso.

5.1.2 Antecedentes Nacionales

Alarcón et al. (2019) en su estudio, tuvo como objetivo general determinar la viabilidad de uso del GCR en la fabricación de mezclas con agregados de la región de Tunja, con el fin de contribuir al fortalecimiento de la vida útil de la estructura vial y también promover una mejor disposición de las llantas fuera de uso. El estudio inicia con la caracterización de los materiales; seguidamente se efectúa el diseño de la mezcla convencional y de la mezcla modificada con GCR, mediante la utilización de los métodos Marshall y Ramcodes. Asimismo, se calculó el módulo dinámico, acompañado de un análisis técnico, ambiental y económico.

El estudio establece que las mezclas modificadas con GCR, cumplen con los requisitos mínimos exigidos por las normas expuestas por el Instituto Nacional de Vías, dado que el óptimo de asfalto fue de 5,8%, el parámetro de flujo se ubicó en 4,8, la estabilidad en 11.200, y los vacíos de aire en 5.0. Estos resultados evidencian que este tipo de mezcla pueda ser utilizadas en la construcción de infraestructura en la región sujeta a estudio.

Pineda y Reyes (2012) en su estudio realizado en Bogotá, tuvo como finalidad analizar el comportamiento geológico de una mezcla asfáltica modificada con GCR y aditivo tipo polímero, en porcentajes con valores del 10%, 14% y 18%, a fin de evidenciar las ventajas y desventajas en comparación con el mezcal convencional, pero a su vez impulsar la reutilización de las llantas usadas y evitar la contaminación por la disposición inadecuada de las mismas. El estudio concluye que la mezcla agregada con el 18% es la que presenta mayor estabilidad y flujo a medida que se aumenta la adición del porcentaje de GCR, superando en un 64% de la mezcla convencional. Adicionalmente esta mezcla promueve mayor adherencia sobre el agregado pétreo.

Martínez et al. (2018) en su estudio desarrollado en Bogotá, tuvo como finalidad describir la aplicación de una mezcla asfáltica modificada con GCR y otra modificada con polímeros SBS y SBR, a partir de las estepas establecidas por e IDU. Para ello se da inicio con la evaluación de las propiedades mecánicas y posteriormente realizaron pruebas dinámicas entre ellas la resistencia a la fatiga.

El estudio concluye que las mezclas adicionadas con GCR pueden presentar un buen desempeño en la medida que los resultados obtenidos se ajustan a las exigencias mínimas establecidas en la normativa de referencia. Así mismo, se determina que la utilización de esta mezcla implica menores costos de mantenimiento de la infraestructura en comparación a las adicionadas con polímeros, SBS y SBR, lo que representa un ahorro económico a largo plazo en el sostenimiento de la vía. De igual manera, se aclara que, desde el punto de vista social, estas mezclas promueven el reciclaje de las llantas usadas, contribuyendo oportunamente a la generación de empleo en la recolección y trituración del material.

Los antecedentes citados anteriormente, son de gran relevancia para el presente estudio, dado que presentan importantes elementos teórico-conceptuales sobre la adición del GCR en las mezclas asfálticas, las cuales, en su mayoría, cumple con los parámetros establecidos en las

normativas vigentes, entre ellas la resistencia a la fatiga, a la deformación, al ahuellamiento, entre otros, que evidencian su viabilidad para ser aplicada en la construcción de infraestructura.

Sin embargo, cabe aclarar que estos estudios no evidencian la utilización del GCR en las mezclas de alto módulo, lo cual evidencia un vacío existen en el conocimiento que respalde la estructuración de la normativa al respecto. Es aquí donde surge el interés de realizar el presente estudio, el cual busca contribuir en la construcción teórico y conceptual en el ámbito de la infraestructura vial y el cuidado del medio ambiente.

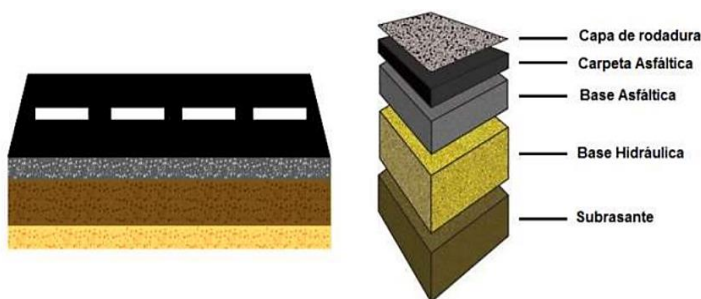
5.2 Referentes teórico- conceptuales

5.2.1 Los pavimentos flexibles

Los pavimentos para carreteras y caminos son estructuras compuestas con capas de distintos materiales colocadas horizontalmente, que tiene características especiales, cuya función primordial es la de soportar las cargas del tránsito y los efectos de los agentes atmosféricos como las altas o bajas temperatura y la precipitación entre otros. Al respecto Coria et al. (2018), manifiesta que dichos pavimentos presentan estructuras multicapa las cuales trabajan de manera conjunta para prestar un servicio seguro y cómodo para el usuario como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Estructura de los pavimentos flexibles



Nota. La figura representa la estructura de los pavimentos flexibles. Fuente. Método AASHTO para pavimento flexible (2012)

Uno de los objetivos más importante de los pavimentos flexibles, es ofrecer buena seguridad para la rodadura de vehículos, mediante la trasmisión y distribución de las cargas del tránsito, así como la protección de las capas inferiores frente a la acción del agua de lluvia u otras fuentes. En este sentido, es de vital importancia la utilización de materiales adecuados acorde con las normativas establecidas, cuya clasificación se puede presentar en tres grupos:

- Materiales granulares o no tratados (gravas o rocas trituradas).
- Materiales asfálticos (carpetas asfálticas, bases negras en frío o en caliente, etc.) (Ver figura 1).
- Materiales cementados (concreto Portland o bases tratadas con cemento).

5.2.2 El comportamiento mecánico de los materiales

Para alcanzar un óptimo funcionamiento de la mezcla asfáltica, es necesario que los materiales presenten algunas propiedades respecto a variables como Elasticidad, Plasticidad, Viscosidad, de tal manera que garanticen el funcionamiento adecuado de la infraestructura y por consiguiente es oportuno definir estos conceptos como se expone a continuación.

5.2.2.1 Elasticidad. De acuerdo con la Teoría de la Elasticidad de Hooke, si el material es elásticamente lineal, entonces la relación entre el esfuerzo vertical σ_z y la deformación vertical, ϵ_z , será constante, definiendo así el coeficiente de elasticidad o módulo de Young (E). (Ver figura 2). A esta relación se le conoce como ley de Hooke, y para el caso unidimensional se expresa con la siguiente ecuación

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad (1)$$

Donde:

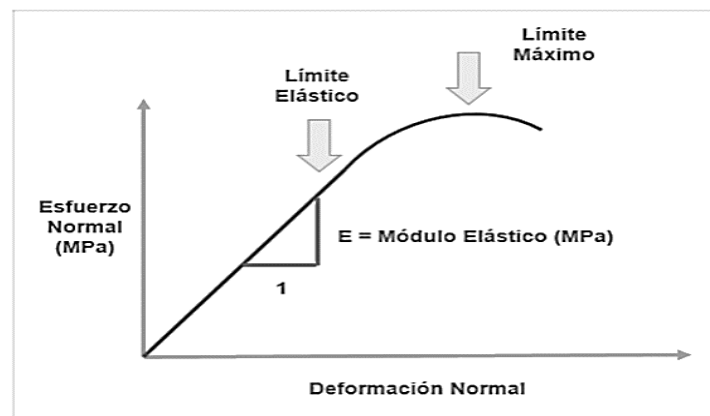
E: módulo de elasticidad

σ_z : esfuerzo vertical

ϵ_z : Deformación vertical

Figura 2

Curva de elasticidad



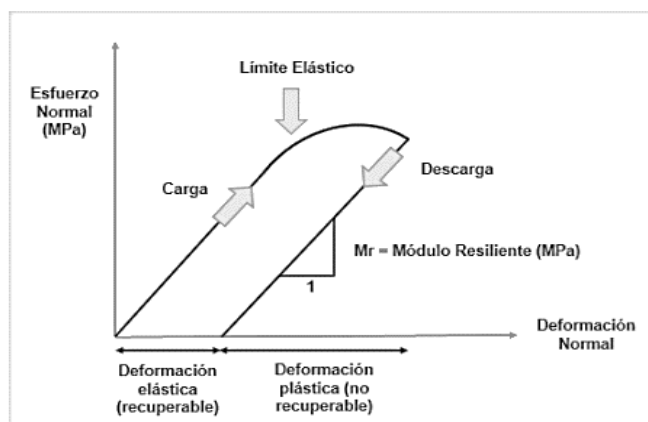
Nota. La figura representa la curva de elasticidad de una mezcla asfáltica. Fuente: Coria et al. (2018)

Según la figura 2, si la carga continúa más allá del límite elástico, algunos materiales experimentan una reducción de la rigidez hasta el límite de rendimiento y, por tanto, el esfuerzo máximo que un material puede resistir también se conoce como un límite elástico.

5.2.2.2 Plasticidad. La plasticidad hace referencia al comportamiento plástico que sufren los materiales al aplicar una carga, un fenómeno que se refleja cuando el esfuerzo aplicado alcanza una cierta magnitud. Por ello, si la carga aplicada supera el límite elástico se genera una deformación plástica no recuperable, un comportamiento elastoplástico utilizado para modelar materiales bajo repetición de carga y obtener su correspondiente Módulo Resiliente (MR). Cabe mencionar que, con cada ciclo de carga, se acumula una deformación plástica permanente en el material después de varios ciclos de carga repetidos (Londoño, 1991). (Ver figura 3).

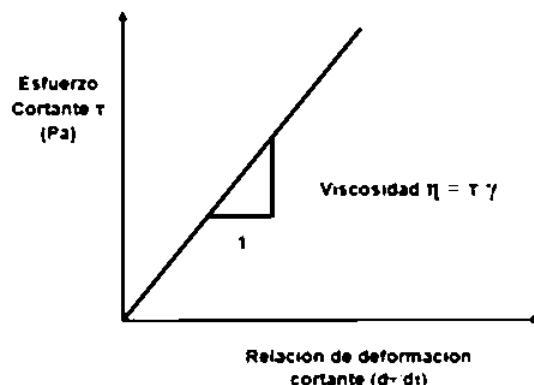
Figura 3

Curva del comportamiento plástico



Nota. La figura representa la curva del comportamiento plástico de una mezcla asfáltica. Fuente: Coria et al. (2018)

5.2.2.3 Viscosidad. Otra característica de los materiales asfálticos es su comportamiento viscoelástico, es decir que, a bajas temperaturas, se comporta rígido y elástico, mientras que en altas temperaturas se convierte en un fluido Newtoniano. Por ello, para comprender el comportamiento de deformación y flujo de estos materiales es necesario revisar su reología, además de modelar dichos materiales, por ejemplo: la medición de la viscosidad dinámica requiere de la aplicación de esfuerzos cortantes midiendo la tensión y el tiempo de respuesta del material (Londoño, 1991). En este sentido, la pendiente de esta relación es la viscosidad de los materiales, (Ver figura 4).

Figura 4*Viscosidad*

Nota. La figura representa la viscosidad de una mezcla asfáltica. Fuente: Coria et al. (2018)

5.2.3 Las mezclas asfálticas

De acuerdo con la Norma NC MT-4 05 003/02, una mezcla asfáltica es un material obtenido mediante la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico y uno pétreo. Por su parte, Yepes (2014) manifiesta que una mezcla asfáltica, es un aglomerado que resulta de la combinación de un ligante hidrocarbonato y agregados minerales pétreos, donde las porciones de estos materiales es lo que determina el rendimiento y sobre todo la eficiencia. Así mismo, estas mezclas presentan varios usos, que van desde la construcción de pavimentos, aeropuertos, corredores industriales entre otras estructuras, las cuales varía significativamente en sus características.

La mezcla asfáltica es la capa que entra en contacto directo con las cargas de tránsito y está conformada por un aglomerado de áridos envueltos por una capa homogénea de asfalto, cuyas características pueden cambiar debido a la granulometría de los agregados, sus propiedades, el tipo de asfalto u otros de sus aditivos. Este material se destina esencialmente a la construcción de las capas finales de la vía y alcanzan medidas entre 10-20cm, aportan resistencia estructural y distribuyen las cargas de tráfico a las otras capas de la estructura y brindan confort a los usuarios (Rodríguez, 2014).

Debido a que los ligantes asfálticos tradicionales presentan ondulaciones y agrietamientos prematuros, como consecuencia de los cambios climáticos y el alto volumen de carga vehicular, existe una tendencia generalizada que busca integrar materiales resistentes que alarguen el periodo

de servicio de la capa de rodadura y disminuyan los gastos de mantenimiento. En este sentido, se han desarrollado mezclas asfálticas adicionadas con diversos tipos de elastómeros naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS), el grano de llanta reciclado (GCR) y los cauchos sintéticos derivados del petróleo (Ramírez et al., 2014).

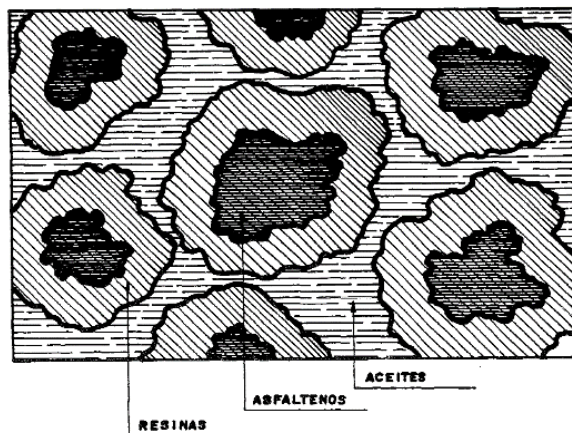
5.2.3.1 Componentes de las mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas presentan diversos componentes que varían según las necesidades que se buscan resolver, sin embargo, es importante citar las más representativas, como se expone a continuación.

• *El asfalto*

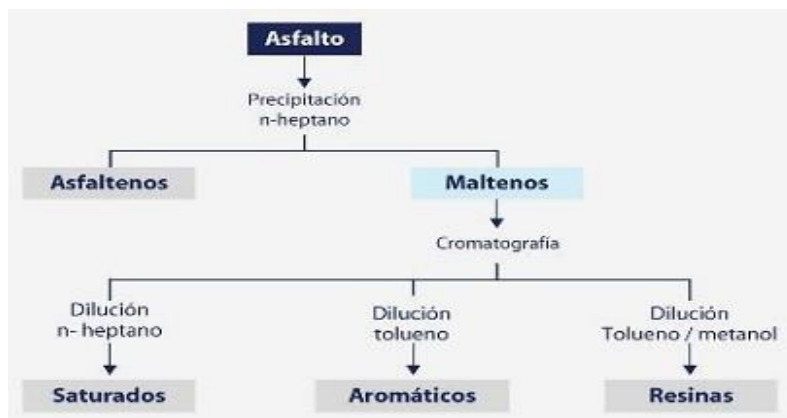
Es un derivado del petróleo altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir grandes esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. También actúa como Impermeabilizante de la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua, proveniente de la precipitación. El valor porcentual óptimo de asfalto generalmente se encuentra entre el 4% y el 6% dependiendo del tipo de mezcla y es el aglomerante de todos los granulares de la mezcla (Rebolledo, 2010).

