

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA OBTENIDA MEDIANTE UN ENSAYO DE  
FLEXIÓN BAJO CARGA MONOTÓNICA EN ESPECÍMENES DE MEZCLA  
ASFÁLTICA REFORZADA CON GEOMALLAS.**

**OSCAR DAVID ARIAS MATEUS  
CARLOS SANTIAGO CÁRDENAS CHÁVEZ**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ  
2019**

**2019 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA OBTENIDA MEDIANTE UN ENSAYO  
DE FLEXIÓN BAJO CARGA MONOTÓNICA EN ESPECÍMENES DE MEZCLA  
ASFÁLTICA REFORZADA CON GEOMALLAS.**

**OSCAR DAVID ARIAS MATEUS  
CARLOS SANTIAGO CÁRDENAS CHÁVEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero civil**

**Director  
JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS  
Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ  
2019**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, 29 de abril de 2019



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia Oscar Arias, Dora Mateus y Sofia Arias  
*Por apoyarme y guiarme en el proceso de formación.*

A mis padres Santiago Cárdenas y Luz Stella Chávez.  
A mi esposa e hijo, Sandra Delgado y Martin Gabriel  
A mi tío Fernando Cárdenas  
*Por su amor y constante compañía en mi proceso académico.*

A la Universidad Católica de Colombia  
*Al departamento de ingeniería por prestarnos sus establecimientos, recursos y acompañamiento, para la elaboración del trabajo investigativo presentado.*  
A la empresa Pavimentos e Infraestructura S.A.S  
*Por prestarnos sus establecimientos y equipos, para realizar los ensayos respectivos.*

A Juan Carlos Ruge  
*Por acompañarnos y orientarnos en la elaboración del presente proyecto.*

A compañeros y amigos.

## 1. Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	12
2.	ANTECEDENTES Y LIMITACIONES.....	13
2.1	ANTECEDENTES .....	13
2.2	LIMITACIONES .....	16
3.	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
3.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	17
3.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	19
4.	JUSTIFICACIÓN .....	21
5.	MARCO TEÓRICO.....	22
6.	ESTADO DEL ARTE .....	25
7.	OBJETIVOS .....	33
7.1	GENERAL .....	33
7.2	ESPECÍFICOS .....	33
8.	METODOLOGÍA.....	34
9.	EQUIPOS .....	35
9.1	Equipo para la elaboración del ensayo con carga monotónica.....	35
9.2	Equipos para la elaboración de especímenes de asfalto. ....	36
9.3	Equipo para medición de deformación. ....	37
9.4	Herramientas de mano. ....	37
10.	MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DE VIGAS ASFÁLTICAS 37	
10.1	ASFALTO 60-70 .....	37
10.2	AGREGADO FINO .....	37
10.3	AGREGADO GRUESO .....	37
10.4	GEOMALLA BIAXIAL .....	37
11.	DISEÑOS DE MEZCLA.....	39
11.1	Mezcla asfáltica con el 5% y 5.5% de asfalto .....	39

11.1.1	Granulometría para contenido de asfalto del 5% y 5.5% de asfalto} .....	39
12.	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA .....	40
13.	ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES PRISMÁTICOS .....	41
14.	ELABORACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	42
14.1	Ensayo a flexión bajo carga monotónica .....	43
14.1.1	Montaje del equipo .....	44
15.	RESULTADOS .....	45
15.1	Resultados de laboratorio.....	45
16.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	49
16.1	ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA MEZCLA 49	
16.1.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS .....	49
16.1.2	VOLUMEN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	50
16.1.3	CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-19.....	51
16.2	DESCARTE DE INFORMACIÓN.....	52
16.2.1	Ensayo de flexión bajo carga monotónica .....	52
16.3	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS .....	52
16.4	TEMPERATURA DE LA MEZCLA.....	52
16.5	DEFORMACIÓN DE LAS VIGAS .....	53
16.6	RESUMEN DE RESULTADOS .....	53
16.6.1	Resultados de especímenes de 10 cm de espesor con contenido asfáltico de 5% con refuerzo con geomalla a un tercio inferior de la base de la viga. ....	54
16.7	FALLA EN LA VIGAS .....	57
17.	CONCLUSIONES.....	62
18.	RECOMENDACIONES .....	63

## LISTA DE FOTOS

Foto 1. Fallas en el asfalto .....	15
Foto 2. Esquema carpeta asfáltica y geomalla .....	16
Foto 3. Montaje equipo para aplicación de carga .....	35
Foto 4. Molde metálico para vigas .....	36
Foto 5. Geomalla biaxial .....	38
Foto 6. Elaboración de especímenes de asfalto reforzado con geomalla.....	41
Foto 7. Especímenes prismáticos para ensayar .....	43
Foto 8. Ensayo a flexión bajo carga monotónica .....	44
Foto 9. Ensayo a flexión bajo carga monotónica .....	45
Foto 10. Ensayo a flexión bajo carga monotónica 5.50 % asfalto.....	46
Foto 11. Fallas de las vigas .....	47

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Material primas para la elaboración de especímenes .....	37
Tabla 2. Granulometría Asfalto 5% .....	39
Tabla 3. Muestras de asfalto.....	42
Tabla 4. Resultados de laboratorio vigas con contenido de asfalto de 5.0 % .....	45
Tabla 5. Resultados de laboratorio vigas con contenido de asfalto de 5.5% .....	46
Tabla 6. Ensayo a flexión bajo carga monotónica 5.0 % asfalto.....	47
Tabla 9. Caracterización básica de los agregados .....	49
Tabla 10. Volúmenes mezcla asfáltica 5.0% .....	50
Tabla 11. Volúmenes mezcla asfáltica 5.5% .....	51
Tabla 12. Caracterización de asfalto 60-70 .....	51
Tabla 13. Resumen de resultados .....	53
Tabla 14. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 1 (MDC-19 CA 5.0 %) .....	54
Tabla 15. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 2 (MDC-19 CA 5.0 %) .....	54
Tabla 16. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 3 (MDC-19 CA 5.0 %) .....	54
Tabla 17. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 4 (MDC-19 CA 5.0 %) .....	55
Tabla 18. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 5 (MDC-19 CA 5.5 %) .....	55
Tabla 19. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 6 (MDC-19 CA 5.5 %) .....	55
Tabla 20. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 7 (MDC-19 CA 5.5 %) .....	56
Tabla 21. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 8 (MDC-19 CA 5.5 %) .....	56
Tabla 22. Resumen de resultados .....	56
Tabla 7. Distancia entre la línea de fractura y el soporte más cercano (a) (cm) 5% asfalto. ....	57

Tabla 8. Distancia entre la línea de fractura y el soporte más cercano (a) (cm)  
5.5% asfalto. ....57

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Piel de cocodrilo (PC unidad de medida metros cuadrados). .....	18
Ilustración 2. Fisura longitudinal.....	18
Ilustración 3. Ahuellamiento .....	19
Ilustración 4. Diagrama de estructura de las muestras .....	40
Ilustración 5. Esquema del ensayo .....	43

## 1. INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica como parte fundamental de la estructura del pavimento, está sometida a diferentes cargas mecánicas y fenómenos intrínsecos de los cuales dependerá su desempeño durante su vida útil, durante el proceso de diseño y construcción se llevan a cabo diversos ensayos a la mezcla con el fin conocer su resistencia. Normalmente se utiliza la metodología de fisuración por fatiga en el laboratorio el cual se mide en vigas a flexión aplicando un indeterminado número de esfuerzos sobre las muestras hasta la falla de la mezcla.

Para la evaluación de la resistencia mecánica bajo carga monotónica a vigas de mezcla con un refuerzo adicional a tres cuartos de la base de geomalla biaxial. Se busca principalmente relacionar el nivel de carga obtenido en el ensayo con la deformación de los especímenes, que conlleva a la falla.

Se realizará el ensayo en especímenes de mezcla asfáltica debido a su gran uso en la ingeniería de pavimentos por su particular flexibilidad en el uso y que por ello se elige en zonas de constante movimiento con suelos variables que están susceptibles a alteraciones de tal forma que se evita el rápido resquebrajamiento y se beneficia de su buena resistencia y las geomallas biaxiales de poliéster de alta tenacidad, diseñadas para reforzar y controlar el reflejo de agrietamientos en capas de concreto asfáltico.

La investigación se requiere conocer la respuesta de la mezcla asfáltica ante una carga monotónica se dispuso de 16 vigas de mezcla asfáltica divididas en dos grupos con dos porcentajes de contenido asfáltico, de iguales características físicas y refuerzo con geotextil. Sin entrar en consideraciones físicas complejas, de acuerdo con los anterior se plantea realizar un ensayo donde se varían diferentes aspectos, desde la elaboración y especificaciones de los especímenes hasta la falla.