La composición química del asfalto es sin lugar a duda un sistema que puede ser algo complejo al momento de examinar y analizar, dado que contiene hidrocarburos. El modelo empleado para que se pueda cambiar la estructura del asfalto se denomina micelar, el cual contribuye una explicación de dicha estructura, que consiste en dos fases; una discontinua conformada por dos asfáltenos y una continua que mezcla y solubiliza a los asfáltenos, denominada máltenos. “Las resinas contenidas en estos últimos, actúan como intermediarias del asfalto, dado que su función es homogeneizar y compatibilizar a los insolubles asfáltenos” (Arenas, 2011, p.87-88). Un esquema más explícito se muestra en la figura 5.

Figura 5*Esquema coloidal de Pfeiffer*

Nota. La figura representa la composición química del asfalto. Fuente: Arenas H. (2011)

El asfalto es un derivado del petróleo tienen una estructura química como se muestra en la figura 6. Se puede separar en cuatro fracciones básicas del asfalto definidas a continuación: asfaltenos, saturados, aromáticos, y resinas, conocido como SARA. Los asfaltenos son importantes especialmente porque estos son los que le aportan la dureza, estabilidad y propiedades aglutinantes al asfalto. Los saturados, aromáticos y resinas, agrupados a su vez en uno más grande llamado máltenos, son la fracción soluble en hidrocarburos con bajo punto de ebullición (Romero y Gómez, 2002).

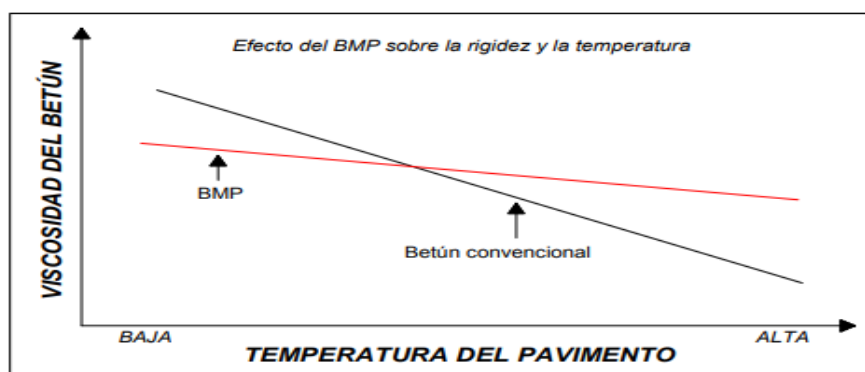
Figura 6*Estructura fisicoquímica del asfalto*

Nota. La figura representa la estructura físico-química del asfalto. Fuente: Repsol (2013)

Para mejorar las propiedades reológicas del asfalto, este se modifica con diferentes aditivos. El principal efecto que tiene la mezcla asfáltica modificada es el cambio en la relación viscosidad-temperatura, mejor adhesividad, propiedades elásticas, mayor resistencia a la fatiga entre otros. La figura 7 muestra el cambio en la susceptibilidad térmica de un asfalto común y uno modificado con polímeros, con esto se logra un asfalto que mantenga su consistencia en un amplio intervalo de temperatura. Al modificar el asfalto se disminuyen las deformaciones plásticas a altas temperaturas y la fragilidad a bajas temperaturas, lo que va a ver reflejado en vías que sin importar las condiciones climáticas se van a conservar (Chávez, 2013).

Figura 7

Efecto del Betún (asfalto) modificado con polímero sobre la rigidez y temperatura



Nota. La figura representa el efecto del Betún asfáltico. Fuente: Hernández y Rosero (2014).

El Instituto Nacional de Vías - INVIAS clasifica los asfaltos modificados con polímero en cinco clases: en el tipo I se encuentran los asfaltos modificados con polietileno y se emplea en mezclas drenantes. el tipo II, III y IV es un asfalto modificado con polímeros y el tipo V es un asfalto modificado de alta consistencia. Cabe mencionar que, las propiedades Reológicas del asfalto dependen del estado en que se encuentren sus componentes, en especial del ligante asfáltico, el cual varía de acuerdo con el origen de los crudos de petróleo. Estas tienen una influencia significativa en las propiedades de la mezcla asfalto-agregado (ahuellamiento, fatiga y afectación térmica).

Vargas (2014) en su Investigación en Asfaltos para la Universidad Industrial de Santander, explica que el comportamiento reológico de los asfaltos depende fuertemente de la temperatura. A temperaturas bajas (-20°C), los asfaltos se tornan frágiles y quebradizos, se dice entonces que se encuentran en estado vítreo. A temperaturas superiores a 60°C , el asfalto es generalmente líquido

Newtoniano. Entre estos dos extremos, los ligantes del petróleo presentan un comportamiento visco elástico.

• **Los agregados pétreos.**

Referente a los agregados, conviene estudiar su origen y naturaleza, ya que todas las partículas provienen de una masa mayor, que puede haberse fragmentado por procesos naturales tales como la exposición a la intemperie y la abrasión o mediante la trituración mecánica, por lo cual la gran mayoría de sus propiedades y características dependen de la roca madre (Delgado et al., 2006).

Los agregados también se denominan minerales inertes y duros la gran mayoría se origina de los procesos de fragmentación debido entre otras cosas a que son los responsables de la capacidad y resistencia de la mezcla. Los factores más importantes a tener en cuenta en la elección del agregado son: la granulometría, la limpieza, la humedad textura, resistencia al desgaste y durabilidad.

Para las mezclas asfálticas generalmente se utilizan dos tipos de agregados como son el agregado grueso el cual comprende a que es retenido en el tamiz No. 4, y que tiene una medida de 4.75mm. Por su parte el agregado delgado corresponde a aquel que para por el tamiz No.4, hasta el tamiz No 200. Cabe mencionar que el porcentaje de arena presente en el agregado fino no podrá ser superior al 15% (Enríquez y Moncayo, 2012).

• **La llenante mineral.**

Se refiere al agregado que pasa por el tamiz No, 200 y presenta una medida de 75.um. es más conocido como piedra caliza, ceniza de carbón o de fundición, cemento portland u otro material con estas características.

5.2.3.2 Algunos aditivos modificadores para las mezclas asfálticas. Debido a los diversos desafíos ambientales y geográficos, los diseñadores de mezclas asfálticas se han dado en la tarea de integrar diversos materiales a los pavimentos flexibles, con el fin de alargar su vida útil y obtener mejores beneficios económicos. Entre estos materiales se destacan los polímeros debidos entre otras cosas a su gran peso molecular lo que los hace susceptible a la unión con moléculas más grandes, entre los que se destacan los plásticos, (polietileno, poliestireno) y elastómeros como el caucho, los cuales se encuentran disponibles en diferentes presentaciones como polvo, películas delgadas o fibras (Carreño y Reyes, 2015).

El efecto y la aplicación de cualquiera de los modificadores se debe comparar con los costos de producción de las mezclas a fin de obtener mayor beneficio.

• **El Grano de Caucho Reciclado (GCR)**

Para mejorar las condiciones de la mezcla asfáltica es necesario que el constructor conozca el componente de esta, la interacción entre sus componentes y manejar la dosificación adecuada. De todos los componentes del pavimento asfáltico, el que más beneficios brinda y que se hace más fácil su modificación es el ligante, ya que su nivel de adaptabilidad brinda un grado de compatibilidad mayor con los áridos en las condiciones aceptables tanto ambientales como de tránsito. La Administración Federal de Carreteras (FHWA) describe el grano de caucho como "un caucho de llantas de desecho que ha sido procesado por molienda ambiente o métodos de granulación, que lo reduce a partículas que generalmente no superan los 4,75 mm (No. 4) de tamiz" (Díaz. 2017).

Charles H. McDonald fue quien desarrollo el primer acercamiento exitoso en Estados Unidos, entre las mezclas asfálticas y el grano de caucho reciclado para cumplir con los trabajos de reparaciones en la ciudad de Phoenix (Arizona, EE. UU.). McDonald estableció que la mezcla en caliente de asfalto y grano de caucho, durante un periodo de reacción entre 40 minutos y una hora, daba origen a un material con nuevas propiedades. El empleo de este material se extendería a tratamientos superficiales y mezclas asfálticas en caliente construidas en los estados de Arizona, Texas y Florida durante las décadas de 1970 y 1980 (Carlson y Zhu, 1999).

Para el año de 1985 el instituto de transporte de Texas, realizo diferentes estudios e investigaciones sobre las mezclas que eran elaboradas a partir GCR y llego a la conclusión que, si este material se manipula adecuadamente, puede tener un comportamiento positivo a largo plazo. (Carlson y Zhu, 1999). En esta misma dirección, Rodríguez (2021) define que: "Los cauchos naturales proporcionan elasticidad, mientras que los cauchos sintéticos estabilidad térmica. Se une a ello un proceso de vulcanizado entrelazando las cadenas de polímeros con moléculas de azufre a alta presión y temperatura" (p.29).

El Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá (IDU) en la resolución 6981, define el GCR como "todo aquel producto obtenido del proceso de trituración de llantas y neumáticos usados y de llantas no conforme, compuesto fundamentalmente por caucho natural y sintético, que no

contiene materiales ferromagnéticos, textiles, y/o elementos contaminantes” (Subdirección general de desarrollo urbano (IDU, 2011, p.7).

El GCR es un material obtenido de las llantas en desuso mediante procesos de molienda donde se disminuye el tamaño, para luego ser 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. En este sentido, 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 (Díaz y Castro, 2017).

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 (Subdirección General de Desarrollo Urbano, 2015).

Entre los métodos de adición de GCR en las mezclas asfálticas, más representativos se encuentra el de vía húmeda, con el cual se genera un producto conocido como “Asfalto modificado con caucho” o “Asfalto-Caucho”, además de aumentar la viscosidad del cemento asfáltico dándole unas características particulares, aunque se ha demostrado que la plasticidad disminuye en temperaturas altas, lo cual es un punto a favor para evitar fenómenos como el ahuellamiento, mientras que en bajas temperaturas, la flexibilidad de esta mezcla aumenta, lo que traduce un mejor comportamiento ante problemas de posible fisuración (Díaz y Castro, 2017).

Entre ellos, el grano de caucho reciclado (GCR), un polímero obtenido de las llantas de los vehículos automotores en desuso, cuya propiedad se basa en la naturaleza polimérica, en su estructura amorfa, alta flexibilidad de sus cadenas (Ramírez et al., 2014).

Este material ha sido de gran importancia, debido a que permite una calidad aceptable en las condiciones finales de la capa asfáltica del pavimento, un material que ha despertado gran interés debido a sus beneficios en las mezclas drenantes, con macro, micro textura y discontinuas.

Además de mejorar sus propiedades mecánicas estas adiciones proporcionan al asfalto la capacidad de disipar energía, debido a la organización interna de los polímeros, ya que están formados por largas cadenas que al estirarse poseen la capacidad de liberar mucha energía (Askeland, 1998). Este material también proporciona plasticidad, favorecen la estabilidad, la

resistencia a la deformación, minimiza los esfuerzos de tensión y reduce el agrietamiento entre otros, (Conejo y Vargas, 2017; Heshmat, 1997).

5.2.4 Las propiedades dinámicas de las mezclas asfálticas

El uso de asfaltos modificados es cada vez más común en el mundo debido a las ventajas que brinda a las mezclas, como los beneficios ambientales, el ahorro económico y la mejora de su desempeño y el incremento de la vida útil. Entre los principales parámetros a considerar se encuentran los siguientes:

5.2.4.1 Módulo Resiliente. A nivel de pavimentos, es entendido como la propiedad del material que se requiere para el diseño de una mezcla asfáltica, además de ser uno de los parámetros más importantes para determinar el comportamiento frente a la deformación de los materiales que la conforman. También se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables a partir de ensayos triaxiales dinámicos con carga repetida, (AASHTO, 1993).

Según los aportes de Villalta y Figueroa (2017), para calcular el módulo resiliente se requiere desarrollar un ensayo que consiste en someter una probeta de material a un estado de esfuerzos compuesto por una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador dinámico. Esto con el fin de simular el estado a que se encuentra sometida la mezcla cuando éste en operación. Desde esta perspectiva el módulo resiliente es entendido como 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 inconfiada, a la cual se aplica una serie de cargas a diferentes frecuencias (0.33, 0.5 y 1.0 Hz), variando la temperatura (5°C, 25°C y 40°C o 41°F, 77°F y 104°F) (INVIAS, Norma INV E-749-13, 2013). No obstante, los valores de este parámetro se pueden emplear para evaluar la calidad relativa de los materiales, así como para generar datos de entrada, para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos (Parra y Cepeda, 2012). Así mismo, se requiere estudiar efectos de temperatura, soporte de carga, períodos de reposo, etc., los ensayos se pueden repetir sobre un espécimen para evaluar su condición respecto a la temperatura o humedad. Cabe aclarar que este método no está destinado para uso en especificaciones. I.N.V. E – 749 –07 (Parra y Cepeda, 2012).

5.2.4.2 Módulo dinámico. Es el valor absoluto del Módulo Complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal $|E^*|$. I.N.V. E – 754 – 13. El ensayo de Módulo Dinámico comprende 3 etapas previas como son: a) Confección de probetas cilíndricas a partir de mezcla diseñada previamente, b) Realización de ensayo para determinar la densidad de la probeta. c) Conocer el equipo a utilizar y los dispositivos necesarios, (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) T342 como se citó en Corona, 2017).

La mezcla de alto módulo tiene un módulo dinámico mayor a diez mil mega pascales, el cual es el valor absoluto de la relación entre esfuerzo y deformación para un material visco elástico lineal y define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal (INVIAS, 2013), esto muestra la capacidad de la mezcla asfáltica para absorber energía deformándose.

Se expresa en términos de esfuerzos mediante la siguiente ecuación:

$$M = \sigma / \epsilon \quad (2)$$

Donde:

M : Módulo dinámico.

σ : Esfuerzo, medida de la fuerza por unidad de área.

ϵ : Deformación unitaria, medida de la deformación total por unidad de longitud.

La magnitud del módulo está asociada a la temperatura y frecuencia. La frecuencia se asocia a las cargas y a la velocidad a la cual pasan los vehículos. Un incremento de la frecuencia implica un aumento del módulo y, por ende, la estructura de pavimento debe tener una rigidez tal que le permita soportar las cargas a las cuales va a estar sometida. Los valores del módulo dinámico se pueden emplear tanto para el diseño del espesor de la capa de mezcla asfáltica para la estructura de pavimento flexible.

Además del módulo dinámico, también es importante evaluar en las mezclas asfálticas las deformaciones plásticas, las cuales son canales que se forman en las huellas de las llantas de los vehículos que transitan y representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes causadas por los vehículos, siendo uno de los tipos de deterioro que más se tiene en cuenta en el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente (Padilla, 2004). El comportamiento de las mezclas asfálticas frente al ahuellamiento está relacionado con el tipo de asfalto,

granulométrica y calidad de los agregados empleados en la fabricación de la mezcla. La temperatura funcional del asfalto es de gran importancia, por lo cual se espera que al modificar el asfalto se disminuyan estas deformaciones al este ser menos susceptible a la temperatura y pueda conservar sus propiedades.

5.2.4.3 La Fatiga. La fatiga es generada por efectos del tránsito; se presentan generalmente cuando los materiales que conforman la estructura al ser sometida a repeticiones de carga sufren algún tipo de agrietamiento estructural relacionado con la deformación o tensión horizontal por tracción en la base de la carpeta asfáltica al ser sometidos a repeticiones de cada carga. Las fallas inician en la parte inferior de la capa y se va prolongando hasta la superficie, esto debido a que se presentan una tensión máxima en las fibras inferiores de la capa debido a los esfuerzos soportados se va degradando y prolongando hacia arriba, finalizando en una falla estructural en la obra (norma del Instituto Nacional de Vías (INVE - 808 - 13, 2013).

5.2.5 Las mezclas asfálticas de alto módulo MAM

Son mezclas en caliente fabricadas con asfaltos duros, con capacidades suficientes para soportar altas cargas de tráfico vehicular, así como las adversidades climáticas, razón por la cual en ocasiones son modificadas con contenidos asfálticos próximos al 6% de la masa de los agregados pétreos y polvo mineral con una la proporción porcentual entre el 8% - 10% (Padilla, 2004). Cuando a estas mezclas se le agrega (GCR), alcanzan un elevado módulo de elasticidad, del orden de los 13,000 MPa a los 20 grados centígrados y mejora relativamente la resistencia a la fatiga y se utilizan en capas de espesores de 8 y 15cm, tanto para rehabilitaciones como para la construcción de pavimentos flexibles nuevos, con tráficos pesados de intensidad media o alta (Padilla, 2004).

- La principal ventaja de las capas bases modificadas con GCR, frente a las bases de grava cemento, es la ausencia de agrietamiento debido a la retracción además de que presentan mayor capacidad de absorción de tensiones y en general una mayor resistencia a la fatiga, permitiendo ahorrar espesor.
- En este sentido, se presentan algunos requisitos para el diseño de las mezclas asfálticas de alto módulo, según el método de Marshall:

Cabe mencionar que en capas de 50 a 75 mm de espesor se exigirán los requisitos de vacíos con aire de “intermedia” y para los de capas de más de 75 mm se exigirán los requisitos para “base”.

(*INVIAS. Art.450-13*). En este sentido, la mezcla asfáltica preliminar en caliente para debe cumplir con los criterios de densidad, elasticidad y vacíos para que pueda soportar las cargas de tránsito.

Otra característica de las MAM es que su rigidez es el doble o triple con respecto a las mezclas asfálticas convencionales, razón por la cual se fabrican con asfaltos de baja penetración, en ocasiones modificados y aproximadamente un 6% sobre el peso de los áridos, y una proporción de llenante alta, entre el 8 y 10% y se logra una gran capacidad de absorción de esfuerzos y alta resistencia al ahuellamiento. Las MAM se utiliza tanto en operaciones de refuerzo, como en la construcción de pavimentos nuevos, para tráficos medios y pesados, en capas de espesores entre 8 y 15 cm, la cual tiene un módulo dinámico, medido por medio de la norma de ensayo INV E-749-13, a la temperatura y frecuencia definida, mayor a diez mil mega pascales.

6. Metodología

El presente apartado expone la metodología aplicada durante el desarrollo del proyecto de profundización, la cual constituye el camino para el alcance de cada uno de los objetivos planteados inicialmente y transitar hacia los resultados y conclusiones. Se da inicio mencionando la investigación cuantitativa, las normativas utilizadas y las etapas a desarrolladas, explicando brevemente las actividades efectuadas en cada una.

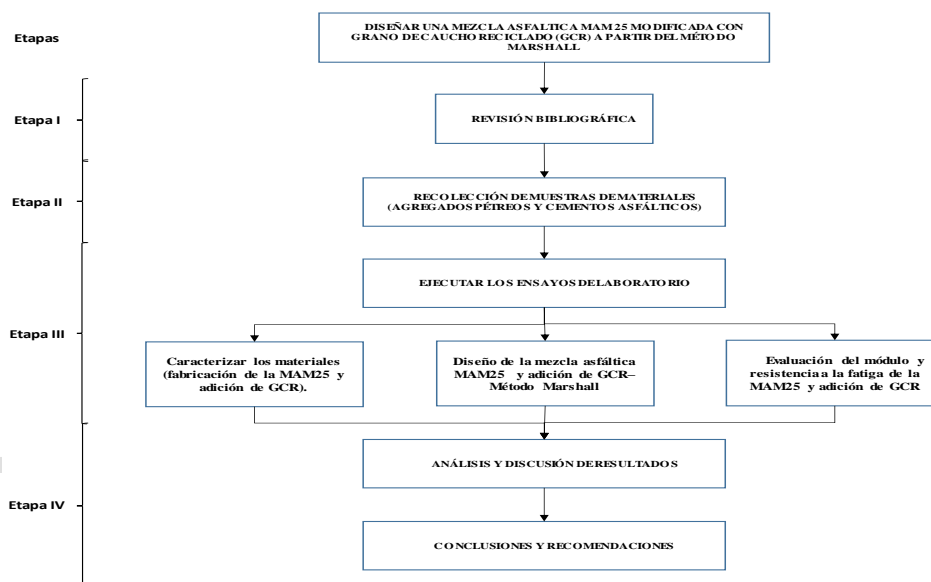
Pues bien, en sentido amplio hay que mencionar que el proceso de profundización se apoya en la investigación cuantitativa, que según Hernández (2006), se fundamenta en la indagación y comprensión de la realidad investigada a partir de interpretaciones estadísticas o numéricas. Este enfoque parte de una hipótesis, la cual será comprobada al finalizar el proceso de análisis de la información, con el fin de llegar a una determinación sobre el problema investigado. También se recurre al diseño experimental, se realizaron ensayos de laboratorio, tomando como referencia las normas de ensayo de materiales para carreteras y las especificaciones generales de construcción de carreteras (INVIAS, 2013) (Hernández et al., 2006).

6.1 Etapas para el desarrollo del estudio

A continuación, se hace una descripción de cada una de las etapas propuestas para el desarrollo del diseño metodológico preliminar a desarrollar:

Figura 8

Estructura metodológica



Nota. Expone las etapas para el desarrollo del estudio de profundización. Fuente propia a partir del método Marshall

6.1.1 Etapa I. Revisión bibliográfica

En esta etapa comprendió la búsqueda de información sobre el tema, a través de fuentes físicas como libros, artículos o investigaciones, así como fuentes virtuales a través de los monitores de búsqueda como Google académico. Adicionalmente se realizó una exhaustiva consulta en bases de datos especializadas en el tema a través de internet y se contó asesoría de especialistas con amplios conocimientos sobre las MAM a nivel nacional e internacional. A través de este proceso se obtuvo información suficiente para la estructuración de los antecedentes, el marco teórico, legal y metodológico.

6.1.2 Etapa II. Recolección de muestras de materiales

Esta etapa tuvo como objeto la identificación, selección y consecución del material a ensayar, los tiempos y definición de los ensayos de laboratorio requeridos para la ejecución del proyecto de investigación. Entre los insumos o materiales requeridos para la investigación estarían: agregados pétreos y ligante asfáltico modificado con GCR. La fuente de donde se obtuvieron los agregados pétreos se encuentra localizada en el corregimiento de Arroyo de Piedra (Municipio de Luruaco, Departamento del Atlántico), en la Ruta 90 Sector 06, en el PR55 carretera La Cordialidad (Cartagena – Sabanalarga – Barranquilla). Esta cantera, presentan una estratigrafía según varios autores el desarrollo y configuración actual de la cuenca sedimentaria del Valle inferior del río Magdalena, donde se encuentra la zona de estudio, es el resultado de la interacción de las placas de Cocos, Caribe y Sur América (Ordóñez, 2008).

6.1.3 Etapa III. Ejecución de los ensayos de laboratorio

Una vez identificado y seleccionado los materiales se procedió con los ensayos de caracterización laboratorio, mediante la realización de varios ensayos como son los de caracterización del agregado pétreo, la llenante mineral y el ligante asfáltico, así como la determinación de las fórmulas de trabajo, los de preparación de las mezclas asfálticas y los ensayos de módulo dinámico y fatiga, según lo requerimientos normativos y de esta manera determinar las propiedades para obtener una mezcla adecuada y sobre todo estimar su desempeño.

Los datos generados en los laboratorios de la empresa Asesoría de Proyectos Civiles SAS fueron corroborados en los laboratorios Humberto Quintero O CIA SCA previamente a la preparación de las mezclas asfálticas para llevar a cabo los ensayos de módulo resiliente y

resistencia a la fatiga. Esta información fue de gran importancia para determinar la cantidad de cantidad de asfalto a adicionar en las diferentes mezclas de pruebas en el laboratorio.

Una vez conocidas las propiedades físicas y mecánicas de los materiales propuestos para la presente investigación se proceden a elaborar el diseño de la fórmula de trabajo de la MAM-25, en donde se desarrolló dos (2) tipos de mezcla asfálticas preparadas con cemento asfáltico Tipo V adicionándole GCR, una 3% y otra con el 5%, y la muestra patrón preparada con cemento asfáltico Tipo V; mediante el procedimiento, mezclado y compactación del asfalto-agregado. (ASTM D1559). Para ello se tuvieron en cuenta dos aspectos fundamentales como: la densidad, el análisis de vacíos, la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La presente investigación trata de un proyecto de profundización y no de investigación, cabe aclarar que el número de ensayos a realizar estuvo determinado por la exigencia del método de ensayo Marshall, el cual comprende 3 muestras para cada punto porcentual de cemento asfáltico utilizado en la investigación, para un total de 5 muestras de briquetas para cada tipo de asfalto modificado; para un total de 15 briquetas. Una vez diseñada la mezcla, se realizan los ensayos de desempeño, tales como el módulo resiliente tomando como referencia la norma AASHTO T342 “Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)” y resistencia a la fatiga.

6.1.4 Etapa IV. Análisis, discusión, conclusiones y recomendaciones

Esta etapa abarca la revisión y análisis de resultados de los ensayos efectuados en el laboratorio y se realizó la discusión de estos con base a los datos obtenidos, la opinión del investigador y la teoría consultada, con lo cual se comprobó la hipótesis planteada y se establecieron las conclusiones y recomendaciones. En este orden se procede a la elaboración del documento final y la organización de los respectivos anexos que soportan las actividades realizadas.

7. Resultados

El presente apartado exponer los resultados obtenidos a lo largo del proceso investigativo, en función de los objetivos planteados. Se da inicio con la caracterización de los materiales utilizados en las mezclas ensayadas, entre los que se destaca el agregado pétreo, el llenante mineral y los cementos asfálticos. Seguidamente se presentan los resultados del diseño de la mezcla asfáltica y los hallazgos obtenidos los ensayos efectuados sobre la misma respecto a variables como fatiga y módulo dinámico, todo ello amparado en las normas establecidas para Colombia respecto a las construcciones de pavimentos.

7.1 Caracterización de los materiales utilizados en las mezclas ensayadas

Conocer las características de los materiales es un aspecto fundamental para el estudio de profundización, dado que estos influyen directamente en resistencia a lo largo de su vida útil dado que pueden tener diferentes efectos en las propiedades de las mezclas asfálticas ensayadas. Para este propósito, se ejecutaron las pruebas de laboratorio de acuerdo con las normas de ensayos establecidas por el Ministerio de Transporte – Instituto Nacional de Vías, (INVIAS, 2013), tanto para el agregado pétreo, llenante mineral y la mezcla asfáltica como se expone a continuación.

7.1.1 Caracterización del agregado pétreo

Para realizar la caracterización física-mecánica del agregado se establecieron algunos parámetros como: resistencia, limpieza y geometría. Así mismo, se verificó que se cumplía los requisitos de las especificaciones INVIAS. Art.450-13.

En la tabla 3 se presentan los valores obtenidos en cada uno de los parámetros establecidos por la norma. De acuerdo con los resultados obtenidos en esta fase, se observa que los agregados pétreos presentan características apropiadas para el diseño y preparación de las mezclas asfálticas MAM-25, en la medida que se ajustan a las exigencias normativas respecto parámetros como: resistencia, limpieza y geometría, para cumplir la función requerida. (Ver anexo c parámetros obtenidos en la caracterización física- mecánica del agregado pétreo)

Tabla 3*Caracterización del cemento asfáltico respecto a la resistencia.*

Característica de resistencia	Norma de ensayo INV	Criterio de aceptación MAM25	Verificaciones características			
			M promedio	σ	Error, %	Chequeo
Materiales: agregados pétreos y llenante mineral						
Tabla 450 - 3 Artículo 450-13. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua						
Características de resistencia						
Dureza agregado grueso (O). Desgaste en la máquina de los Ángeles (Capa de rodadura / intermedia / base) a 500 revoluciones, máximo (%)	INV E - 218- 13. Tabla 450-3	25%	17,30%	0,002	0,08	Cumple
Dureza agregado grueso (O). Desgaste en la máquina de los Ángeles (Capa de rodadura/intermedia/base) a 100 revoluciones, máximo (%)	Artículo 450- 13	5%	3,80%	0,002	0,06	Cumple
Dureza. Degradación por abrasión en el Equipo Micro - Deval (Capa de rodadura / intermedia / base), máximo (%)	INV E - 238- 13. Tabla 450-3 Artículo 450- 13	20%	11,80%	0,012	0,41	Cumple
Dureza. Resistencia mecánica por el método del 10% de Finos (Capa de rodadura / intermedia / base). Valor en seco, mínimo (kN)	INV E - 224- 13. Tabla 450-3	110	266	1,732	57,74	Cumple
Dureza. Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10% de Finos (Capa de rodadura / intermedia / base). Relación húmeda/seco, mínimo (%)	Artículo 450- 13	75%	88%	0,023	0,77	Cumple
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	INV E-232- 13. Tabla 450-3 Artículo 450- 13	0,45	0,55	0,01	0,33	Cumple
Durabilidad (O). Pérdida en ensayo de solidez de sulfatos de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	INV E - 220- 13. Tabla 450-3 Artículo 450- 13	Sulfato de Magnesio ≤ 18%	5,70%	0,004	0,14	Cumple
limpieza del agregado						

Limpieza Agregado Grueso (F). Impurezas en agregados grueso, máximo (%)	INV E - 237- 13. Tabla 450-3 Artículo 450-13	50%	40%	0,011	0,35%	Cumple
Limpieza gradación combinada (F). Índice de Plasticidad, máximo (%)	INV E - 125- 13 y INV E - 126-13. Tabla 450-3 Artículo 450-13	NP	NP	0	0,00%	Cumple
Limpieza gradación combinada (F). Equivalente de Arena, mínimo (%) ⁽¹⁾	INV E - 133- 13. Tabla 450-3 Artículo 450-13	50%	53%	0	0,00%	Cumple
Geometría del agregado pétreo						
Geometría de las Partículas, agregado grueso (F). Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	INV E - 230- 13 Tabla 450-3 Artículo 450-13	10%	3%	0,028	0,92%	Cumple
Geometría de las Partículas, agregado grueso (F). Relación de las Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	INV E - 240- 13 Tabla 450-3 Artículo 450-13	21%	21%	0	0,00%	Cumple
Geometría de las Partículas, agregado grueso (F). Caras fracturadas a una cara (rodadura/intermedia/base), mínimo (%)	INV E - 277- 13 Tabla 450-3	85%	92,00%	0,021	0,0069	Cumple
Geometría de las Partículas, agregado grueso (F). Caras fracturadas a dos caras (capas de: rodadura/intermedia/base), mínimo (%)	Artículo 450-13	70%	82,00%	0,01	0,0033	Cumple
Geometría de las Partículas, agregado fino (F). Angularidad de la fracción fina, método A (capas de: rodadura/intermedia/base), mínimo (%)	INV E - 239- 13 Tabla 450-3 Artículo 450-13	35%	47%	0,01	0,33%	Cumple

Nota. La tabla presenta los valores obtenidos en el proceso de caracterización del agregado pétreo. Fuente propia a partir del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 450-13.

7.1.2 Caracterización de los cementos asfálticos

La caracterización del asfalto también fue una de las actividades determinantes al momento de diseñar una mezcla asfáltica, porque de esta dependen el cumplimiento de algunas propiedades como: penetración, punto de ablandamiento, recuperación elástica entre otros. Por consiguiente, se efectuaron ensayos para evaluar parámetros de los asfaltos originales y el residuo de asfalto luego de la prueba de acondicionamiento en pérdida por calentamiento en película delgada rotatoria según norma de ensayo (INV E-720-13); en donde se verificó el cumplimiento de los requisitos de la Tabla 5 (INVIAS. Art.413-13 y Art. 414-13), antes expuesta.