## 2. ANTECEDENTES Y LIMITACIONES

### 2.1 ANTECEDENTES

En las investigaciones previas, las encontradas respecto a la resistencia a flexión de mezclas asfálticas tal es el caso de la investigación de la influencia de capsulas de café recicladas en la resistencia a flexión en mezclas asfálticas se estimó el comportamiento a flexión de una mezcla asfáltica, por los métodos de máxima deformación y carga máxima soportada por un espécimen, debido a la falta de ensayos estandarizados que permitieran obtener de manera confiable estos dos comportamientos se optó por diseñar un ensayo en donde usaron una viga prismática, sometida a cargas puntuales monotónicas.

Un gran número de estudios se centran en los resultados por fatiga del material, aunque este no es el fin de esta investigación se analizara en este aparte los antecedentes más importantes del tema abordado. La fisuración en pavimentos de mezcla asfáltica acaece de forma progresiva, causando daños estructurales, llevando el material a fallas incipientes. Estas fallas generalmente están controladas por la fatiga del material y fisuras de tipo térmico por baja temperatura, factores que se consideran los más críticos en procesos de diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos flexibles.

El crecimiento de la utilización de los geosintéticos en la rehabilitación de pavimentos flexibles se ha visto incrementado de forma considerable desde la década de los años setenta. Estos materiales presentan una serie de ventajas que motivan su gran demanda en la actualidad. La utilización de geosintéticos en la rehabilitación se basa en su capacidad de resistir deformaciones, atenuando las fisuras y grietas que pudiesen presentar los pavimentos flexibles. Se han realizado dos experiencias en laboratorio para simular el proceso de puesta en obra de los geosintéticos en la zona de Inter capa. El procedimiento consiste en verter sobre el geosintético extendido, una capa de mezcla bituminosa en caliente comprendida entre 135 - 165 °C. El análisis térmico de los resultados obtenidos avala significativamente al material poliéster (PS), con respecto al polipropileno (PP), en futuras aplicaciones de rehabilitación de pavimentos flexibles.

Giroud-Han es un método de diseño que trabaja principalmente con el interlocking, que en otras palabras sería el confinamiento generado entre las geomallas y la capa de material que se encuentra sobre esta. Los suelos al ser sometidos a cargas de llantas tienden a deformarse, generando un ahuellamiento sobre la superficie de rodadura. Al tener un refuerzo con geomalla en el suelo este ahuellamiento se reduce de manera exponencial, esto se debe a la fricción.

Entre los ensayos más reconocidos para la validación de geomallas triaxiales, encontramos el APLT (Automated Plate Load Test); siendo uno del sistema

patentado para realizar la carga mediante placas totalmente automatizadas de forma estática y repetitiva sobre el suelo, el ensayo está realizado bajo los estándares AASHTO, ASTM y normas europeas, para medir el efecto de la inclusión de la geomalla triaxial en la capa base de la pavimentación. Los resultados obtenidos por el APLT se relacionan con otros ensayos como el penetrómetro de cono dinámico (DCP) y la relación de soporte de California (CBR). De igual manera estos ensayos se relacionan con los parámetros de entrada de diseño para la comparación con la in situ.

Otro de los ensayos realizados para la validación de geomallas es el uso de Smart Rock. Este es un método de ensayo cuyo principal objetivo es determinar el movimiento que se da en las partículas de agregado grueso (grava) ubicado sobre la geomalla triaxial. Estas rocas poseen sensores internos capaces de modelar por medio de un programa computacional, el movimiento que se genera en las rocas al aplicarle la carga que simula el paso del tren. (Galindo, 2017)

Los Ensayos Acelerados de Pavimentos (APT), son una técnica aplicada para el análisis estructural de pavimentos. Este ensayo consiste en simular la carga debido al tráfico que actuaría sobre la vía, la carga se aplica de manera repetida, acelerada y controlada, para determinar la respuesta de este y evaluar el daño existente en periodos más cortos de tiempo. El APT permite determinar las deformaciones presentes en secciones de prueba, de esta manera se hace la comparación entre un suelo sin estabilizar y otro utilizando este geosintéticos.

La fatiga es uno de los criterios de deterioro considerados para el diseño de pavimentos asfálticos y puede ser evaluada a través de ensayos de laboratorio. Entre los ensayos utilizados para evaluar la resistencia a la fatiga se encuentran el ensayo de tensión-compresión, flexión en cuatro puntos, fatiga trapezoidal entre otros. Asimismo, existen diversos criterios para determinar la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica; Mayra Flores expone algunos criterios para determinar la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas los cuales son:

- Criterio clásico de fatiga: En el criterio clásico, la probeta se considera en “ruptura” si su módulo llega a la mitad de su valor inicial medido en el ciclo cincuenta de carga bajo las mismas condiciones de ensayo (misma temperatura y frecuencia). La vida útil  $N_f$  es entonces el número de ciclos correspondientes a un módulo de rigidez igual a la mitad de su módulo inicial.
- Criterio de ruptura: Este criterio considera el valor de  $N_f$  como el número de ciclos al momento de la ruptura de la probeta. Este criterio es menos utilizado que el criterio clásico ya que este fenómeno solo se presenta en ensayos en modo de fuerza.
- Criterio de la curva de Weibull: Este criterio propone presentar el ensayo de fatiga en los ejes  $[\ln(\ln(N)) - \ln(-\ln(SR))]$ . La curva obtenida es denominada “la curva de Wiebull” [06]. En esta representación, SR es definida como la relación entre el módulo de rigidez en el ciclo N (EN) y el módulo inicial (E0).

- Enfoques en términos de daños: El daño es considerado como una degradación progresiva de las propiedades mecánicas del material hasta su ruptura.

En cuanto a ensayos de deflexión del pavimento se han llevado a cabo diferentes pruebas alrededor del mundo con ensayos no destructivos como lo son los dispositivos que simulan características de carga de tráfico, la magnitud y la variación del tiempo conocidos como: (FWD y HWD), en Colombia estas prácticas no destructivas en los pavimentos son utilizadas por consultorías para diseño y recuperación del pavimento. tal como lo expone G. Beltran and M. Romo en su investigación *Assessing artificial neural network performance in estimating the layer properties of pavements*, donde se explica el comportamiento y características de estos ensayos que funcionan con dispositivos que aplican una carga de impulso a través de una masa en caída libre sobre la placa circular colocada en la carpeta asfáltica y una serie de golpes registrando por varios sensores ubicados a diferentes distancias desde el punto de impacto, donde mediante ondas de impacto se define la deflexión máxima producida. Estos métodos no son de mucha ayuda cuando el pavimento ha cumplido con su vida útil o el desgaste de este es demasiado alto.

En las mezclas asfálticas las repeticiones de carga inducen la generación de micro - fisuras en el extremo inferior de la carpeta asfáltica de un pavimento flexible. La acumulación con la repetición de dichas cargas, generan fisuras mayores que se propagan de manera ascendente hacia la parte superior de la carpeta asfáltica, en donde se reflejan de forma paralela en el sentido del tráfico, que terminan formando piezas angulares conocidas como “piel de cocodrilo”.

Foto 1. Fallas en el asfalto



Fuente. Elaboración propia

## 2.2 LIMITACIONES

Se debe tener en cuenta que el ensayo propuesto no está normalizado y se relaciona fuertemente de la investigación realizada por Millan y Ramirez quienes lograron diseñar un ensayo de laboratorio que induce la ruptura de un espécimen de mezclas asfálticas (MDC-19 y MDC-25), modificando los paramentos, tanto en el ensayo y la muestra entendiendo el efecto de una carga monotónica sobre el material bajo análisis.

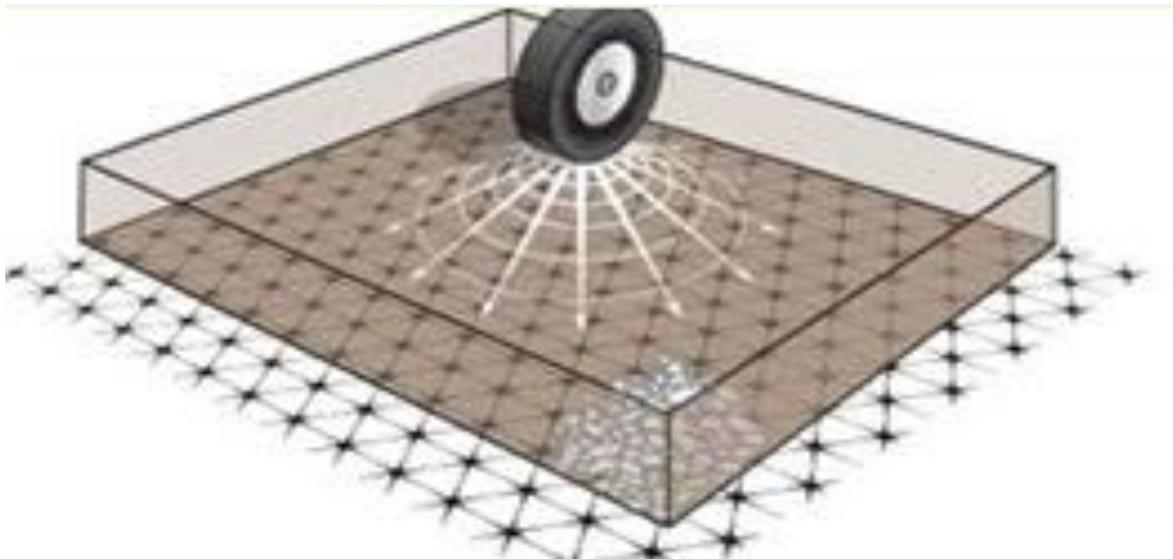
Fuente. Medición de la resistencia a flexión de mezclas de concreto asfaltico a partir del análisis de la magnitud de deformaciones ocurridas en especímenes sometidos a cargas puntuales (Buitrago, Salgado & Romero).

Fuente. Medición de la resistencia a flexión de mezclas de concreto asfaltico a partir del análisis de la magnitud de deformaciones ocurridas en especímenes sometidos a cargas puntuales (Buitrago, Salgado & Romero).

Las vigas se compactarán mediante la aplicación de una carga constante y uniformemente distribuida, con la ayuda de una platina en la parte superior, en tres capas hasta alcanzar 10 cm de espesor, 50 cm de longitud y un ancho de 20 cm. La primera capa deberá embeber la red de geomallas y posteriormente las otras dos capas de mezcla asfáltica.

Su espesor y tamaño es el adecuado debido a que es de fácil manejo y el espesor de la geomalla no supera los 25 mm de espesor.

Foto 2. Esquema carpeta asfáltica y geomalla



Fuente. <http://www.geosinteticos.com/geomallas.html>

### **3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Los niveles de competencia mundial, las necesidades de desarrollo nacional y la mejora de condiciones para la vida de los habitantes de las diferentes regiones de Colombia, hacen indispensable el desarrollo y mejoramiento de los pavimentos. Ya que las vías nacionales en su mayoría constituidas por pavimentos flexibles apoyados generalmente por dos capas no rígidas, la base y la sub-base y gracias a la alta flexibilidad de la carpeta bituminosa, el peso del vehículo es una carga concentrada cuyo efecto disminuye dependiendo el espesor de las capas subyacentes, hasta llegar distribuido a la sub-rasante.

Los pavimentos están sometidos a considerables cargas dinámicas debido a la circulación de los vehículos, dichas cargas provocan la aparición de grietas que, en conjunto con el agua, apresuran el proceso de deterioro de la estructura del pavimento. Para cumplir adecuadamente su función se deben seguir ciertos requisitos como lo son la resistencia a la acción de las cargas, ser resistente ante agentes producidos por la intemperie, ser durable y económico.

Los principales mecanismos de falla en los pavimentos están establecidos en el manual que presenta el instituto nacional de vías (INVIAS), clasificados en cuatro categorías:

- Fisuras
- Deformaciones
- Perdida de capas estructurales
- Daños superficiales

La piel de cocodrilo (PC) es una fisura en forma de una serie de grietas interconectadas cuyo origen es la falla por fatiga de la capa de rodadura asfáltica bajo la acción repetida de las cargas de tránsito, este tipo de falla es considerado un daño estructural importante que usualmente está acompañado por ahuellamiento.

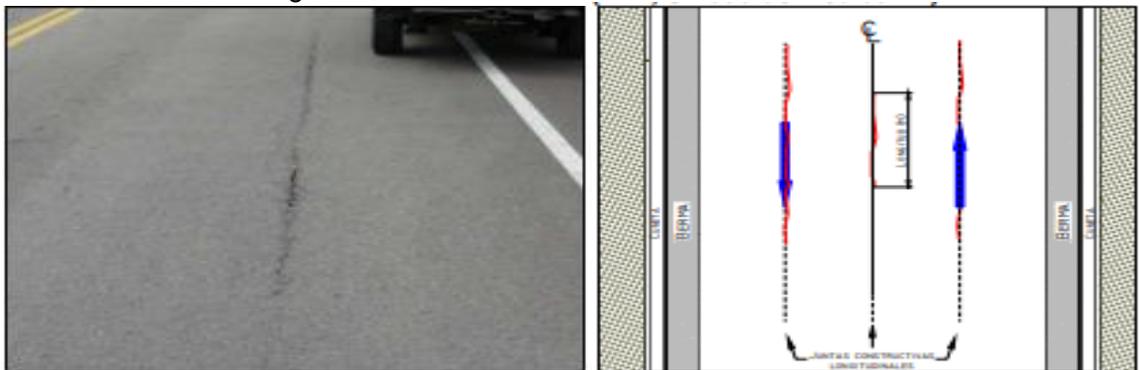
Ilustración 1. Piel de cocodrilo (PC unidad de medida metros cuadrados).



Fuente. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, INVIAS

Las fisuras longitudinales y transversales son discontinuidades en la carpeta asfáltica en una dirección y son el indicio de la existencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura. Dependiendo de la localización de la falla puede ser un buen indicativo para definir la causa que las genero, ya que aquellas que se encuentran en zonas de huellas pueden estar relacionadas con problemas de fatiga.

Ilustración 2. Fisura longitudinal



Fuente. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, INVIAS

En las deformaciones se encuentra el ahuellamiento que es una deformación permanente en alguna de las capas que componen la estructura o en la sub-rasante, generada por una deformación plástica del pavimento flexible debido a la fatiga de la estructura ante la repetición de cargas.

Ilustración 3. Ahuellamiento



Fuente. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, INVIAS

Uno de los retos en el diseño de las mezclas asfálticas para la ingeniería de pavimentos, corresponde a predecir y controlar el comportamiento elastoplástico de la mezcla frente a los principales mecanismos de daño estructural que sobre ella actúan. Para el caso de las mezclas asfálticas las propiedades mecánicas que se deben controlar son la resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) y la resistencia a la fatiga.

Las cargas cíclicas aplicadas por el paso de vehículos sobre la estructura de pavimento son consideradas como las principales generadoras de falla. Lo anterior, teniendo en cuenta que los pavimentos llegan a ella, debido al grado de deformación y agrietamiento que han sufrido durante su vida útil, disminuyendo así la calidad de servicio hasta índices de rechazo.

### 3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Como solución, de este problema se emplea el tendido de una nueva capa de asfalto, empleando carpetas de rodadura con espesores mayores, intentando retrasar el fenómeno de deterioro temprano de un pavimento, lo cual representa una solución poco práctica y antieconómica debido a que la transmisión de esfuerzos cortantes entre capas de asfalto es mínima, principalmente por la discontinuidad de estas, por lo que en muchos casos ocurren deslizamientos entre la capa nueva y la antigua.

Como alternativa se plantea un refuerzo con geomallas en la mezcla asfáltica, ya que el uso de geomallas triaxiales mejoran la capacidad portante en pavimentos, lo cual implica una reducción de espesores de las capas de material lo cual trae consigo la disminución de costos y compactación del material se para este proyecto plantea evaluar la resistencia a la flexión con una carga monotónica, en especímenes de mezclas asfálticas, realizando una caracterización de los materiales que son objeto de la investigación y una evaluación detallada del comportamiento de los especímenes sometidos a una carga puntual, con dicho refuerzo.

Entonces, ¿Cuál es el comportamiento a flexión en una mezcla asfáltica añadiendo un geosintético tal como lo son las geomallas para reforzar la estructura del pavimento? Con el presente estudio se pretende extrapolar su comportamiento a la fatiga de mezclas asfálticas que incluyen un componente de refuerzo, desarrollando ensayos de flexión bajo una carga monotónica y estableciendo gráfica y analíticamente dicho comportamiento.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

El estado actual de los pavimentos en Colombia requieren una urgente medida de refuerzo que facilite su construcción y disminuya los costos de la misma, actualmente se realizan en Colombia particularmente en las vías concesionadas un índice de estado de las vías donde se verifican las condiciones de las mismas con el fin de evaluar y posteriormente corregir los daños que se presentan en las vías nacionales, como se planteó anteriormente el instituto nacional de vías INVIAS da los parámetros para la inspección de pavimentos donde se determina el porcentaje de área de pavimento afectado, estableciendo los tipos de daño que se presentan, con lo cual se propone que durante la construcción de la estructura del pavimento, se realice un reforzamiento con geomallas que disminuya los daños ocasionados por el tráfico y condiciones climáticas.

Según el informe realizado en 2013 del concejo privado de competitividad el mal estado de las vías provoca demoras en los tiempos de entrega a los puertos generando sobrecostos, el deficiente estado de la infraestructura vial afecta el transporte de carga disminuyendo la competitividad respecto de otros países.

En pavimentos, las deformaciones interesan desde dos puntos de vista: por un lado, las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla y por otro porque es sabido que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho.