Los cementos asfálticos utilizados para la fabricación de las mezclas MAM25, se formularon en el laboratorio Humberto Quintero O CIA SCA, utilizando diferentes tecnologías de GCR, polímeros y aditivos modificadores, tomando como base el cemento asfáltico clasificado como un 60-70. Los cementos asfálticos utilizados en la investigación fueron:

- a) Cemento asfáltico tipo V Premium código: HQIND-AMV-0120-001: preparado con el 10% polímeros (elastómero y plastómero). Este material fue suministrado preparado por el proveedor a partir de una combinación de polímeros tipo styrene – butadiene - styrene (SBS), ethylene vinyl acetate (EVA), aceites aromáticos, aceites rejuvenecedores, aditivos mezcla tibia y aditivos mejoradores de adherencia; fabricado para cumplir con los parámetros establecidos en la tabla 414 -1.
- b) Cemento asfáltico tipo V código HQIND AMVGCR-0520-003A: preparado con el 3% GCR y el 97% polímeros, elaborada por proveedor a partir de una combinación de polímeros tipo styrene – butadiene - styrene (SBS), ethylene vinyl acetate (EVA), aceites aromáticos, aceites rejuvenecedores, aditivos mezcla tibia, aditivos mejoradores de adherencia y el 3% de grano de caucho reciclado (GCR).
- c) Cemento asfáltico tipo V modificado Código HQIND AMVGCR-0420-007A: preparado con el 5 % GCR y el 95% polímeros (elastómeros plastómeros), elaborada por el proveedor a partir de una combinación de polímeros tipo styrene – butadiene - styrene (SBS), ethylene vinyl acetate (EVA), aceites aromáticos, aceites rejuvenecedores, aditivos mezcla tibia, aditivos mejoradores de adherencia y el grano de caucho reciclado (GCR) en un valor porcentual del 5%. (Ver anexo c parámetros obtenidos en la caracterización física-mecánica de los cementos asfálticos).

Tabla 4*Caracterización del cemento asfáltico*

CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO CERTIFICADO DE CALIDAD							
ESPECIFICACIÓN INVIAS ART. 414-13, TABLA 414-1							
CARACTERÍSTICA	UNIDAD	NORMA ENSAYOS	Asfalto Modificado Tipo V		Resultado		
			Mín.	Máx.	Tipo V Normal	Tipo V + 3% GCR	Tipo V + 5% GCR
CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO							
Penetración (25°C, 100 g, 5 s).	0,1 mm	E - 706	15	40	37,8	39,6	37,8
Punto de ablandamiento.	°C	E - 712	65	-	75,1	67,7	70
Recuperación elástica por torsión a 25°C.	%	E - 727	15	-	45	43,33	45
Estabilidad al almacenamiento.	°C	E - 726/712	-	5	5	3,6	5
Contenido de agua.	%	E - 704	-	0,2	0	0	0
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland.	°C	E - 709	230	-	295	295	295
Peso Específico 25°C.	Kg/m ³	E - 707	-	-	1018,51	1018,51	1018,51
RESIDUO DEL ENSAYO DE PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO EN PELÍCULA DELGADA EN MOVIMIENTO							
Cambio de masa (163°C, 85 minutos).	%	E - 720	-	0,8	-0,489	-0,489	-0,489
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento (E-720), en % de la penetración original.	%	E - 706	70	-	70,79	71,75	70,86
Incremento en el punto de ablandamiento.	°C	E - 712	-	10	9,8	9,3	9,5
Temperatura de mezclado.	°C	ASTM D 1559	REPORTAR		170 - 178	170 - 178	170 - 178
Temperatura de compactación.	°C	ASTM D 1559	REPORTAR		158 - 165	158 - 165	158 - 165
GRADO DE DESEMPEÑO							
Grado de Desempeño PG Asfalto Original Base.	°C	AASHTO M320	64	-22	64 - 22	64 - 22	64 - 22
Grado de Desempeño PG Asfalto Modificado Tipo V.	°C	AASHTO M320	70	-22	88 - 22	88 - 22	88 - 22

Nota Presenta los valores obtenidos en el proceso de caracterización del agregado pétreo. Fuente propia a partir del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 450-13

Al observar los resultados expuesto en la tabla anterior, se observa que el cemento asfáltico presenta valores que se ajustan a la normativa, en aspectos como la penetración, punto de ablandamiento y recuperación elástica por torsión a 25°C, parámetros de gran importancia para determinar el comportamiento de la mezcla asfáltica de alto módulo.

Otra metodología aplicable para efectuar la clasificación a los cementos asfálticos es por el grado de desempeño (PG), en función de la temperatura ambiental más alta y de la temperatura ambiental más baja a la cual se desempeña satisfactoriamente el pavimento y se mantendrá sin fallas. En donde el grado de desempeño (PG) permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado a la importancia de determinado proyecto, en función del clima dominante, de la intensidad del tránsito esperada y de la velocidad de operación a que estará sujeta la carretera durante su vida útil.

La clasificación de los cementos asfálticos empleados en la investigación mediante por el grado de desempeño - PG es la siguiente (Ver anexo 1 Grado de Desempeño - PG):

Tipo V Premium (0120-001)	PG82-22
Tipo V + 3% GCR (0520-003A)	PG94-22
Tipo V + 5% GCR (0420-007A)	PG88-22

Procederemos a evaluar la respuesta elástica que presenta el cemento asfáltico a 64°C (Ver Figura 9).

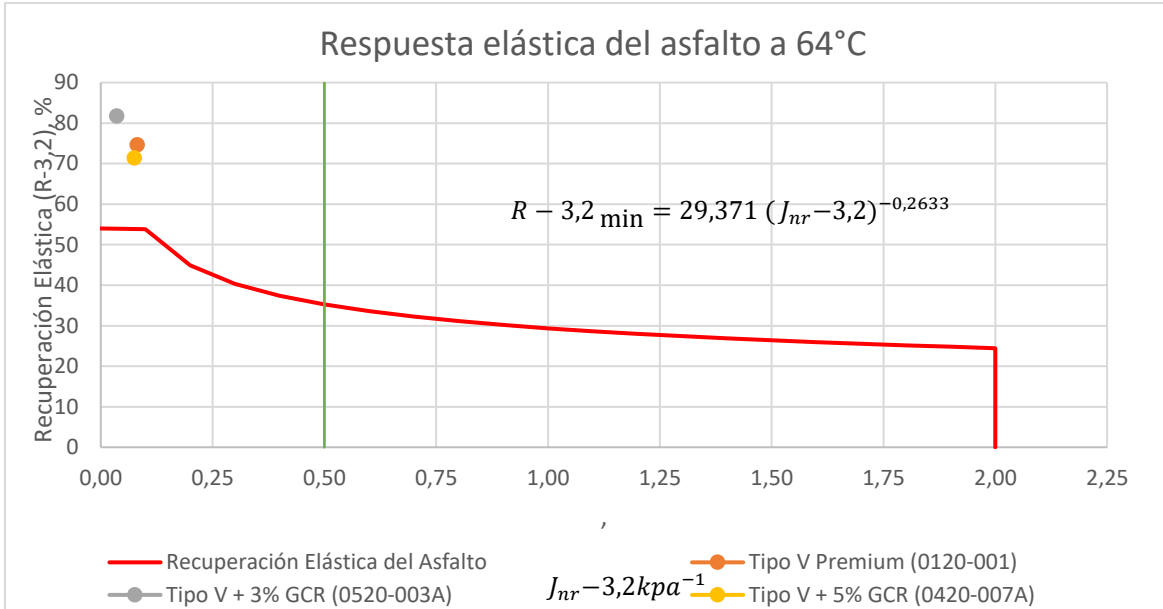
Se tiene que los tipos de cementos asfálticos que se usaron para la investigación presenta una clasificación extremadamente pesada, clasificación “E”, que es la condición más crítica a la cual puede ser sometido el asfalto respecto a la deformación recuperable, en la cual se tiene que el tráfico será más de 30 millones de ejes equivalentes y tráfico detenido, se observa que los tres tipos de ligantes cumplen con el requerimiento.

Así mismo, se obtuvo la respuesta elástica del cemento asfáltico a 70°C (Ver Figura 9).

Para los asfaltos tipo V Premium y con 3% GCR, siguen cumpliendo con la clasificación extremadamente pesada tipo “E”, mientras que el tipo V con 5% de GCR, ya no cumple con esta designación. Cumple con la designación muy pesado, tipo “V”, la cual es para niveles de tráfico de 30 millones de ejes equivalentes, velocidad detenida o < a 20 km/h

Figura 9

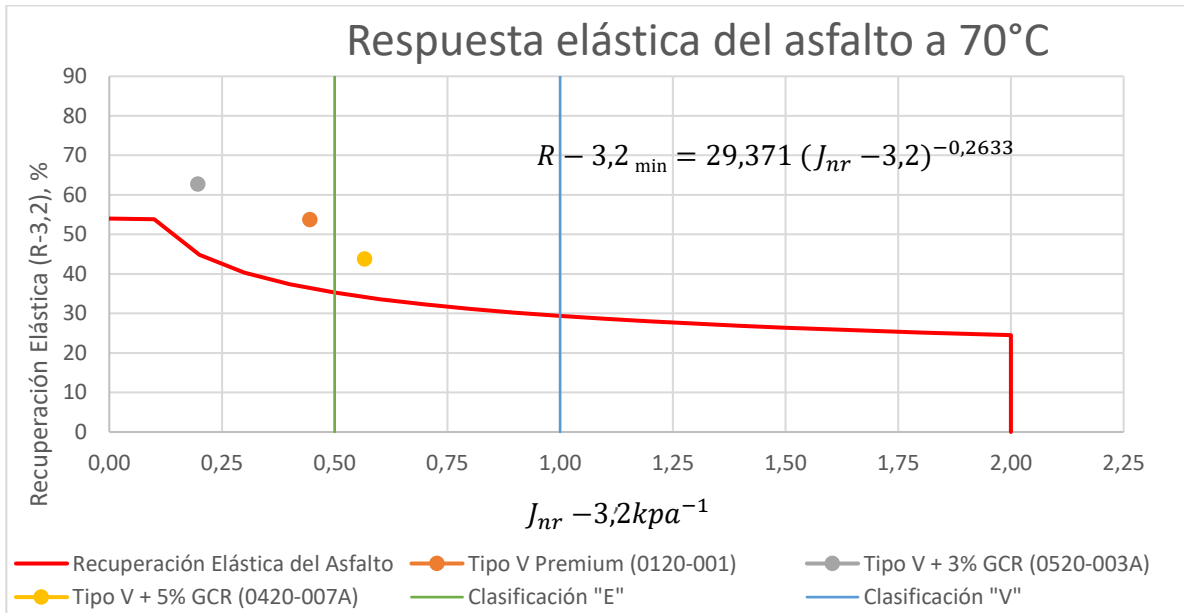
Gráficas respuesta elástica del asfalto 64°C



Fuentes: Elaboración propia

Figura 10

Gráficas respuesta elástica del asfalto 70°C



Fuentes: Elaboración propia

7.2 Diseño de la mezcla asfáltica

La evaluación de las mezclas asfálticas se realizó mediante la utilización de equipos instrumentales y experimentales, los cuales se pueden clasificar en dos grupos, la evaluación estática y evaluación dinámica. En la evaluación estática de las mezclas asfálticas preparadas con grano de caucho reciclado – GCR, fue el ensayo por el Método Marshall. Por lo tanto, se utilizaron todos los implementos y equipos que hacen parte de este método de ensayo de laboratorio, en donde se estableció la fórmula de trabajo; para así determinar los requisitos mínimos para el diseño de una mezcla de alto módulo según el método Marshall (INVIAS. Art.450-13) (ver tabla 5).

En este sentido, se obtuvieron 3 tipos de mezclas asfálticas, en donde cada mezcla presentó una variación en el cemento asfálticos, usando: Tipo V Premium, Tipo V con la adición del 3% GCR y Tipo V con el 5%, modificando sus polímeros, donde se exige preparar las mezclas realizando variaciones en el contenido del cemento asfáltico modificado que van desde el 4.5% a 6.5%. Mediante el ensayo Marshall, se obtuvo los parámetros estáticos obtenidos en cada una de las mezclas asfálticas evaluadas a diferente variación de contenido de cemento asfáltico utilizados en la investigación, respecto a parámetros como porcentaje óptimo del asfalto, estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos. como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5

Resumen de los parámetros estáticos obtenidos

Característica	Requisitos Mezcla de alto módulo (MAM-25)	MAM-25		
		Cemento Asfáltico Tipo V Premium (0120-001)	Cemento Asfáltico Tipo V con adición del 3% GCR (0520-003A)	Cemento Asfáltico Tipo V con adición del 5% GCR (0420-007A)
Contenido óptimo de asfalto:	-	5.5%	5.5%	5.7%
Estabilidad (KN):	15,000	23700	15300	12100
Flujo (mm):	2 a 3	3.6	3.5	4.7
Relación Estabilidad /Flujo (Kn/mm):	-	6.6	4.3	2.6
% Vacíos con aire:	4 a 6	5.8	4.7	5.2
% Vacíos agregado mineral:	>14	15.1	15.0	15.6
% Vacíos llenos de asfalto:	63 a 75	70.1	69.5	68.7
Relación llenante / Ligante efectivo, en peso	1,2 a 1,4	0	0	0

Nota. Expone los resultados estáticos obtenidos a partir de la fórmula de trabajo. Fuente propia a partir del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 450-13

Según los resultados obtenidos se pudo observar que la estabilidad la mezcla patrón (Preparadas con Cemento Asfáltico Tipo V Premium (0120-001) y el ligante adicionado con el 3% GCR (0520-003A), si se ajustan, en la medida que se encuentra próximo al valor mínimo exigidos en las especificaciones, mientras que la mezcla adicionada con el 5%, GCR (0420-007A), no cumple con el parámetro de estabilidad mínima porque se encuentra muy por debajo del valor mínimo exigido. Caso contrario pasa con cemento asfáltico que se le adicionada con el 5% GCR (1019-003).

Ahora bien, en lo que respecta al flujo, se encontró que ningunas de las mezclas ensayada cumplió con los valores exigidos por la especificación. Sin embargo, la MAM preparada con ligante con adición del 3% GCR, sus valores estuvieron próximos a las MAM sin GCR; mientras que la que presenta un valor más alejado como fue la que se le adiciono el 5% de GCR.

7.3 Determinación del módulo resiliente y fatiga

El presente aparatado evidencia los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con GCR, respecto al módulo resiliente y fatiga resistencia a la fatiga como se expone a continuación.

7.3.1 Módulo resiliente

Con base a las fórmulas de trabajo definidas en la fase anterior, se elaboran las briquetas con cada tipo de cemento asfáltico, para la evaluación dinámica de las mezclas y así poder determinar la relación esfuerzo y deformación para unas condiciones definidas de temperatura y frecuencia. Esta evaluación se llevó a cabo en los laboratorios de la empresa Humberto Quintero O y Cía. SCA, el método utilizado en ensayo para determinar el módulo resiliente es el de tensión indirecta, cuya metodología se basa en la norma colombiana INV E-749-13.

A continuación, se presentan los resultados generados en el cálculo de módulo resiliente de las mezclas a una temperatura de 20°C y a las frecuencias de carga establecidas para el ensayo de 2.5Hz, 5.0Hz y 10.0Hz aplicados a las mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) preparadas con cemento asfálticos modificados (Tipo V Premium, Tipo V con la adición de GCR en un 3%, 5% como se expone en la tabla 6.