Carrol, hace referencia en su estudio llevado a cabo en 1987 en la universidad de Waterloo el reforzamiento de pavimentos flexibles en las bases granulares utilizando geomallas. Su objetivo fue analizar el mecanismo de reforzamiento de pavimentos flexibles a través de la medición de esfuerzos, deformaciones y deflexiones, encontraron que dicho reforzamiento redujo de manera considerable las deformaciones permanentes en los pavimentos flexibles y también redujo según diseño los espesores de base granular

Los orígenes de la construcción y planeamiento de pavimentos flexibles se remontan a la época del imperio Romano, ha evolucionado hasta nuestros días con el uso de ábacos y técnicas de últimas generación. El dimensionamiento está basado en el principio de construir un conjunto de capas, llamadas estructura del pavimento, que sirvan como una capa protectora de la sub - rasante, esta capa protectora mejora la capacidad portante del sitio y permite que se soporte el tráfico, las cargas dinámicas y los factores ambientales

## 5. MARCO TEÓRICO.

Las metodologías analíticas actuales por las cuales se determina la falla a fatiga por flexión en las mezclas asfálticas no representan de manera acertada el nivel de deformación y esfuerzo de falla.

Buitrago y Salgado, plantean una tesis que presenta un enfoque inicial en el diseño de un ensayo de laboratorio en donde se ocasiona una falla mediante una carga puntual monotónica en una mezcla asfáltica de tipo MDC-19 y MDC-25, con anterioridad se realiza la caracterización de los materiales a utilizar en las mezclas modificadas; una serie de parámetros iniciales en las muestras ensayadas sometidas a carga monotónica, analizando la falla por fatiga en vigas de mezcla asfáltica con el propósito de comparar los resultados obtenidos en los ensayos midiendo la resistencia en cada viga, con el fin de analizar la respuesta de los especímenes a ensayos de fatiga.

Para las muestras asfálticas se realiza su respectiva caracterización de acuerdo a la normatividad establecida por (INVIAS), se elaboran las muestras teniendo en cuenta contenidos de material bituminoso y pétreos, donde se realizan ensayos de caracterización tales como: Gravedad específica, absorción, abrasión específica de arenas y finos, abrasión en máquina de los ángeles 500 revoluciones, micro-deval, 10% de finos, partículas fracturadas, contenido de impurezas, índice de plasticidad, índice de aplanamiento, índice de elongación, de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales se presenta, que a medida que la gravedad específica del material disminuye, la absorción aumenta, esto se debe principalmente a que entre más partículas de diminutas existan se incrementa también la superficie específica del material.

Los resultados a los ensayos de abrasión muestran una aceptable resistencia entre partículas, también se determinó que el material utilizado muestra partículas idóneas para la mezcla según el ensayo de caras fracturadas, estas características físicas fueron de gran importancia ya que a la hora de su compactación su estructura granular será resistente a cargas estáticas y dinámicas. Según el autor no se evidenció contenido de material arcilloso u orgánico que pudieran afectar las propiedades del espécimen.

Según lo indica Allx E. Alvares en su tesis, la caracterización al cemento asfáltico en donde se utilizó métodos establecidos en ASTM, NLT y AASHTO, con ensayos de penetración (25°C-100 g-5 s), índice de penetración, punto de ablandamiento, viscosidad absoluta (60°C), gravedad específica, viscosidad a 135°C, ductilidad (25°C, 5cm/min).

Para determinar el contenido óptimo de asfalto, se compactaron las muestras Marshall con diferentes porcentajes de asfalto y a temperaturas de 140°C y 150°C, la fabricación de las muestras para realizar los ensayos a flexión fueron realizadas en moldes especiales, los especímenes (vigas) fueron ensayados con carga monotónica a flexión hasta su falla, dejándose un registro de las cargas impuestas, donde se midió la carga aplicada sobre el espécimen en el momento que se observó la falla, dimensiones de la falla.

En la interpretación de los ensayos empieza un análisis de comportamiento de las mezclas de acuerdo con los datos obtenidos de la carga puntual en los especímenes (vigas) del 5 % de asfalto, son esfuerzos altos, lo cual se esperaba debido a dicho espesor, en cuanto a los especímenes (vigas) del 5.5 % se notó un aumento considerable en la carga soportada.

Se planteó la iniciativa de realizar un análisis en la influencia con geomallas sintéticas a resistencia a flexión de mezclas asfálticas, en donde se evaluó el comportamiento a flexión de una mezcla asfáltica por una carga máxima soportada por un espécimen (viga) de mezcla asfáltica añadiendo un compuesto el cual es una geomalla sintética colocado a 1/3 de la altura de la viga y diseñando un ensayo utilizando mezcla asfáltica en un espécimen de manera de viga rectangular, sometida a cargas puntuales monotónicas, variando un parámetro como lo es porcentaje de cemento asfáltico.

Se propone para esta investigación reducir las deflexiones a cargas puntuales, determinar la resistencia a flexión de las muestras asfálticas (vigas), que actúa en forma de geoceldas ofreciendo un comportamiento en el tercio inferior de la del espécimen, buscando reducir su comportamiento a fatiga de la mezcla asfáltica en cada porcentaje de mezcla asfáltica a partir de refuerzo con la geomalla.

Se procede con la caracterización de los materiales a utilizar en la cual se utilizó en la mezcla asfáltica MDC-19, debido a su granulometría de finos y su facilidad para adherirse a la geomalla sintética, se realizan ensayos de caracterización a los agregados en donde según los resultados de gravedad específica absorción en los tamices 3/4 y 3/8 muestran que cuando la gravedad específica disminuye la absorción aumenta proporcionalmente a como disminuye, debido a los agregados más pequeños el cemento asfáltico se comportara mejor a la hora de adherirse.

Para la fabricación de los especímenes (vigas) se debe tener especial cuidado al adaptar las geomallas que servirán como refuerzo, las geomallas son instaladas asegurando que estén en el lugar indicado, que estén compactadas a la mezcla asfáltica y no se creen vacíos considerables en ellas, las muestras (vigas) fueron compactadas con unas toldas, en tres capas hasta alcanzar 15 centímetros de espesor.

Procediendo al ensayo modificado de resistencia a la flexión, se determinó el contenido óptimo de asfalto, se establecieron 8 especímenes tipo viga con dos tipos de contenido de asfalto los cuales fueron sometidos a flexión con una carga monotónica.

En cuanto a los resultados, los especímenes de 10 cm de espesor, 5% de asfalto los datos obtenidos mostraron una alta capacidad de resistencia, es decir comparando con la capacidad de las vigas de asfalto convencional está en un rango mayor. Las muestras de las mismas dimensiones y con las mismas especificaciones en los ensayos de mezcla asfáltica, pero con contenido de asfalto del 5.5% mostraron un aumento considerable en la carga.

## 6. ESTADO DEL ARTE

El asfalto es un material aglomerante de color que varía de negro a pardo oscuro, orgánico, de alto peso molecular, que puede tener consistencia líquida, semisólida o sólida, dependiendo de la temperatura, y compuesto principalmente por hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono. El asfalto proviene de yacimientos naturales o se obtiene como un residuo de la refinación de determinados crudos de petróleo por destilación o extracción; estos últimos representan más del 90% de la producción total de asfaltos. De acuerdo con Arenas (2006), la refinación del petróleo comienza con su recibo en los tanques de almacenamiento. Luego, el crudo se somete a un proceso de deshidratación y desalinización. Una vez es retirada el agua y la sal del crudo, este es bombeado a las unidades de destilación primaria o descabezamiento. En esta etapa, el petróleo es alimentado dentro de un intercambiador de calor. Posteriormente pasa a un horno donde se vaporiza parcialmente y luego a la torre atmosférica a una temperatura alrededor de 399 °C, en la cual, por diferencia de temperatura se obtienen las fracciones más livianas como los gases de la cima, los cuales no se pueden licuar, la nafta, el jet-A, el queroseno, el A.C.P.M y el gasóleo atmosférico. El residuo de esta etapa de destilación 8 Estudio de la influencia del asfalto envejecido en el comportamiento mecánico de una mezcla de concreto asfáltico producida en caliente se denomina crudo reducido o crudo topping y es la parte más pesada del crudo que no se logró vaporizar a esas condiciones de presión y temperatura. Posteriormente, el crudo reducido es sometido a una destilación al vacío a temperaturas hasta de 400 oC, donde se vaporiza parcialmente, luego se pasa a la torre de vacío, donde se obtienen, por un lado, gasóleos liviano y pesado y por el fondo de la torre los residuos finales de esta destilación que se conocen con el nombre de fondos de vacío. (ing. Garcia Melo, 2013).

Para definir la especificación se siguió la siguiente metodología, acorde a lo recomendado por investigadores en otros países:

- Establecer los requerimientos exigidos a los asfaltos y mezclas asfálticas en los dos escenarios: manejo y servicio
- Establecer de manera clara cuales son las propiedades de los ligantes asfálticos que tienen relación directa con el comportamiento en esos escenarios de evaluación.
- Establecer los métodos de evaluación (ensayos) de dichas propiedades.