Tabla 6

Módulo resiliente mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) cemento Asfáltico Tipo V y adicionado GCR

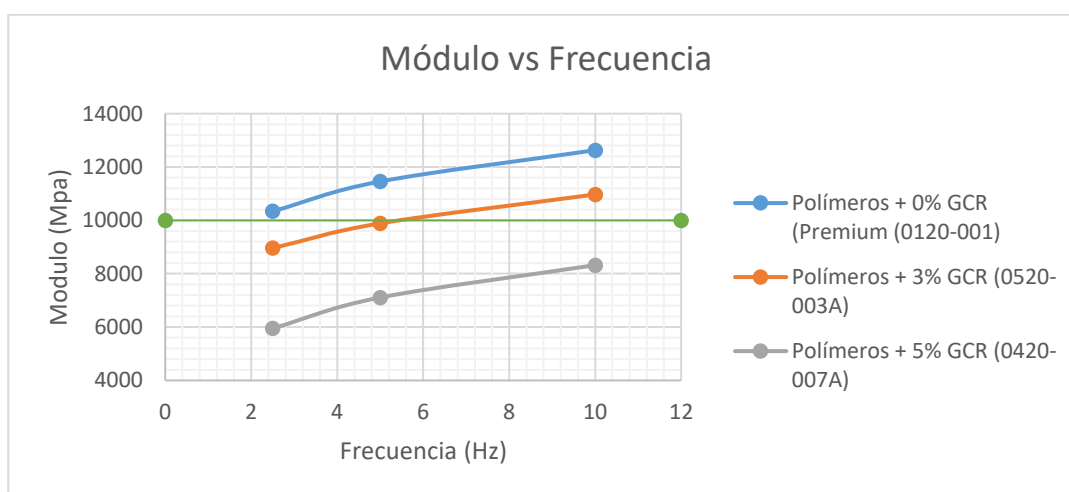
Ensayo	Característica	MAM-25		
		Tipo V Normal Premium (0120-001)	Tipo V + 3% GCR (0520-003A)	Tipo V + 5% GCR (0420-007A)
Módulo resiliente (Mpa)	A 20° C y 2.5 Hz	10.340	8.961	5.951
	A 20° C y 5 Hz	11.458	9.889	7.109
	A 20° C y 10 Hz	12.631	10.972	8.322

Nota. Presenta los resultados obtenidos respecto al módulo resiliente. Fuente: Elaboración propia a partir del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 450-13

Según los resultados obtenido respecto a este parámetro, se observa que la mezcla asfáltica preparada con el asfalto Tipo V Premium y la mezcla asfáltica con la adición del 3% de GCR, cumplió con el valor mínimo para ser clasificadas como mezclas asfálticas de alto módulo, tal como es exigido por la norma de 10.000 a 20° y 10Hz. Así mismo, se observó que la mezcla asfáltica preparada con cemento asfáltico con el 5% grano de caucho reciclado (GCR), se presenta una reducción en el módulo resiliente en cada frecuencia de carga ensayada (2.5Hz, 5.0Hz y 10.0Hz), el valor de modulo obtenido no logro cumplir con el valor mínimo establecido para clasificarla como mezclas asfálticas de alto módulo; tal como se muestra en la figura 9.

Figura 11

Gráficas módulo resiliente mezclas asfálticas y a las diferentes frecuencias de carga (2.5Hz, 5.0Hz y 10.0Hz)



Nota. Expone el módulo resiliente respecto a las frecuencias de carga Fuentes: Elaboración propia a partir del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 450-13

En lo que refiere a la frecuencia, encontró que la deformación plástica se incrementa continuamente con las repeticiones de carga como función de la magnitud e historial de los esfuerzos y sensibilidad de la mezcla, así como la frecuencia y duración de la carga. Teniendo en cuenta que el asfalto es un material que puede ser considerado elástico – lineal a temperaturas bajas y frecuencias de carga altas, pero muestra propiedades viscosas y plásticas a temperaturas mayores. Debido a este comportamiento, las cargas repetidas del tránsito generan deformaciones permanentes en las capas asfálticas, especialmente durante el periodo de verano.

7.3.2 Determinación de las leyes de fatiga

Los ensayos de fatiga fueron aplicados las mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) elaboradas con los siguientes cementos asfáltico: Tipo V, Tipo V +3% GCR y Tipo V +5% GCR; se sometieron a los siguientes niveles de esfuerzo: 120, 150, 200, 250 y 300 kpa y una temperatura de 20°C y para una frecuencia de 30Hz. A continuación, presentamos los datos obtenidos en laboratorio.

Tabla 7

Reporte de ensayo de fatiga mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) cemento asfáltico Tipo V modificado.

Cemento Asfáltico Tipo V Premium (0120-001)					Microdeformación ($\mu\epsilon$)
Viga	Módulo inicial (Mpa)	Ciclos de falla	Microstrain	Energía disipada acumulada (J/m^3)	
1	2.204	145.236	200	10.540	5,30
2	3.938	563.989	150	37.550	5,01
3	4.707	2.001.000	120	89.732	4,79
		1.000.000	138		4,93
Cemento Asfáltico Tipo V con adición del 3% GCR (0520-003A)					Microdeformación ($\mu\epsilon$)
Viga	Módulo inicial (Mpa)	Ciclos de falla	Microstrain	Energía disipada acumulada (J/m^3)	
1	2.265	17.028	300	3.374	5,70
2	2.650	48.596	250	7.062	5,52
3	3.433	1.417.047	150	83.836	5,01
		1.000.000	159		5,07
Cemento Asfáltico Tipo V con adición del 5% GCR (0420-007A)					Microdeformación ($\mu\epsilon$)
Viga	Módulo inicial (Mpa)	Ciclos de falla	Microstrain	Energía disipada acumulada (J/m^3)	
1	5.134	90.074	300	32.541	5,70
2	3.637	817.045	250	215.679	5,52
3	5.172	1.516.057	200	231.108	5,30
		1.000.000	227		5,42

Nota. La tabla expone los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la fatiga. Fuente. elaboración propia a partir del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 450-13

Al analizar cada las fórmulas de trabajo de las mezclas asfálticas de alto modulo (MAM-25) preparadas para esta investigación para los cálculos se logró más de 1.000.000 de ciclos de falla, lo que indica es que requiere mayor energía disipada acumulada, nivel de esfuerzo más bajo de la prueba y menores deformaciones. Con ello se puede inferir que a mayor sea el nivel de esfuerzo utilizado en la prueba, mayor será la deformación y menor será la energía disipada acumulada y el número de ciclos de falla.

Tabla 8

Ensayo de fatiga flexión en 4 puntos

Ensayo	Características	MAM-25 + C.A.M Tipo V		
		Tipo V Premium (0120-001)	Tipo V + 3% GCR (0520-003A)	Tipo V + 5% GCR (0420-007A)
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos	Deformación esperada para el millón de ciclos ($\mu\epsilon$)	138	159	227
	Logaritmo natural (deformación esperada para el millón de ciclos) ($\mu\epsilon$)	4,93	5,07	5,42

Nota. Presenta los resultados de fatiga respecto al ensayo de flexión en 4 puntos. Fuente propia a partir del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 450-13

De acuerdo con los resultados obtenidos para evaluar resistencia a la fatiga de las MAM preparadas, se puede establecer que a mayor porcentaje de GCR, mayor es el número de ciclo de falla que puede soportar la mezcla asfáltica, tal como se puede observar en la tabla 9.

Tabla 9

Esfuerzo y deformaciones esperada para el 1.000.000 ciclo de falla en las mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) cemento asfáltico Tipo V modificado (temperatura del ensayo 20°C y para una frecuencia de 30Hz)

Ensayo	Características	MAM-25		
		Cemento Asfáltico Tipo V Premium (0120-001)	Cemento Asfáltico Tipo V con adición del 3% GCR (0520-003A)	Cemento Asfáltico Tipo V con adición del 5% GCR (0420-007A)
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos	Esfuerzo esperado para el millón de ciclos (kpa)	138	159	227
	Microdeformación (deformación esperada para el millón de ciclos) ($\mu\epsilon$)	4.93	5.07	5.42

Nota: Ley de fatiga utilizando el ensayo de flexión en viga de 4 puntos para conocer de vida a la fatiga de mezclas asfálticas

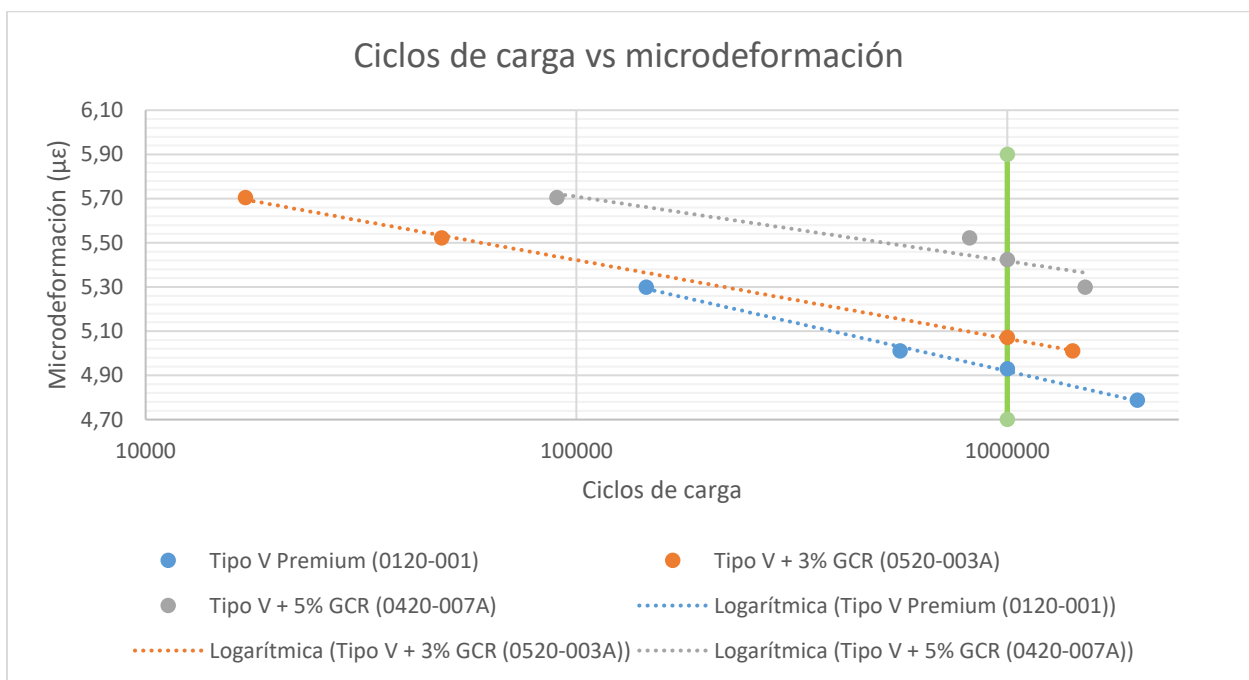
Nota. Expone los resultados de fatiga respecto al Esfuerzo y deformaciones esperada para el 1.000.000 ciclo de falla.

Fuentes: Elaboración propia a partir del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 450-13

A continuación, en la siguiente figura, se presenta los resultados de la vida a la fatiga generados en las mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) preparadas con cemento asfálticos modificados (Tipo V Premium, Tipo V con la adición del 3% GCR y Tipo V con la adición del 5% GCR).

Figura 10

Gráficas ensayo de fatiga mezclas asfálticas de alto módulo (MAM-25) cemento asfáltico Tipo V modificado, ensayadas a una temperatura de 20°C y a los diferentes niveles de esfuerzo utilizados fueron 120, 150, 200, 250, 300 kpa



Nota. La figura presenta los resultados de la resistencia a la fatiga respecto a los niveles de esfuerzo utilizados

Fuente. Elaboración propia a partir del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 450-13

8. Análisis de resultados

El presente apartado expone los análisis de los resultados obtenidos en las diferentes fases del estudio, para identificar los principales elementos que conducen a las conclusiones y recomendaciones. En primera instancia se analizan aspectos respecto a la caracterización de los materiales, seguidamente se fórmula el diseño de la MAM con y sin GCR de trabajo y finalmente se analizan aspectos relacionados con los parámetros de desempeño: módulo resiliente y fatiga.

8.1 De la caracterización de los materiales

El material caracterizado proveniente de la cantera Arroyo de Piedra, localizada en el Municipio de Luruaco (Departamento del Atlántico), un lugar ampliamente reconocido en la región que ofrece materiales compuesto por calizas fosilíferas, (Bueno, 1970). Así mismo, Caro et al. (1985) describe estas como aquellas rocas constituidas por arrecifales, margas y calizas detríticas, aflorantes que tradicionalmente, han sido utilización en la preparación de mezclas asfálticas aplicadas en las redes viales a nivel regional.

En este sentido, el análisis granulométrico, fue de gran importancia para el estudio porque define las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, como su rigidez, resistencia, integridad estructural y durabilidad entre otros. Por ende, con las consideraciones adoptadas para seleccionar la fórmula de trabajo, se obtuvo la curva de distribución granulométrica del material pétreo, la cual evidencia las condiciones favorables de máxima densidad y distribución uniforme mínimo de los vacíos, con lo cual se evita el flujo del cemento asfáltico hacia la superficie, especialmente cuando la mezcla esté sometida a altas temperaturas, evitando afectaciones a la capa de rodadura.

Estos hallazgos guardan coincidencia con los resultados obtenido por Delgado (2016), quien pudo establecer en uno de sus estudios que la combinación o gradación del agregado en las mezclas asfálticas afecta significativamente el desempeño del pavimento. Así mismo, el autor menciona que, en gradaciones densas, una gradación razonable que presente valores de Vacíos en el agregado mineral (VAM) adecuados, mejora la resistencia a la degradación durante la construcción y bajo el tráfico y mejora la resistencia a la falla por fatiga cuando se usan en pavimentos de espesor grueso.

En lo que refiere a la morfología, el agregado sujeto de análisis presenta textura rugosa, con morfología angular, semi-angular y un buen porcentaje de caras fracturadas, lo cual representa

un aspecto favorable, pues como se estableció Acevedo (2021), esta característica promueve la adherencia a la película de asfalto, brindando buenas propiedades para la obtención de vacíos y por ende permite un mejor funcionamiento de la mezcla. Por ello, controlar los vacíos mediante la utilización de diversos tamaños de agregado como sucedió en el estudio, permite obtener una curva granulométrica bien gradada, así como la densidad requerida, cuya potencia se ubicó alrededor de 0.45.

A partir de las características antes descritas, se puede inferir que estos agregados pueden contribuir favorablemente a la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica, toda vez que la textura de las rocas ofrece formas elevadas, manifiestas en crestas alargadas que alcanzan los materiales usados en construcción (5 en la escala de Mohs). Estos resultados guardan concordancia con los hallazgos obtenidos por Reyes y Zapata (2011) quienes lograron determinar que las gravas y arenas de la cantera de Arroyo de Piedra, son apropiadas para la construcción de pavimentos, en la medida que están conformada por niveles de calizas arrecifales (bioesparíticas y lodolitas calcáreas) y detríticas intercalada con margas, propiedades que promueven resistencia a dejarse romper, desgarrar o doblar por la acción de un esfuerzo (Reyes y Zapata, 2001).