Hay que considerar que el asfalto a las temperaturas de manejo es un fluido y su comportamiento dependerá en gran parte de las temperaturas. Cada planta debe satisfacer sus requerimientos particulares de capacidad de conducción del asfalto al sistema de mezclado, para lograr que el asfalto recubra a la partícula de agregado de una manera uniforme, sin problemas de escurrimientos (MANEJABILIDAD) y minimizando el envejecimiento (DURABILIDAD) del mismo.

Igualmente, el cemento asfáltico debe garantizar requerimientos mínimos que permitan un manejo seguro (SEGURIDAD EN LA OPERACIÓN). El ensayo de penetración es una medida de la consistencia de un cemento asfáltico a temperaturas medias de servicio (25 °C), siendo este un ensayo físico y empírico que muy posiblemente satisficó los requerimientos de otra época en cuanto a solicitudes y crudos disponibles, ya que la manejabilidad se puede controlar a través de la exigencia de valores máximos de la viscosidad a 135 °C, temperatura promedio durante las operaciones de mezclado.

De igual manera, es necesario que se minimicen los cambios en la composición química durante las operaciones en planta, para lo cual se debe garantizar que el grado de envejecimiento del asfalto durante el proceso de elaboración de la mezcla se encuentre alrededor de lo medido a través del ensayo al horno en película delgada. Se recomienda incluir un índice de durabilidad: relación entre la viscosidad absoluta a 60 °C del asfalto envejecido a través del TFOT o RTOT y la misma viscosidad del asfalto que llega de la refinería.

Este índice será complementado controlando el grado de volatilización de las fracciones más volátiles del asfalto, a través del porcentaje de pérdida de masa en el mismo ensayo y las características elásticas que debe poseer al salir de planta a través de la medida de la ductilidad.

Con esto se está garantizando de manera indirecta una cierta homogeneidad de los crudos y un alto grado de consistencia en los procesos en refinería. Este indicativo del envejecimiento se debe garantizar también durante la elaboración de la mezcla asfáltica independientemente del tipo de planta utilizada. Con ello se podrá tener información real sobre el verdadero envejecimiento de nuestros asfaltos y la influencia que sobre él tienen los diversos procesos de producción, permitiendo hacer afinamientos reales a las especificaciones propuestas de asfaltos ya que el tipo de planta también es una variable que juega un rol fundamental en el comportamiento del ligante en servicio. (Arenas Lozano, 2008).

Los ensayos a fatiga de las mezclas asfálticas fabricadas con las granulometrías MD20 y MDC-25, los asfaltos de penetración 60/70 y 80/100 y el al 100% se realizaron en primera instancia con la evolución de la carga con los ciclos, estableciendo el criterio clásico de falla al 50% de la carga inicial. Además, se

tuvieron en cuenta los factores de corrección por las variaciones en las dimensiones de las probetas (base mayor, base menor y altura).

Los ciclos en el ensayo a fatiga, de la mezcla MD25 con asfalto 60/70, a tres diferentes niveles de deformación (500, 450 y 300  $\mu\text{m}$ ). De las curvas de carga se evidenció que en los primeros ciclos su comportamiento es muy similar, con una pendiente constante y casi horizontal. Pasado un nivel de ciclos, la carga decrece de manera brusca y se presenta el fallo. Este comportamiento es similar para los tres niveles de deformación; solo existe la diferencia en el número de ciclos del fallo, siendo que a mayor deformación se tienen menos ciclos de vida. (Patiño Boyacá, 2014), (Reyes Ortiz, 2014), (Camacho Tauta, 2014).

En los primeros trabajos realizados para definir la susceptibilidad a la temperatura se utilizó la penetración como la medida de la consistencia. Entre los parámetros definidos más destacados están la penetración a diferentes temperaturas, la relación entre penetraciones, la diferencia en la penetración a diferentes temperaturas, la temperatura requerida para aumentar la penetración por un cierto valor, o la pendiente del registro de penetración frente a la temperatura (Pfeiffer y Van Doormaal, 1936; Van der Poel, 1954; Neppe, 1952; Barth, 1962).

El término envejecimiento se refiere al fenómeno global de evolución lenta e irreversible de la alteración de las propiedades físico-químicas de los materiales; en el caso de ligantes asfálticos, esta alteración se inicia desde el proceso de producción, continúa durante la preparación y compactación de la mezcla asfáltica, y se prolonga durante el tiempo de servicio de la vía. En el envejecimiento del asfalto se pueden distinguir dos tipos de mecanismos; el mecanismo principal está relacionado con cambios químicos en el asfalto, los cuales producen modificaciones que son irreversibles y afectan directamente las propiedades reológicas del mismo. En éste se agrupan procesos como la oxidación, volatilización, polimerización y sinéresis, entre otros. (ing. Garcia Melo, 2013).

Los métodos para la creación y diseño de las mezclas asfálticas a través de la historia son HVEEN, SUPERPAVE Y MARSHALL, siendo este último el de interés particular para este trabajo.

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados.

Esta técnica de diseño fue creada por BRUCE MARSHALL, siendo de la armada de ingenieros de los Estados Unidos, quien depuro y adicióno ciertos aspectos a las propuestas del Marshall a punto de que el ensayo fue normalizado como ASTM D 1559. El método Marshall es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de su estabilidad, flujo, densidad y vacíos.

Una de las virtudes del MÉTODO MARSHALL es la importancia que se le asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico. Este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla durable.

Desafortunadamente una de sus grandes desventajas es el método de compactación en laboratorio por impacto el cual no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo tránsito en un pavimento real.

Los dos datos más importantes del diseño de mezclas del método Marshall son: un análisis de la relación densidad/vacíos y una prueba de estabilidad/flujo de las muestras compactadas.

El METODO HVEEN también implica análisis de densidad, estabilidad y la resistencia de la mezcla al hinchamiento por la presencia del agua. Desarrollado por Francis N. Hveen ingeniero de materiales e investigación de carreteras de California. El método abarca La determinación de un contenido aproximado de asfalto por medio del ensayo equivalente centrifugo de kerosene, y luego el sometimiento de probetas con este contenido de asfalto y con contenidos mayores y menores. A un Ensayo de estabilidad, también se efectúa un ensayo de expansión sobre una probeta que ha sido expuesta al agua. (ing. Miranda Donato, 2013 Ensayo marshall aporte Invias).

El propósito del método Hveen es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados.

Este método tiene dos ventajas concretas, el método de compactación por amasado y el parámetro de resistencia, estabilidad. La desventaja del procedimiento es que el tipo de ensayo, en particular el compactador por amasado y el estabilometro de HVEEN, es algo más caro que el equipamiento del Marshall y no muy portable.

También que el método de selección del contenido de asfalto es demasiado subjetivo y podría resultar en una mezcla no durable con poco asfalto. (ing. Miranda Donato, 2013 Ensayo marshall aporte Invias).

Cuando aumenta el contenido de agua en los materiales de base y subbase, se da una disminución en la capacidad portante de éstos y un incremento en la tasa de pérdida de serviciabilidad del pavimento. Cuando el agua satura totalmente estas capas y llena los vacíos y los espacios o las aperturas en los límites entre las capas, las cargas pesadas aplicadas por las ruedas a la capa de rodadura de esos pavimentos producen impactos en el agua que son comparables a la acción de un tipo de “martillo de agua”. Las presiones de los pulsos de agua que se dan por la acción de las ruedas pueden acumular su efecto dañino causando, no sólo erosión y expulsión de material, sino la eliminación, por levantamiento, del material asfáltico que compone las capas estabilizadas de base y subbase. La acción del agua también puede desintegrar bases tratadas con cementos, debilitando las capas por el reacomodo de finos en la estructura interna, sobrecargando la subrasante por los nuevos espesores insuficientes, además de otros efectos dañinos. (Herrera Betin 2009, Reyes Lizcano 2010).

Un vehículo que circula sobre el pavimento desarrolla presión entre el fondo de la losa o la carpeta flexible, y la subrasante, lo que permite liberar agua (si hay en la subrasante) y hace que ésta fluya en una dirección en la que pueda escapar. La magnitud de la presión es, por supuesto, dependiente de la deflexión de la carpeta o losa del pavimento y del grado de confinamiento del agua. El agua en principio sólo escapa a través de las juntas o de las grietas existentes, estos sitios de liberación de presión de aguas no son suficientes y por lo tanto la carpeta tiende a levantarse y destruirse con el paso de vehículos. Juntas y grietas sin sellar de las losas (equivalentes a capas permeables y grietas en pavimentos flexibles) permiten que el agua ingrese a la estructura del pavimento y que se acumule debajo de la interfaz Capa de Rodadura (CR) y Base Granular (BG). (Herrera Betin 2009, Reyes Lizcano 2010).

La junta es desviada mientras que una carga se mueve a través de la losa. El agua que está bajo la losa de acercamiento es expulsada incluyendo material, y es acumulada bajo la losa de salida; este movimiento de material, por la presión del agua, es llamado “bombeo”. (Herrera Betin 2009, Reyes Lizcano 2010).