En lo que refiere los agregados finos, la forma y textura de los materiales analizados, expresada en alta angularidad, así como contenidos mínimos de partículas esféricas, lo cual resulta favorable para la preparación de mezclas de Alto modulo, toda vez que promueve una mejor distribución de vacíos, pero sobre todo una mayor adherencia al cemento asfáltico. Estos hallazgos guardan relación con los resultados obtenidos por Gómez et al (2016), quienes lograron demostrar que los agregados de mayor adherencia al cemento asfálticos son aquellos provenientes de canteras y que se obtienen mediante la trituración de la piedra, dado que responden mejor a los fenómenos climáticos, como pluviosidad y la fricción diaria de los vehículos con la película de asfalto, evitando quedar expuesto a la intemperie, además de proporcionar mayor agarre de los neumáticos de los vehículos sobre la capa de rodadura.

En lo que refiere al agregado grueso, tiene un significativo efecto en los valores de VAM de las mezclas y en el %Gmm (% de la gravedad específica teórica máxima), y por consiguiente la influencia, más bien se enfoca hacia la fuente de origen, propiedades tales como tenacidad (Resistencia a la abrasión), durabilidad (Intemperismo acelerado) y materiales deletéreos, las cuales están ligadas al tipo de falla de fisuras, baches y desprendimientos.

En este sentido las propiedades del agregado grueso se consideran favorables, al tratarse de una mezcla de alto modulo, la cual debe soportar altos volúmenes de tránsito, pues como lo expresa (Delgado 2006), las mezclas con alto contenido de agregado grueso tienen mayor dureza y resistencia en su estructura que las mezclas con alto contenidos de finos, además son resistentes al desgaste y trituración por la acción del tráfico pesado, así mismo son más resistentes a la intemperie. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede establecer que los agregados gruesos y los finos presentan características apropiadas para la elaboración de mezclas asfálticas, dado que se ajustan a las exigencias normativas.

Para definir la fórmula de trabajo, se analizó el comportamiento del cemento asfáltico base tipo V y del asfalto modificado con GCR respecto a la variación de la dosificación. En este sentido, el ensayo de penetración determinó la consistencia de los asfaltos utilizados, cuyos valores reflejan que a menor dosificación de GCR hay un aumento de la penetración, mientras que a mayor dosificación la penetración disminuye, lo que proporciona rigidez al asfalto, producto de una mayor pérdida de fracciones livianas durante su calentamiento.

En lo que refiere a la determinación del punto de ablandamiento, este parámetro representa la temperatura a la que el cemento asfáltico cambia de sólido a líquido, por lo que se considera una prueba importante para visualizar el comportamiento de la mezcla asfáltica frente a las altas temperaturas. Por ello, los resultados obtenidos en este parámetro, demuestra que la mezcla asfáltica con mayores contenidos de GCR con mayores concentraciones mejora significativamente el comportamiento del ligante frente a altas temperaturas, mientras que, a menores porcentajes, se observa menor resistencia a.

En este sentido, se puede mencionar que los asfaltos con GCR presenta menor susceptibilidad térmica dado que la penetración a 25°C arrojó un valor de 0.5, superior al asfalto Tipo V el cual se ubicó en -1.0. La disminución de este parámetro puede considerarse positivo dado que promueve mayor rigidez a la mezcla a elevadas temperaturas (resistencia al ahuellamiento) y flexibilidad a bajas temperaturas (resistencia al agrietamiento), lo que permite extender su vida útil. De igual manera, estos resultados indican que la adición de GCR mejora la respuesta de las mezclas a la penetración, dado que requiere mayores temperaturas para alcanzar un estado de fluidez.

Los resultados respecto al punto de ablandamiento antes descritos, guarda concordancia con los hallazgos obtenidos por Fernández, et al (2011), quienes manifiestan que el asfalto modificado con GCR por vía húmeda, por lo general presenta un incremento notable en su rigidez, expresado a través de la disminución de la penetración y el incremento en el punto de ablandamiento, la viscosidad, el grado de funcionamiento (PG) a altas temperaturas de servicio, entre otros. No obstante, Rondón y Reyes (2015) y (Kanabar, 2010), mencionan que el asfalto al ser un material termoplástico, su consistencia y viscosidad disminuye al incrementar la temperatura y se rigidiza al reducirla, de allí que, al ser un material viscoelástico, presenta características mecánicas de flujo y de deformación elástica, en ciertos rangos de temperatura.

Ahora bien, para determinar la recuperación elástica torsional de material asfálticos se efectuaron pruebas de inducción de la deformación angular a cada una de las muestras de los cementos asfálticos a una temperatura de 25 °C, aplicando un esfuerzo de torsión del cilindro en un eje haciendo un giro de 180° y después de 30 minutos, donde se obtuvo un valor de 45%, muy superior a la mezcla convencional. Esto indica que la mezcla modificada tendrá buena capacidad de recuperar las deformaciones que sufra después de aplicarles una carga vehicular, resultados coinciden con los estudios realizados por Angulo y Duarte (2005), quienes encontraron que los asfaltos modificados con GCR por el proceso de vía húmeda, además de cumplir satisfactoriamente con los parámetros establecidos en la normatividad vigente, también mejorar sus propiedades respecto a la recuperación elástica por torsión, la cual se vio aumentada en un 100 y 300% en comparación con la mezcla convencional.

8.2 De la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica

De igual manera, se puede precisar que, al someter a temperaturas de mezclado los cementos asfálticos con GCR, este proporciona en la mezcla MAM-25 un comportamiento mucho menos rígido bajo cargas monotónicas, comparadas con la mezcla de patrón MAM-25 preparada con cemento asfáltico tipo V. Era de esperarse dicho comportamiento, ya que, este fenómeno se vio reflejado en los resultados obtenidos en los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y gravedad específica. Por consiguiente, se puede deducir que la Estabilidad Marshall en las mezclas MAM-25 patrón presenta una mayor estabilidad con menor adición de GCR y disminuye con mayor adición de GCR. Así mismo, el valor del flujo aumenta de forma proporcional al aumento

del GCR, lo que lo convierte en agente promotor de la deformabilidad del material, debido a que existe una reducción de la rigidez (Estabilidad/Flujo) de las mezclas asfálticas en función.

En lo que respecta a la estabilidad este parámetro es de gran importancia en la mezcla MAM-25, porque promueve un comportamiento más consistente que disminuya los espacios entre el agregado, haciendo que la mezcla se desplace menos, pero a la vez sea dúctil, aumentando la resistencia al ser sometida a las cargas de los vehículos, siendo estas reiterativas sobre el mismo punto del pavimento, por lo que la mezcla asfáltica debe tener la capacidad recuperarse después de la carga. Por lo tanto, el aumento del flujo a medida que se aumentó la temperatura de exposición del asfalto puede estar relacionado al incremento de vacíos con aire (V_a) que experimentaron las mezclas que emplearon los asfaltos tratados con el contenido de 5%GCR, al ser comparado con la MAM25 patrón, preparada con cemento asfáltico tipo V, contrario a lo observado en la MAM25 preparadas con asfalto tratados con el contenido de 3%GCR en donde el flujo presento una reducción.

Por ende, la reducción en la relación Estabilidad flujo encontrada puede estar asociada a varios factores, pero en especial al fenómeno de rigidización que experimenta como la mezcla MAM-25 del proceso de oxidación y envejecimiento al cual fue sometido cuando fue tratado térmicamente. Adicionalmente, es importante resaltar que, este aumento se logra a pesar de que las mezclas fabricadas con los asfaltos tratados térmicamente desarrollaron un mayor contenido de vacíos con aire. En este sentido, se puede inferir que el cemento asfáltico se considera un material muy heterogéneo, de allí la importancia de calibrar las temperaturas hasta llegar hasta la más adecuada para su aplicación en campo, las cuales se pueden ubicar entre los 140 y 165°C, pues como se encontró en los estudios realizados por Rondón (2012), el GCR en altas proporciones tiene un gradiente térmico muy muy pequeño y puede enfriarse rápidamente.

Los resultados obtenidos en la mezcla MAM-25 con un contenido óptimo de 5.5% A 5.7%, las mezclas MAM-25 con el 3% GCR arrojan un resultado aceptable frente a los valores exigidos por las especificaciones INVIAS, cumpliendo con los rangos de estabilidad y la relación estabilidad y flujo, comparando con la exigencia para nivel de tráfico 3, con lo que se puede ver la calidad del agregado y el cemento asfáltico usado. Este resultado se aproxima a los valores obtenidos por Gómez (2019), quien encontró que al utilizar una formula con un porcentaje óptimo de 5% y 6.5% de asfalto modificado con GCR, se obtuvo mayor flujo y por ende menor estabilidad

de la mezcla en comparación con la mezcla MAM-25 patrón, lo que permitió determinar que el GCR podría afectar la fricción y la cohesión interna de la mezcla e interfiriendo en su inestabilidad.

A manera de cierre, la fórmula de trabajo contiene en gran medida la información obtenida a partir de los ensayos desarrollados anteriormente como, por ejemplo: las características de los materiales pétreos, la granulometría de la mezcla asfáltica, la temperatura de mezclado y compactación, el contenido de asfalto y la densidad de la mezcla compacta. Cabe mencionar que estos 5 parámetros son independientes del método de diseño que se utilizan y constituyen un punto referencia para reproducir en campo lo que se encontró a nivel de laboratorio.

A sí mismo, los materiales pétreos mezclados en la dosificación 20% Triturado 3/4", 30% Triturado 1/2", 20% Residuo, 15% Arena Lavada y 15% Arena Fina, cumplieron con los requerimientos en el Art. 450-13 INVIAS - 2013. Así mismo, en la MAM 25 – Tipo V, en la que se utilizó un contenido de asfalto de 5.5%, en donde se logró una estabilidad de 23.8 N, y un flujo de 3.6 mm, y una temperatura de compactación de 147°C. Sin embargo, Ladino et al. (2014), encontraron que los materiales pétreos mezclados en la proporción 50% de Arena Triturada, 30% de Gravilla Triturada ¾ y 20% de Gravilla 11/16 de Proacol cumplen con el huso granulométrico GG-1 para mezclas con asfalto-caucho (GCR). Así mismo, autor utilizó un 7% de asfalto con caucho alcanzando un flujo de 3.9 mm y una resistencia de 9.14 N, aunque cabe aclarar que fue para una mezcla tipo Gap Grade.

Cabe mencionar que el diseño de la formula mediante el método Marshall presenta algunas limitaciones para el diseño de Mezclas de alto Modulo, dado que los parámetros de estabilidad y flujo fueron calibrados para mezclas asfáltica en caliente, de granulometría densa y con tamaño máximo de una pulgada lo que permite inferir que lleva un tamaño nominal de ¾", cuyos valores no representan un punto de referencia para los encontrados en las mezclas MAM-25 preparada con GCR. En otras palabras, el método de Marshall no contempla la variación de asfalto modificado, y así se realicen los ensayos y se obtengan tales resultados, no se cuenta con un factor de comparación, además porque cada vez a parecen nuevos polímetros que permiten obtener nuevas mezclas que requiere referentes de comparación más precisos o por lo menos una actualización de estas metodologías.

Frente a este desafío, requiere una evaluación rigurosa a la fórmula de trabajo, a fin de determinar si verdaderamente cumple con las condiciones para las que fue creada, y de esta manera

se convertiría en un producto el cual daría solución a los problemas de ahuellamiento, fatiga, deterioro por humedad entre otros problemas que aquejan a los pavimentos cuando inician su fase operativa. Adicionalmente, es preciso señalar que, el éxito de una fórmula de la mezcla asfáltica no depende únicamente de los resultados obtenidos en laboratorio, sino que además se encuentra asociada a la calidad de las capas primarias como la base, súbbase y subrasante las cuales constituyen el soporte de la estructura de la capa asfáltica, de allí que la carga vertical por el paso de vehículos pesados puede deformar dicha base y se representan en la carpeta de rodadura.

8.3 De los parámetros de módulo resiliente y fatiga.

Este apartado expone el análisis de los parámetros Modulo resiliente y fatiga, a partir de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos. Ahora bien, en lo que respecta al módulo resiliente, permite estudiar la rigidez de la mezcla para deducir la manera como se comportara frente a las cargas vehiculares. En este sentido se encontró al realizar el ensayado a la MAM-25 adicionada con 3% GCR a temperatura de 20°C y a una frecuencia de carga de 10 Hz¹, el valor superó los 10.000 MPa exigidos por la normativa, mientras que la MAM -25 adicionada con el 5% solo alcanzó un valor de 8.300 MPa muy por debajo de la mezcla patrón cuyo valor se ubicó en 12.600, MPa, lo cual era de esperarse dado que el aditivo GCR conlleva a un comportamiento más flexible.

Así mismo, se puede inferir que el aumento de porcentaje de GCR reduce la estabilidad Marshall, lo cual guarda relación con los hallazgos obtenidos por Gómez (2019), quien encontró que entre más se adiciona GCR a la mezcla asfáltica, menores son los valores del módulo resiliente, debido entre otras cosas a la elasticidad que promueve este aditivo, haciendo que la mezcla se vuelva más inestable. sin embargo, mediante la realización del ensayo de módulo, a una temperatura de ensayo de 20°C con asfaltos tipo V o con la adición de 3% de GCR, se demuestra que es factible obtener mezclas de alto módulo, siempre y cuando se logre disminuir el flujo con el objeto de reducir el movimiento total o deformación en las mezclas asfálticas, que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad, además de evitar la presencia de exudación de la capa asfáltica.

¹ según los requisitos establecidos en el Art. 450 -13 INVIAS

Cabe mencionar que la temperatura también es un factor importante al momento de obtener un módulo resiliente apropiado, pues según lo hallazgos de Gómez (2019), los ensayos de las mezclas a temperaturas elevadas con repeticiones lentas (frecuencias bajas), arrojan valores muy bajos, lo que representa baja capacidad de resistencia ante los esfuerzos que se presentan internamente, por lo que es muy probable que se separen sus componentes del bitumen. En sentido contrario cuando la mezcla asfáltica de alto módulo que es preparada a menores temperaturas se comporta mejor a esfuerzos triaxiales, tanto horizontal como vertical, hasta esfuerzos torsionales (giros de llantas).

Estos resultados son muy relativos, dado que la preparación de mezclas asfálticas a altas temperaturas de 170° C para el asfalto modificado y 160°C, para material pétreo, también pueden otorgar beneficios en materia de adherencia, en el proceso de compactación, gracias a los agentes polímeros presentes en el GCR, los cuales se fijan a las partículas de los agregados pétreos aumentando la resistencia de la capa de rodadura. Sin embargo, aquí también juega un papel importante el porcentaje de adición de GCR pues, aunque se hayan mostrado buenos resultados en mezclas asfálticas con porcentajes del 10%, se evidencia que aquellas que contienen menos de un 5% podría tener mayores resultados si se tiene en cuenta el tema de la adherencia, pues como se ha demostrado en el estudio estas mezclas ensayadas a 20 ° - 10 Hertz, pueden alcanzar un módulo dinámico entre 8000 a 10.000 Mpa.

Así mismo, la adición de GCR permite franjas granulométricas favorables para un buen comportamiento de las MAM-25, en la medida que protege agregado pétreo del desgaste, evitando la deformación permanente y por ende aumentando su vida útil. Estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos por Díaz y Castro (2017), quien pudo demostrar que estas mejoras se deben principalmente a que el GCR proporciona una acción específica contra la fricción generada por las llantas al contacto con la superficie, permitiendo así incrementar la duración del material, además de ser considerado como un antioxidante, que incrementa la propiedad de refuerzo del ligante evitando su envejecimiento.

En lo que refiere al parámetro resistencia a la fatiga, Al analizar las tres (3) fórmulas en el presente trabajo se logró más de 1.000.000 de ciclos de falla, lo que indica que requiere mayor energía disipada acumulada, nivel de esfuerzo más bajo de la prueba y menores deformaciones. Con ello se puede inferir que a mayor sea el nivel de esfuerzo utilizado en la prueba, mayor será

la deformación y menor será la energía disipada acumulada y el número de ciclos de falla. En donde se resalta la mayoría que la combinación o graduación del agregado en las mezclas MAM-25 significativamente afecta el desempeño o comportamiento del pavimento. Donde las graduaciones densas, una graduación razonable que presente valores de VAM adecuados, mejora la resistencia a la degradación durante la construcción y bajo el tráfico y mejora la resistencia a la falla por fatiga.

Adicionalmente, se pudo establecer que a medida que se aumenta el volumen de GCR, también se incrementa el esfuerzo para el millón de ciclos de falla esperado y la deformación esperada para el millón de ciclos. Por lo cual, entre mayor sea el contenido de GCR, mayor será el número de ciclo de falla que es capaz de soportar la mezcla asfáltica. Por lo tanto, podemos establecer que entre mayor sea el nivel de esfuerzo utilizado en la prueba, mayor será la deformación; pero menor será la energía disipada acumulada y el número de ciclos de falla.

Por ello con los resultados obtenidos, queda claro que el GCR fue desarrollado en el proceso húmedo mejora la resistencia a la fatiga de las MAM-25 (preparadas con cemento asfáltico base tipo V), lo que hace que los módulos resilientes disminuyan, resultados que guardan coincidencia con los expuestos por Pineda (2012), quien manifiesta que este aditivo actúa como un agente inhibidor del envejecimiento, alargando la capacidad cohesiva del mismo en el tiempo, haciendo que la mezcla se vuelve más flexible a bajas temperaturas y a altas temperaturas logra ser menor plástica y aportan mucha rugosidad, una textura superficial macrorugosa que corresponde básicamente al tipo de gradación MAM-25 establecidas en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras de 2013.

9. Conclusiones

Entre las mezclas MAM-25 con GCR, preparadas con cemento asfálticos Tipo V Premium y Tipo V con la adición del 3% GCR, (0520-003A) ensayada a una temperatura de 20°C fue la que arrojó mejores resultados respecto al módulo resiliente el cual se ubica en los 10.000 Mpa y a una frecuencia de carga de 10 Hz, con lo cual se ajusta a las exigencias requeridas, por la norma INVIAS-2013. Por lo tanto, si se pudo elaborar una MAM con la inclusión de GRC.

Las mezclas asfálticas de alto módulo preparadas se observaron que a menores temperaturas se comportan mejor a esfuerzos triaxiales, tanto horizontal como vertical, hasta esfuerzos torsionales (giros de llantas) y cuando se someten a altas temperaturas con repeticiones lentas (frecuencias bajas) obtenemos módulos de capacidad de resistencia en la mezcla muy bajas ante los esfuerzos que se presentan internamente en la mezcla aumentando su elasticidad.

En el estudio realizado en las mezclas asfálticas con GCR, se refleja que hay otros factores que afectan los comportamientos mecánicos. Estos factores tienen que ver con la temperatura de reacción del asfalto y el GCR, la granulometría de los agregados y la adición de aditivos.

De acuerdo a los ensayos de caracterización realizados a los agregados pétreos provenientes de la cantera de Arroyo de Piedra (Municipio de Luruaco – Departamento del Atlántico, Colombia), con tamaño nominal de ¾", intermedio con un tamaño nominal de ½" y agregado fino, en el análisis de todas sus propiedades físico-mecánicas, cumplen de manera satisfactoria con los requisitos establecidos en las especificaciones de control para el diseño de MAM-25, dado que los resultados obtenidos se encuentran dentro de los mínimos y máximos exigidos por la normatividad colombiana INVIAS-2013, respectivamente; lo que señala finalmente que los agregados son aptos para la realización de mezclas asfálticas de alto módulo.

Al analizar las características granulométricas de los agregados, se pudo establecer mediante el Diseño de Mezclas - Método Fuller los porcentajes más apropiados de cada tipo de material pétreos son: 20% Grava ¾", 30% Gravilla ½", 20% Residuo, 15% Arena Lavada y 15% Arena Fina. Así mismo, la morfología del agregado pétreo con una textura rugosa, angulares y un buen porcentaje de caras fracturadas, favorece la obtención de vacíos, lo que da lugar a una mezcla densa que promueve los procesos de adhesión al cemento asfáltico.

El cemento asfáltico adicionado con grano de caucho obtenido de la planta de la empresa Humberto Quintero O y Cía. SCA localizada en el municipio de Barrancabermeja, presenta

importantes propiedades reológicas, permitió una mejora en los espacios de llenado, no altera la adherencia en el agregado, además de que puede evitar la humedad. Sin embargo, a medida que se adiciono el grano de caucho reciclado – GCR al cemento asfáltico Tipo V se presentó una reducción en la estabilidad Marshall y la Relación Estabilidad / Flujo y el valor del flujo se incrementa en las MAM-25.

Mediante la realización de la caracterización del asfalto Tipo V Premium, y modificado con el grano de caucho reciclado, respectivamente, y en el análisis de sus propiedades reológicas, cumplieron satisfactoriamente con las especificaciones detalladas anteriormente y, por consiguiente, describe que el asfalto Tipo V y el modificado al 3% GCR son aptos para la elaboración de mezclas asfálticas de alto modulo.

La incorporación grano de caucho reciclado al asfalto tipo V, se evidencian que las mezclas asfálticas se mejoría sus propiedades físico-mecánicas y reológicas, las mezclas modificadas tuvieron un mayor desempeño respecto a la resistencia abrasiva, (producto de las solicitaciones o cargas vehiculares) establecidas, así como del efecto de la intemperie, dándoles un mayor rango de estabilidad o máxima fuerza de soporte, hasta puede presentar una adecuada deformación de la mezcla, un aumento progresivo de su resistencia ante el desgaste y un incremento en la resistencia lateral de la mezcla (tracción indirecta), siendo las mezcla modificada óptima aquella que contiene un cemento asfáltico Tipo V y que tiene en su composición un porcentaje del 3% GCR.

La mezcla asfáltica modificada con GCR cumplió las especificaciones del método Marshall (Porcentaje de vacíos; Vacíos del agregado mineral-VAM; Vacíos llenos de asfalto-VFA; Relación filler asfalto), con un valor de estabilidad de 15.300 KN, respecto a las 23.700 KN obtenidas del resultado de la mezcla asfáltica MAM-25 con Asfalto Tipo V Premium, por consiguiente, se obtuvo un porcentaje de reducción de estabilidad del 35.44%, y una reducción en el flujo del 2.78 %. Sin embargo, la mezcla modificada con el 5% de GCR, no cumplió con las especificaciones del método Marshall, con un valor de estabilidad de 12.100 KN, respecto a las 23.700 KN obtenidas del resultado de la mezcla asfáltica MAM-25 con Asfalto Tipo V Premium, obtuvo un porcentaje de reducción de estabilidad del 48.95%, y un aumento del flujo del 30.55%.

El contenido óptimo del asfalto en la mezcla con un valor de 5.5%, los resultados tuvieron una variación del 0.00 al 3.51%, siendo un valor razonable al ser comparados.

El método Marshall presenta algunas limitaciones al momento de diseñar y evaluar las mezclas asfálticas MAM-25 modificadas con GCR, dado que desde sus orígenes no fue creada para diseñar y evaluar mezclas asfálticas con caucho, por lo que no representa un referente de comparación completo para la comparación de los valores obtenidos en los ensayos de estabilidad y flujo lo que requiere la realización de ensayos complementarios para determinar con mayor exactitud el comportamiento de la mezcla asfáltica.

En las mezclas MAM-25, preparadas con cemento asfálticos Tipo V Premium y Tipo V con la adición del 3% GCR, (0520-003A) ensayada a una temperatura de 20°C y a una frecuencia de carga de 10 Hz, fueron los que arrojaron los mejores resultados respecto al módulo resiliente; los cuales se ajusta a las exigencias requeridas, por la norma INVIAS-2013, 10.000 Mpa.

Las mezclas asfálticas de alto módulo preparadas se observaron que a menores temperaturas se comportan mejor a esfuerzos triaxiales, tanto horizontal como vertical, hasta esfuerzos torsionales (giros de llantas) y cuando se someten a altas temperaturas con repeticiones lentas (frecuencias bajas) obtenemos módulos de capacidad de resistencia en la mezcla muy bajas ante los esfuerzos que se presentan internamente en la mezcla aumentando su elasticidad.

La utilización de GCR genera un incremento de las temperaturas de fabricación y de compactación, lo que encarece el producto en comparación con la mezcla tradicional.

En el estudio realizado en las mezclas asfálticas con GCR, se refleja que hay otros factores que afectan los comportamientos mecánicos. Estos factores tienen que ver con la temperatura de reacción del asfalto y el GCR, la granulometría de los agregados y la adición de aditivos.

Ahora bien, con respecto a la hipótesis planteada al inicio del desarrollo de trabajo de investigación sobre las **mezclas asfáltica de alto módulo (MAM) modificada con grano de caucho reciclado (GCR) presenta mejor desempeño en comparación con las mezclas de alto módulo convencional (sin GCR), respecto a los parámetros de módulo y la resistencia a la fatiga.**

Podemos establecer que la preparación de la MAM-25 modificada con el 3%GCR al ser ensayada a una temperatura de 20°C y a una frecuencia de carga de 10 Hz, arrojó resultados de módulo resiliente de 11.000 MPa aproximadamente, lo cual se ajusta a las exigencias requeridas, por la norma INVIAS-2013 (10.000 MPa). Al comparar este valor de módulo con los resultados obtenidos con la mezcla patrón (MAM convencional sin GCR) cuyo valor se ubicó en 12.600 MPa aproximadamente, por lo tanto, la MAM-25 modificada con el 3%GCR no de logro superar el

valor de la capacidad de la mezcla patrón de almacenar o absorber energía sin que este experimente deformación permanente, lo cual era de esperarse dado que el aditivo GCR conlleva a un comportamiento más flexible.

Caso contrario se presentó en el parámetro de comportamiento de deformación y de fallo de materiales bajo una carga cíclica, en donde la MAM-25 modificada con el 3%GCR al ser ensayada a una temperatura de 20°C, a una frecuencia de carga de 30 Hz y se sometieron a los siguientes niveles de esfuerzo: 120, 150, 200, 250 y 300 kpa, presentaron mejores comportamiento a la resistencia a la fatiga, en vista que se logró más de 1.000.000 de ciclos de falla, lo que indica que requiere mayor energía disipada acumulada, nivel de esfuerzo más bajo de la prueba y menores deformaciones.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto en los en cuanto a los resultados obtenidos de modulo resiliente y fatiga, podemos establecer que los cumplimientos de la hipótesis se lograron en forma parcial; dependiente de los parámetros de desempeño estudiados se dio cumplimiento de las siguientes suposiciones:

- Modulo Resiente: se cumplió con el planteamiento presentado en la Hipótesis Nula.
- Resistencia a la Fatiga: se cumplió con el planteamiento presentado en la Hipótesis Positiva.

10. Recomendaciones

En lo que refiere a la caracterización de los materiales pétreos, se recomienda recurrir a buenas fuentes de material preferiblemente de cantera, ya que al ser de una misma procedencia se pueden analizar con mayor facilidad sus propiedades, algo que no ocurre con los materiales obtenidos de ríos. Así mismo, se recomienda realizar los respectivos ensayos de caracterización de las propiedades de los agregados pétreos tanto grueso como fino los cuales se va a realizar las mezclas asfálticas de alto módulo MAM-25, en vista que estas propiedades varían dependiendo de su origen y conformación de las betas en las canteras, y permitirá obtener valores reales de los materiales a utilizar.

Se recomienda, en el momento de realizar la modificación del ligante asfáltico con un equipo homogeneizador de asfaltos, tener precaución con el procedimiento a realizar, ya que el equipo girar a altas revoluciones y puede presentar salpicaduras de ligante que se encuentra a altas temperaturas. Hay que tener cuidado en el proceso de preparación del asfalto modificado (Tipo V y el Tipo V con grano de caucho reciclado – GCR), ya que se trabaja a altas temperaturas de mezclado, bordeando los 200 °C, un incorrecto proceso de mezclado conllevaría a una reacción térmica, provocando una explosión súbita, que conllevaría a daños físicos y materiales, es necesario precalentar los insumos requeridos para la preparación del betumen por separado hasta llegar a la temperatura de mezclado, evitando cualquier tipo de inconveniente.

Para el ensayo del cemento asfalto se recomienda adquirir aquella que viene con el grano de caucho ya mezclado por el fabricante, el cual cuente con un gran potencial de adherencia para que favorezca el comportamiento de desempeño de las mezclas asfáltica. Así mismo sería importante, obtener un betumen con mejores propiedades de adherencia con el agregado, de tal manera que se consiga un módulo dinámico mucho más alto, que garantice un mejor funcionamiento de la mezcla en operación.

Sería importante ejecutar el ensayo en el reómetro de corte dinámico (DSR) sería posible determinar la temperatura superior del grado de desempeño PG para el diseño óptimo y para el ligante con grano de caucho reciclado; sin embargo, y debido a la imposibilidad de adelantar el ensayo de viga a flexión (BBR), no fue posible determinar la temperatura inferior del PG. Por lo anterior, se recomienda para futuras investigaciones, adelantar estos ensayos para determinar con

certeza el intervalo de temperatura de desempeño de estos ligantes modificados con grano de caucho reciclado - GCR.

Durante la preparación de la muestra controlar la temperatura tanto de los agregados, como del asfalto ya que debe de estar a una temperatura de 170 a 178 °C si se deja enfriar la mezcla asfáltica se debe rechazar y elaborar una nueva muestra de concreto asfáltico a la temperatura adecuada. Dado que temperaturas menores, conllevaría a que la mezcla resultante sea muy viscoso y poco trabajable.

En la preparación de las briquetas, estas deben ser compactar adecuadamente, dando los golpes indicados según el tráfico requerido (para este tipo de mezcla asfáltica MAM-25, sería un tráfico alto). Dar el mismo número de golpes a ambas caras de la briketa. Mientras mayor sea el número, más altas serán las densidades obtenidas y menor el contenido de asfalto requerido.

Desmoldar las briquetas al haber transcurrido por lo menos cuatro horas, para evitar que las briquetas se disgreguen. El baño de agua debe estar a una temperatura de 60 °C.

Para el diseño y evaluación de la fórmula de una mezcla MAM-25 adicionada con grano de caucho si se recomienda la utilización de la metodología de Marshall, siempre y cuando se pueda complementar con otros ensayos de estabilidad, flujo, adherencia y ahuellamiento de tal manera que se puedan obtener una información más precisa acorde con las condiciones de encontradas en campo. Es por esto, que a los nuevos investigadores se recomienda abordar la investigación con la aplicación de la metodología Super Pave para el diseño de las MAM-25, ya que se requieren metodologías que permitan un análisis más riguroso de variables de comportamientos mecánicos y dinámico, como son: módulo dinámico fatiga y deformación plástica; además porque este tipo de mezcla asfálticas son aplicables en las infraestructuras viales que requieren soportar un alto tránsito vehicular. Así mismo esta metodología permitirá analizar con mayor fidelidad los parámetros de comportamiento de la mezcla asfáltica aún más cuando el GCR puede estar asociado problemas de fricción y cohesión interna de la mezcla.

Se recomienda el uso del 3% de grano de caucho reciclado, en mezclas asfálticas de alto modulo, elaboradas con agregados de la Cantera de Arroyo de Piedra, dado que, con la incorporación del GCR, ayudan a mejorar las propiedades de desempeño de la mezcla, como el aumento de la resistencia a la deformación, producto del incremento de la elasticidad de la mezcla,

además de un aumento de la resistencia ante procesos de ahuellamiento, producto del endurecimiento del asfalto.