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para poder establecer las temperaturas del mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado esto para determinar la preparación de los agregados en la mezcla asfáltica. (Catarin 2009)

El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos. Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a temperatura de 110 °C (230 °F). Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa, y se registra su valor. (Catarin 2009)

La muestra se calienta por segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra esto para determinar el secado en la mezcla asfáltica. El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento usado para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas. (Catarin 2009)

El peso específico de una sustancia es la proporción peso-volumen de una unidad de esta sustancia comparada con la proporción peso-volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1). Por ejemplo, una muestra de agregado que pese dos y media veces más que un volumen igual de agua tiene un peso específico de 2.5. El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño con este método determinamos el peso específico de la muestra de agregado. (Catarin 2009)

Se han utilizado diversos métodos de laboratorio para medir la fatiga y el comportamiento de las mezclas asfálticas durante varios años. Sin embargo, la mayoría de los investigadores han utilizado la prueba de fatiga de cuatro puntos para determinar la vida de fatiga de las mezclas asfálticas. En esta prueba, se producen algunos daños localizados en el material en la microescala en cada ciclo de carga, lo que resulta en una disminución de la rigidez del material. Esta reducción de la rigidez se utiliza para controlar el daño. Con respecto a los criterios de falla, existen dos enfoques generales: uno considera la reducción de la rigidez inicial y otro considera la energía disipada. En este estudio, se utiliza una reducción del 50% en el enfoque de rigidez inicial para determinar la vida de fatiga de las mezclas y el aglutinante. El enfoque de reducción de la rigidez se considera en lugar del enfoque de energía disipada porque, según el estudio realizado por Tarefder et al. muestra que el enfoque de energía disipada no describe la naturaleza viscoelástica de las mezclas asfálticas. Durante el Programa de Investigación de Autopistas

Estratégicos (SHRP), los investigadores encontraron que el aglutinante de asfalto en las mezclas tiene un impacto significativo en el comportamiento de la fatiga. Sin embargo, en la especificación de aglomerantes actual, el parámetro  $G'$  relacionado con el módulo de corte complejo ( $G'$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) no determina adecuadamente el comportamiento de fatiga de binder. Por lo tanto, se ha realizado una gran cantidad de investigaciones para desarrollar un procedimiento de prueba que pueda determinar con precisión el comportamiento de fatiga de los ligantes. Entre los cuatro principales desarrollos se encuentran: prueba de barrido de tiempo, prueba de barrido de amplitud lineal, prueba de recuperación de fluencia por estrés múltiple (MSCR) y prueba de tensión de muesca de doble filo (DENT). La prueba de barrido de tiempo aplica una carga cíclica repetida en cualquier frecuencia a la muestra de aglomerante utilizando el Reómetro Dinámico de Cizallamiento (DSR) para imitar la prueba de la mezcla. Diferentes frecuencias de carga. (Amina Mannan 2015, "Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies")

La ingeniería de pavimentos se enfrenta ahora a una tarea difícil que consiste en comprender y predecir los fenómenos de craqueo por fatiga, la angustia más importante relacionada con la carga en pavimentos flexibles. Las agencias federales y los centros de investigación de todo el mundo están estudiando y produciendo pruebas y procedimientos de laboratorio, y también predicen modelos, y tratan de obtener mejores conocimientos relacionados con la fatiga en el asfalto de mezcla en caliente. Dado que las curvas fenomenológicas S-N (curvas de Whöler) fueron traídas de ingeniería mecánica para evaluar pruebas de laboratorio en mezclas asfálticas, la ec. Fue el modelo principal adoptado para representar la influencia del nivel de tensión. También se desarrollaron modelos de energía disipada, que muestran una relación directa con la vida de fatiga. Esos modelos dependen de los criterios de falla y necesitan factores de calibración de campo de laboratorio para ser aplicados a los procedimientos de diseño de pavimentos. Incluso con todos los esfuerzos realizados en los últimos años, principalmente debido a la variabilidad de los factores relacionados con la angustia por fatiga, la predicción de la vida de fatiga sigue siendo un problema problemático que debe resolverse.

El creciente interés en el desarrollo de modelos totalmente mecánicos para el diseño de pavimentos ha ido cambiando las pautas para los estudios de noticias. Incluso la información sobre el clima y el tráfico permanecen como fuentes de insumos empíricos pero necesarios, evaluando cómo aumenta el daño y cómo encontrar las propiedades de daño del concreto asfáltico son los primeros pasos para las próximas generaciones de herramientas de diseño mecanicista. Publicaciones recientes han estado utilizando metodologías basadas en enfoques mecánicos, principalmente teoría de daños continuos, para estudiar la evolución de los daños en asfaltos de mezcla en caliente. Kachanov definió el daño como una variable de campo para describir los cambios en un medio continuo, que puede estimarse aproximadamente observando las propiedades del material (elástico, acústico, eléctrico, etc.). Lundström et al. Indique que la amplitud del dominio de la validez de

la mecánica de daños continuos comienza con el estado inicial no dañado, es decir, donde no se ha aplicado una carga dañina. La etapa final del daño es cuando se ha formado una macro - grieta, el tamaño de un elemento representativo. Después de ese punto, la teoría de la mecánica de fractura debe aplicarse para evaluar la propagación de grietas.

Este trabajo presenta un extenso análisis de los resultados de las pruebas de fatiga utilizando diferentes hormigones asfálticos. La caracterización viscoelástica lineal de todas las mezclas se realizó mediante pruebas de barrido de frecuencia (E). También se usó un proceso de Inter conversión aproximado para encontrar otras propiedades viscoelásticas. Los datos de fatiga se trataron con el enfoque de daño continuo y se obtuvieron los parámetros de daño. Además, se evaluó una relación entre las propiedades viscoelásticas y los parámetros de daño, que podrían ser útiles para la caracterización de la fatiga. (Rodrigues de Mello 2008, Muniz de Farias 2008, Kaloush 2008 “Using damage theory to analyze fatigue of asphalt mixtures on flexural tests)

Uno de los principales modos de socorro estructural encontrados en las capas de pavimento bituminosas es el agrietamiento por fatiga, que resulta de la aplicación repetida de esfuerzos inducidos por el tráfico. Se discute el desarrollo de una disposición de prueba de flexión de cuatro puntos para determinar las propiedades mecánicas dinámicas de las muestras de haz rectangular de mezclas bituminosas. Este novedoso sistema permite que las superficies dañadas por grietas de las muestras de vigas se inspeccionen y monitoreen digitalmente in situ durante las pruebas de fatiga. El dispositivo de prueba, que se integró con un sistema de retroalimentación servo hidráulico de circuito cerrado, incorpora un mecanismo de sujeción constante y utiliza un modo de control de desplazamiento y carga combinados. Se realizaron una serie de pruebas de fatiga por flexión de cuatro puntos en muestras de dos mezclas irlandesas estándar: un asfalto laminado en caliente y un macadán de curso de base densa. La información digital de imágenes sobre el agrietamiento por fatiga se utilizó para medir el alcance del daño y para caracterizar un modelo lineal de mecánica de fractura elástica. (Hartman 2004, Gilchrist 2004” Evaluating Four-Point Bend Fatigue of Asphalt Mix Using Image Analysis”)

## **7. OBJETIVOS**

### **7.1 GENERAL**

Evaluar mediante un ensayo a flexión en muestras prismáticas de mezcla asfáltica la respuesta bajo carga monotónica usando geomallas de refuerzo en el tercio inferior del espécimen.

### **7.2 ESPECÍFICOS**

- Generar un estado del arte de la temática abordada, con el fin de apropiarse de los antecedentes necesarios para el desarrollo del proyecto
- Caracterizar los materiales asfálticos y pétreos que son objeto de la investigación
- Ejecutar los ensayos de flexión bajo carga monotónica con el fin de conocer el comportamiento en términos de resistencia y deformación.

## 8. METODOLOGÍA

A continuación, se describe el proceso con el cual se desarrolló la investigación de resistencia a flexión bajo una carga monotónica a vigas asfálticas reforzadas con geomalla para dos tipos de asfalto de diferentes características específicas.

- Se determinaron las principales características del proceso de elaboración y compactación (ART.450 INVIAS).
- En esta fase de la investigación se relaciona la caracterización física de los materiales usados en la investigación, de la cual se utilizará la mezcla asfáltica MDC-19, esto debido a que de acuerdo (ART. 450 INVIAS) presenta una granulometría más fina y sus agregados pueden entrar fácilmente entre la geomalla.
- Adicionalmente se lleva el material bituminoso a 140°C en un horno.
- Una vez caracterizado el material con la granulometría adecuada y el asfalto a temperatura de 140°C se realizó la mezcla de los materiales.
- se dividieron en dos grupos de cuatro vigas cada uno en el cual varia su contenido de material bituminoso de 5% y 5.5%.
- La confección de las muestras se realizó en dos capas, la primera capa a un tercio de la base para posteriormente introducir el geotextil cubriendo toda el área superficial de la primera capa y luego sobreponer la segunda capa de asfalto.
- El método de compactación se realizo en la primera y segunda capa con una prensa de una carga de doce (12) toneladas, 118 kN, esto con el fin de que la compactación se uniforme a lo largo de toda la viga.
- Una vez confeccionadas las vigas y secadas a temperatura ambiente, se procede con la toma de medidas lineales y peso de las vigas.
- se determinó el número de muestras a ensayar para generar una buena estadística de los ensayos.
- Se procede con el ensayo de resistencia a la carga a flexión de carga monotónica induciendo los especímenes a su falla.
- Este ensayo se diseño en la maquina Marshall, con el aditamento para vigas de concreto, donde se obtuvo la carga máxima y deformación hasta la falla.
- Se analizaron los resultados de los ensayos y se realizó gráficamente la comparación entre los mismos.
- Conclusiones y recomendaciones.