Se debe tener en cuenta, el manejo y la verificación que los ensayos realizados a los diferentes agregados cumplan según las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras vigentes, que permitan obtener y controlar los resultados veraces para la investigación y que estén dentro de los límites respectivos, se recomienda el uso de las normas de ASTM y AASHTO para ser tomados como guías para la realización de ensayos, así como de lo estipulado en las ediciones del Instituto del Asfalto. Así como el manejo de las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, Bogotá: INVIAS, 2013, que nos permite corroborar los valores obtenidos de cada parámetro ensayado.

Por ello para evaluar una fórmula de trabajo de una mezcla superior a 10.000 ejes equivalentes se recomienda realizar otro tipo de ensayos de desempeño, entre las que se pueden destacar las siguientes: la susceptibilidad al daño por humedad mediante un ensayo de resistencia a la tensión indirecta, donde se requiere un mínimo de 80%, de resistencia retenida es decir que no supere un 20% de la resistencia original. Así mismo, se requiere evaluar resistencia a la deformación plástica, siendo esta otra propiedad en la mezcla asfáltica como es la susceptibilidad a la deformación permanente mediante la pista de ensayo de laboratorio a partir de la rueda de Hamburgo, el cual no debe ser superior a los 10 mm; mediante el por medio de la norma de ensayo INV E-756.

Es importante llevar a cabo evaluar la comprobación de la adhesividad entre el agregado pétreo y el ligante asfáltico, valorando la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (T.S.R), por medio de la norma de ensayo INV E-725 ensayo de tracción indirecta o “Relación de resistencias a la tensión”.

Los requerimientos de los asfaltos no son los mismos que hace 50 años, los esfuerzos y demandas a las que son sometidos actualmente son mucho mayores; es por eso, que es necesario encontrar los medios adecuados para investigar, diseñar y seleccionar correctamente los materiales para nuestras carreteras, al igual que todo, debemos adaptarnos al cambio.

11. Referencia bibliográfica

- Acevedo Cruz, N. (2021). Influencia de la forma de los agregados en la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica empleando el equipo Marshall.
- Alarcón, J. R.; Camacho, Deicy M. y Herreño, I. J. (2019). Viabilidad de uso del asfalto caucho en la región de Tunja, Colombia. <http://ww.revistaespacios.com/a19v40n34/19403412.htm>
- Angulo Rodríguez, R. A. y Duarte Ayala, J. L. (2005). *Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos*. (Tesis de Ingeniería Civil). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6916/2/118188.pdf>
- Arenas Lozano, H. L. (2011). *Tecnología del cemento asfáltico*. 5ª ed. Bogotá: Faid Editorial.
- Aristizábal Isaza, M. (2016). Evaluación técnico–económica de una mezcla asfáltica en caliente modificada con viatop plus fep.
- Askeland, D. R. (1998). Ciencia e ingeniería de los materiales. Thomson
- ASTM International (2009). Designation: D6114/D6114M-09, Standar Specification for Asphalt – rubber Binder.
- American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. (2014).
- American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. (1993). Estado del conocimiento de las mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (GCR) en Colombia.
- Bohórquez Quintero, C., y Ballesteros Bejarano, M. Á. (2016). Reutilización y transformación de llantas usadas como alternativa de mitigación del problema de contaminación ambiental en Bogotá.
- Bueno, R. (1970). Guidebook to the geology of the Tubará region, lower Magdalena Basin. In Geological Field Trips. Colombia. Col. Soc. Petrol. Geol. Bogotá.
- Caro, P., Huguett, A., Plazas, L., Vasquez, L., (1985). Convenio bilateral entre los gobiernos de Colombia y Holanda, Proyecto Prospección Hidrogeológica en los departamentos de Atlántico y Bolívar. Informe Geológico No. 1940. Ingeominas. Bogotá.

- Carlson y Zhu. (1999). Asphalt – Rubber, An Anchor to Crumb Rubber Markets, In Proceedings: Third Joint UNCTAD / IRSG Workshop on Rubber and the Environment, International Rubber Forum, México, 1999.
- Carreño Zagarra, R. y Reyes Salcedo, J. (2015). Estudio del efecto de aditivos reductores de temperaturas de trabajo, en el desempeño de mezclas bituminosas gap-graded elaboradas con asfaltos modificados con grano de caucho reciclado. Bogotá D.C.
- Colfecar. (18 de Julio de 2015). COLFECAR. Reciclaje de llantas: maximizar su vida útil y desecharlas correctamente: http://www.colfecar.org.co/ESTUDIOS%20ECONOMICO%20PDF/Informes%20Especiales/2015/1.%20ENERO%202015_%20INFORME%20Reciclaje%20de%20llantas.pdf
- Cooley, L.A James, R.S. 2003. Micro Deval Testing of Aggregates in the Southeast. Transportatios Research Resord, 183773-79.
- Conejo Poveda. D.H., y Vargas Camacho. S. (2017). Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas de concreto asfáltico tipo 2 (mdc-19) con adición de polímeros.
- Contreras, N. y Granados, J. (2008). *Aditivos para producir mezclas asfálticas de alta resistencia a la deformación permanente, controlando el escurrimiento de asfalto: Stone Matrix (mastic) asphalt con adición de fibras de caucho reciclado.* (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas.
- Coria Gutiérrez, C., Hernández Domínguez, R. I. y Garnica Anguas, P. (2018). Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista. documento técnico, (72). <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt72.pdf>
- Corona Rojas, C. F. (2017). Determinación de módulo de rigidez y caracterización de módulo dinámico de mezcla superpave. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/14002/3560900231445UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chávez Roldán, I. (2013). El perfeccionamiento de los cementos asfálticos. Obtenido de: http://www.camohesa.com/el_perfeccionamiento_de_los_cementos_asfálticos1.html.
- Delgado Alamilla, H., Garnica Anguas, P., Villatoro Méndez, G. M., y Rodríguez Oropeza, G. (2006). Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla

- asfáltica. México D.F.: IMT. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt299.pdf>
- Díaz Claros, C. M y Castro Celis. L. C (2017) implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá. <file:///D:/MI%20PC/USUARIO/Desktop/PROYECTO%20ASFALTAO/antecedentes/Diazcesar2017.pdf>
- Durango Agudelo, E. A. (2016). *Relación entre infraestructura vial y desarrollo económico en los municipios de Antioquia: aplicación espacial*. (Doctoral) Universidad EAFIT.
- El país. (2013). El mal estado de las vías en Colombia, generan 35% en sobrecostos a transportadores. <https://www.elpais.com.co/economia/mal-estado-de-vias-en-colombia-generan-35-en-sobrecostos-a-transportadores.html>.
- Enríquez, J., y Moncayo, C. (2012). Caracterización física de los agregados pétreos de la cantera Agresur vereda San José Municipio de Funes, departamento de Nariño y obtención del porcentaje óptimo de asfalto para el diseño de la mezcla asfáltica mediante el “Método Marshall” (Doctoral dissertation, Universidad de Nariño).
- Garzón, E. y Cárdenas, A. (2013). Variación de temperatura de los componentes de una mezcla densa en caliente tipo 3 con cemento asfáltico 80-100. Universidad Católica de Colombia. Colombia, Bogotá.
- Granados, J. (2017). Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso por vía seca respecto a la mezcla asfáltica convencional. (Tesis) Universidad Ricardo Palma. Lima.
- Gómez Vargas, E. (2019). *Análisis del comportamiento mecanismo de una mezcla asfáltica modificada con grano de caucho*. (Bachelor's thesis) Universidad Pontificia Bolivariana. <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8281/39036.pdf?sequence=1>
- Gómez Hernández, J. M., y Solano Gómez, D. H. (2016). Determinación del agregado fino (agregado de río o agregado de peña) con mayor adhesividad al ligante asfáltico.
- Guzmán G, Gómez L, Serrano S. (2004). Geología de los Cinturones Sinú – San Jacinto y borde occidental del valle inferior del Magdalena. Un mapa escala 1: 300.000. INGEOMINAS – Université de Liège. Belgique.

- Hernández Sampiere, R., Fernández Collado, C y Baptista Lucio, P. (2006). Metodología de la investigación sexta edición, Edit. Mac Graw Hill. México.
- Heshmat A. (1997). Polymer Modifiers for Improved Performance of Asphalt Mixture. En: Usmani, A. M. (ed). Asphalt science and technology. New York: Marcel Dekker, Inc,
- Instituto de Desarrollo Urbano- IDU. (2002). Estudio mecánico de mezclas asfálticas con desechos de llantas. https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf
- Instituto de Desarrollo Urbano - IDU (2014). Anexo Técnico de Diagnostico para la conservación de la malla vial para Bogotá. Dirección Técnica Estratégica – Área de Investigación y Desarrollo Área Geomatic6, versión 2.
- Instituto Nacional de Vías "INVIAS" (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, Bogotá: INVIAS.
- Kalgin Y., & Strokin A. (2016). The fatigue durability of the modified asphalt concrete under the effect of intensive traffic loads. Vol. 11. https://www.exeley.com/transport_problems/pdf/10.20858/tp.2016.11.2.5
- Karacasu, M., Okur, V., & Er, A. (2015). A study on the rheological properties of recycled rubber-modified asphalt mixtures. The Scientific World Journal, 2015.
- Ladino Rubio, L., Rosas Ramírez, J. P. y Ramírez Villamizar, A. (2014). Diseño mezcla asfáltica asfalto caucho tecnología gap grade 1 diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap graded para la ciudad de Bogotá. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Especialización en Ingeniería de Pavimentos. Bogotá D.C. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1743/1/Dise%C3%B1o-mezcla-asf%C3%A1ltica-asfalto-caucho-tecnolog%C3%ADa-Gap-Grade.pdf>
- Londoño C. (1991). “Funcionamiento de los pavimentos”, Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC), Notas técnicas, Serie 4 No. 23, Medellín Colombia.
- López Contreras Yuly Fernanda 2017. Fuerzas de adhesión en mezclas asfálticas a escala nanométrica. C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro [online]., vol.7, n.1, pp.59-72. ISSN 0122-5383.
- Loria, L. G. (2003). Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas asfálticas en caliente. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos

- Estructurales, LANAMME. Universidad de Costa Rica – Costa Rica, p.3
- Malaver, C. (26 de septiembre, 2014). Las llantas en desuso, las nuevas invasoras del espacio en Bogotá. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14594218>
- Martínez, G., B. Caicedo., González, D., Celis, L., y Fuentes, V. Torres (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. <file:///D:/MI%20PC/USUARIO/Desktop/PROYECTO%20ASFALTAO/antecedentes/0718-5073-ric-33-01-00041.pdf>
- Martínez Ortiz, J. A. (2017). Revisión Bibliográfica para el Análisis de los Impactos Ambientales Generados por la Extracción de Material de Arrastre en Cuerpos de Agua – Caso de Estudio: Rio Purnio. <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1845/Jos%C3%A9%20Arturo%20Martinez%20O.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mashaan, N. S., Karim, M. R., Abdel Aziz, M., Ibrahim, M. R., Katman, H. Y., & Koting, S. (2014). Evaluation of fatigue life of CRM-reinforced SMA and its relationship to dynamic stiffness. *The Scientific World Journal*.
- Ministerio de Ambiente. (2017, 30 de enero). Pos consumo de las llantas. <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>
- Nguyen, H. T., & Tran, T. N. (2018). Effects of crumb rubber content and curing time on the properties of asphalt concrete and stone mastic asphalt using dry process. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(3), 236-244.
- Olarte Riaño, B. N., Higuera Sandoval, H. C., y Soler Sánchez, R. D. (2019). Efecto del grano de caucho reciclado en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12. *Respuestas* Vol. 24. N° 1. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1810>
- Orellana Orellana Jordi René (2019). Dosificación óptima en pavimento flexible de asfalto y caucho reciclado utilizando materiales de la región. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33528/1/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n.pdf>
- Ordóñez, C. I., (2008). Controle neotectonico de diapirismo de lamanaregio de Cartagena,

- Colombia. Tesis de maestría presentada a la Universidad Federal Fluminense, Área de Geología y Geofísica Marina. 208 p. Brasil.
- Padilla, A. (2004). Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Parra y Cepeda. (2012). “Variación de las propiedades dinámicas de las mezclas elaboradas con asfaltos colombianos 60-70 y 80-100, después de ser sometidas a procesos de envejecimiento de corto plazo” <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/2585/ParraMedinaAlvaroOswaldo2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Peláez Arroyave, Velásquez y Giraldo Vásquez. (2017). Adicionalmente otras aplicaciones con menos potencial de volumen consumido de este material son las construcciones civiles, especialmente en los asfaltos, concretos y materiales aislantes para construcción liviana.
- Pineda Rodríguez Y. A. y Reyes Moreno F. A. (2012). Mezclas asfálticas drenantes modificadas con granos de caucho. <file:///D:/MI%20PC/USUARIO/Desktop/PROYECTO%20ASFALTAO/antecedentes/00000377.pdf>
- Ramírez Villamizar. A., Ladino Rubio, I, L y Rosas Ramírez, J.P. (2014). Diseño mezcla asfáltica asfalto caucho tecnología gap grade el diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap graded para la ciudad de Bogotá <file:///D:/MI%20PC/USUARIO/Desktop/PROYECTO%20ASFALTAO/antecedentes/Dise%C3%B1o-mezcla-asf%C3%A1ltica-asfalto-caucho-tecnolog%C3%ADa-Gap-Grade.pdf>
- Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. (Tesis de Ingeniería Civil). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. Recuperado de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2006/ramirez_n/sources/ramirez_n.pdf
- Razmi, A., & Mirsayar, M. M. (2018). Fracture resistance of asphalt concrete modified with crumb rubber at low temperatures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(3), 265-273.
- Rebolledo. (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Universidad Austral de Chile.

- Reyes, G. y Zapata, G., 1996. Geología de la Plancha 24, Sabanalarga. Ingeominas. Informe Interno, 60 p. Bucaramanga.
- Rodríguez Torres. (2014). Caracterización de mezclas bituminosas abiertas empleando como aditivo fibras procedentes de residuos de envases Brik.
- Rodríguez Rodríguez, B. S. (2021). Plan de negocio para la conformación de una empresa dedicada al reciclaje de neumáticos usados en el área metropolitana de Cúcuta.
- Rodríguez Rosas, C. (2013). *Análisis del transporte de carga en Colombia, para crear estrategias que permitan alcanzar estándares de competitividad e infraestructura internacional* (Doctoral). Universidad del Rosario.
- Romero y Gómez. (2002). Romero, C., & Gómez, A. (2002). Propiedades físicas y químicas de asfaltos colombianos tipo Barrancabermeja y de sus respectivas fracciones de asfáltenos. revista de la academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales, 26(98-101), 127.
- Rondón, H. A. y Reyes, F. A. (2009). Influencia de las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá sobre el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica. Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 24 (2). Pp. 195-207.
- Souliman, M. I., & Eifert, A. (2016). Mechanistic and economical characteristics of asphalt rubber mixtures. *Advances in Civil Engineering*.
- Yepes Piqueras, V. (2014). Evolución histórica de la fabricación de mezclas bituminosas. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Vargas, X. A. (2004). La Formación de Asfáltenos y su Contribución a las Propiedades Reológicas de las Fracciones Pesadas del Petróleo Sometidas a Termo-oxidación Natural (Doctoral dissertation. (Tesis). Universidad Industrial de Santander. para optar el título de Magíster en Ingeniería Química.
- Villalta, M., y Figueroa, R. (2017). *Comparativa entre el módulo de resiliencia y el módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente diseñadas por el método marshall en el salvador, Centroamérica. (Trabajo de grado)*. Universidad de El Salvador, Santa Ana, El Salvador.