## 9. EQUIPOS

A continuación, se presentan los diferentes equipos para la elaboración de muestras y ensayos.

### 9.1 Equipo para la elaboración del ensayo con carga monotónica

Una (1) máquina de ensayo operada por medio de electricidad que aplica una carga continua y sin impacto (la maquina con la que se realizaron los ensayos está ubicada en el laboratorio de suelos de la Universidad católica de Colombia, sede Claustro, la cual cumple con los certificados de calibración.

Foto 3. Montaje equipo para aplicación de carga



Fuente. Elaboración propia

## 9.2 Equipos para la elaboración de especímenes de asfalto.

Ocho moldes metálicos prismáticos para viguetas de ancho de 152.4 mm por 152.4 mm de alto por 533.4 mm de largo, un (1) recipiente para mezcla de concreto de 1000mm por 1000m, una (1) pala cuadrada para mezcla de asfalto y agregados.

Foto 4. Molde metálico para vigas



Fuente. Elaboracion propia

### 9.3 Equipo para medición de deformación.

Comparador de caratula analógico con una división de escala de 0.001” y un rango de medición de 1”.

### 9.4 Herramientas de mano.

Una (1) carretilla, un (1) palustre, una (1) regla, una (1) cinta métrica, elementos de protección personal y seguridad industrial.

## 10. MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DE VIGAS ASFÁLTICAS

En este capítulo se relacionan la procedencia y descripción de las diferentes materias primas para la producción de vigas asfálticas.

Tabla 1. Material primas para la elaboración de especímenes

Material	Procedencia	Proveedor
Asfalto 60-70	-	Asfaltos y emulsiones de Colombia S.A.S.
Agregados	Suarez Rubí	JPMC
Geomalla biaxial	-	Geomatrix

Fuente. Elaboración propia

### 10.1 ASFALTO 60-70

Es un asfalto “NORMALIZADO” termino que hace referencia al proceso industrial al cual se somete el ligante proveniente de la refinería, para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de penetración comprendida entre 60 y 70 mm/10, con una temperatura de mezclado de 145 °C.

### 10.2 AGREGADO FINO

Para la producción de asfalto, la arena fina es extraída por medio de un proceso natural y la arena gruesa por medio de un proceso de triturado, que garantiza cumplir con las especificaciones de los diseños de mezcla.

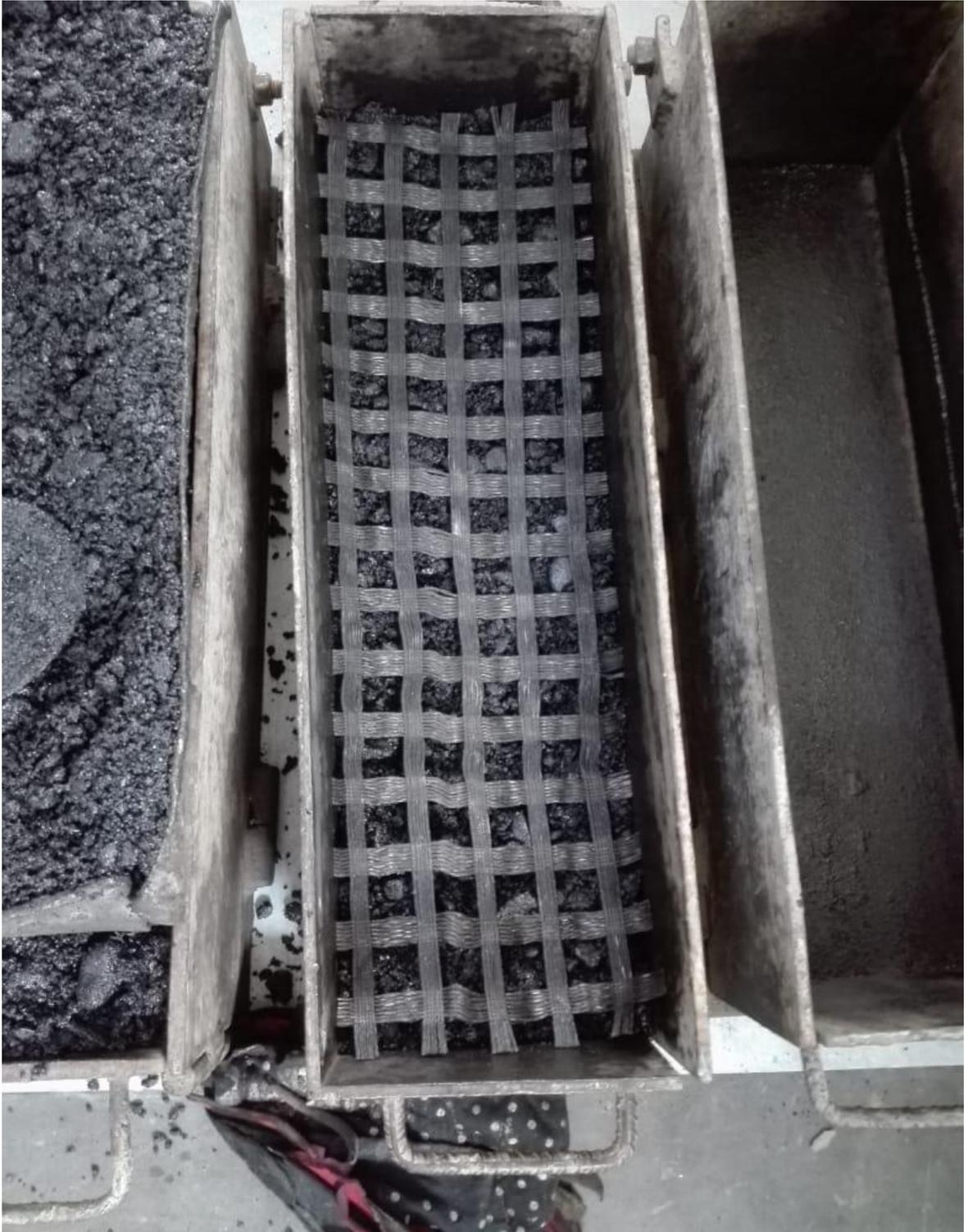
### 10.3 AGREGADO GRUESO

Para la producción de concreto el agregado es extraído por medio de un proceso de trituración

### 10.4 GEOMALLA BIAXIAL

Las geomallas biaxiales están desarrolladas para interactuar con suelos y agregados pétreos, proporcionando alta resistencia a la tensión y alto módulo de deformación a las estructuras que conforman. Las fibras de geomalla son elaboradas con el exclusivo Multifilamento G5 de poliéster de alta tenacidad (PET) y están recubiertas con un copolímero que le otorga mayor rigidez dimensional y la protección necesaria en su instalación.

Foto 5. Geomalla biaxial



Fuente. Elaboración propia

## 11. DISEÑOS DE MEZCLA

A continuación, se presentan los diseños de mezcla.

### 11.1 Mezcla asfáltica con el 5% y 5.5% de asfalto

La caracterización que se presenta a continuación es la distribución del tamaño de partículas de agregados para el contenido de las dos mezclas asfálticas.

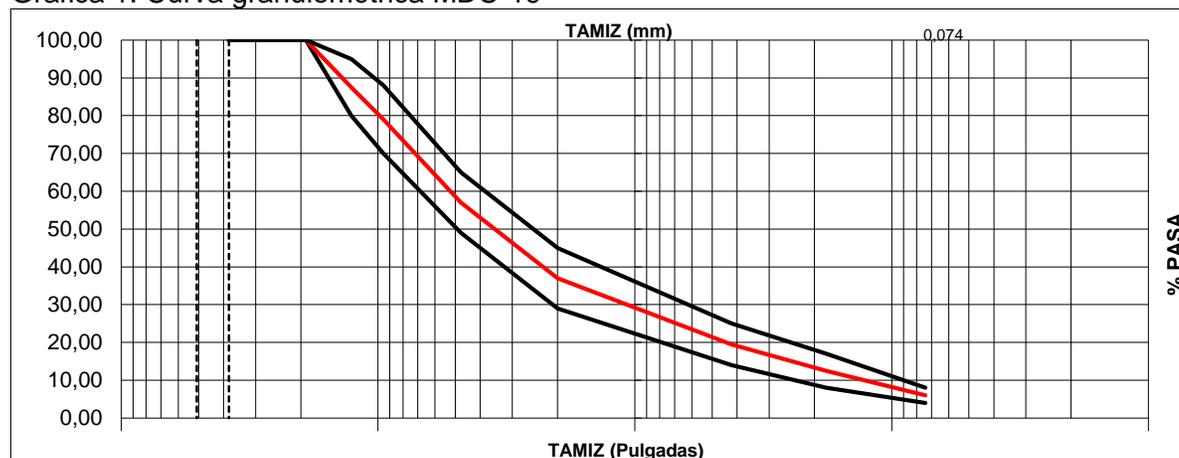
#### 11.1.1 Granulometría para contenido de asfalto del 5% y 5.5% de asfalto}

Tabla 2. Granulometría Asfalto 5%

	TAMIZ		PESO BRUTO RETENIDO TAMIZ DE REFERENCIA (g)	% RETENIDO TAMIZ DE REFERENCIA	% PASA TAMIZ DE REFERENCIA CORREGIDO	ESPECIFICACIÓN	
	PULGADAS	mm				LIM. INF.	LIM. SUP.
PESO INICIAL (g)	2.5	76.20			100.0	100	100
	2	50.80			100.0	100	100
	100.0	1 1/2"	38.10		100.0	100	100
		1"	25.40		100.0	100	100
		3/4"	19.10		100.0	100	100
PESO FINAL (g)		1/2"	12.70	12.50	87.5	80	95
		3/8"	9.52	8.50	79.0	70	88
		No. 4	4.76	22.00	57.0	49	65
	94.0	No. 10	2.00	20.00	37.0	29	45
		No. 40	0.42	17.50	19.5	14	25
		No. 80	0.18	7.00	7.0	8	17
		No. 200	0.07	6.50	6.5	6.0	4

Fuente. Diseños de mezcla Pavimentos e Infraestructura S.A.S

Gráfica 1. Curva granulométrica MDC-19



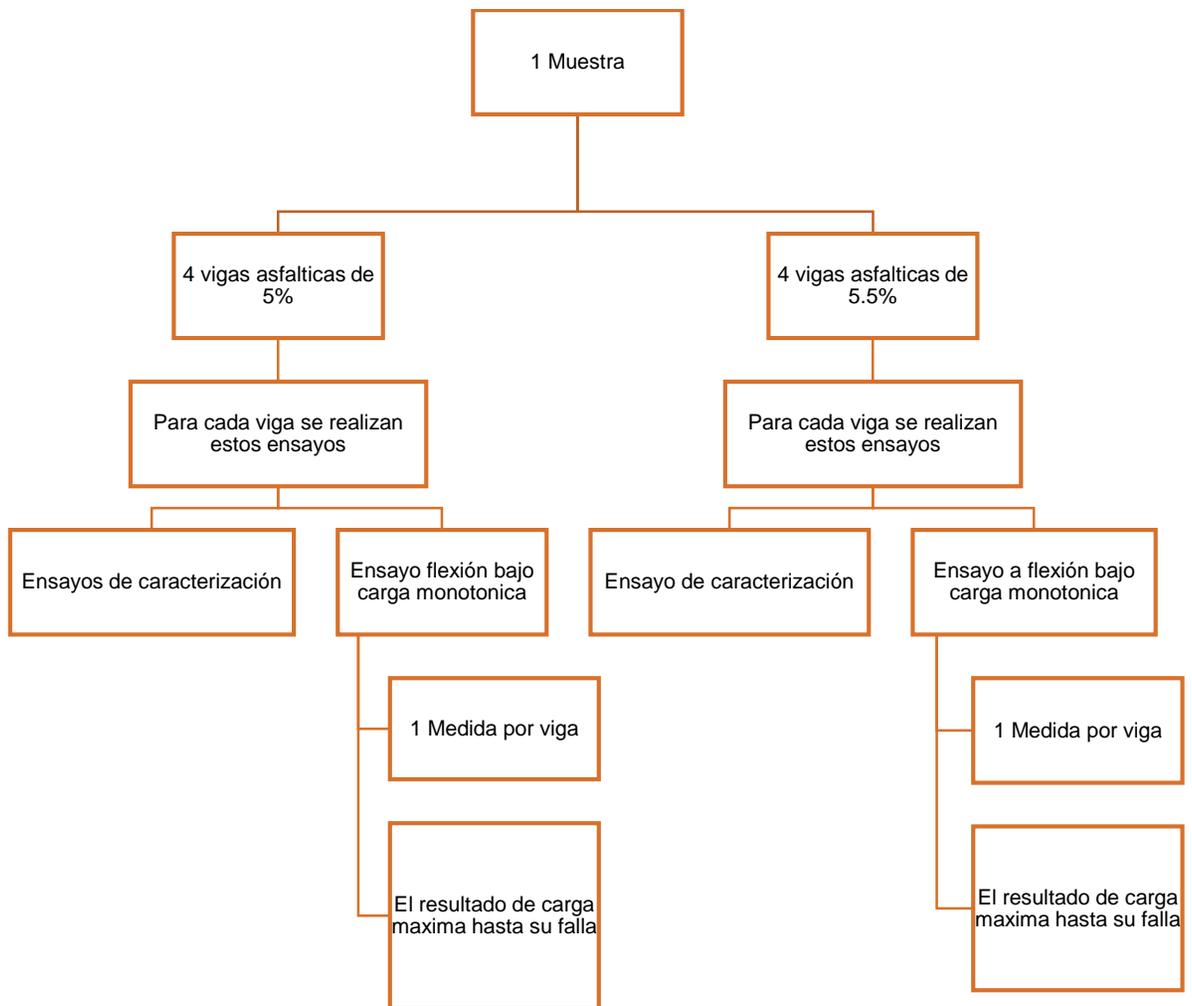
Fuente. Elaboración propia

## 12. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA

La determinación del tamaño de la muestra se realizó teniendo en cuenta la norma técnica colombiana INV-E 758-13, donde recomienda un mínimo de tres testigos. Ya que el ensayo que se plantea no está normalizado se tomaron cuatro (4) especímenes para las vigas con contenido de asfalto del 5% y cuatro (4) para las vigas con contenido de asfalto del 5.5%.

La cantidad de mediciones se hicieron para el ensayo de flexión bajo carga monotónica.

Ilustración 4. Diagrama de estructura de las muestras



Fuente. Elaboración propia

### 13. ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES PRISMÁTICOS

En este capítulo se describe el proceso de elaboración de los especímenes prismáticos para cada contenido de asfalto (cada viga se realizó del mismo modo). Al ser un ensayo no normativo se realiza la preparación de las vigas asfálticas basándose en INV-E 747-13

- Se midió la temperatura según la NTC 3318 del ligante (asfalto 60-70)
- Se preparan los agregados en distintas fracciones de agregado grueso y fino y se procede a mezclar con el ligante bituminoso.
- Se elaboraron las muestras de asfalto, se toman 4 muestras por cada contenido de asfalto.
- Se desencofran las muestras después de 24 horas de la elaboración se trasladan a un cuarto libre de humedad a temperatura ambiente.

Foto 6. Elaboración de especímenes de asfalto reforzado con geomalla



Fuente. Elaboración propia

## 14. ELABORACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Para el presente proyecto se realizaron los ensayos a flexión bajo una carga monotónica a las vigas de mezcla asfáltica con refuerzo de geomalla

La confección de los especímenes se desarrolló en moldes específicos donde lo único que vario fue la cantidad de asfalto con un refuerzo de geomalla a 1/3 de la base las vigas.

Fueron elaboradas en total ocho (8) vigas que fueron ensayados mediante carga monotónica a flexión, hasta lograr la carga máxima, midiendo la deformación de esta en el centro del espécimen en el momento en que la maquina dejase de registrar aumento de carga aplicada en la muestra

Tabla 3. Muestras de asfalto

	<b>Descripción Muestra</b>	<b>Asfalto</b>	<b>Fecha de toma</b>	<b>Ensayos</b>
<b>1</b>	No 1 - 5%	MDC-19	11/02/2019	16/04/2019
<b>2</b>	No 2 - 5%	MDC-19	11/02/2019	16/04/2019
<b>3</b>	No 3 - 5%	MDC-19	12/02/2019	17/04/2019
<b>4</b>	No 4 - 5%	MDC-19	13/02/2019	17/04/2019
<b>5</b>	No 5 - 5.5%	MDC-19	14/02/2019	22/04/2019
<b>6</b>	No 6 - 5.5%	MDC-19	15/02/2019	22/04/2019
<b>7</b>	No 7 - 5.5%	MDC-19	18/02/2019	23/04/2019
<b>8</b>	No 8 - 5.5%	MDC-19	19/02/2019	23/04/2019

Fuente. Elaboración propia

- Una vez preparados los especímenes que se van a ensayar, se pesaron en una báscula con precisión de  $\pm 0.1$  g y se realizaron las mediciones de dimensiones.

Foto 7. Especímenes prismáticos para ensayar

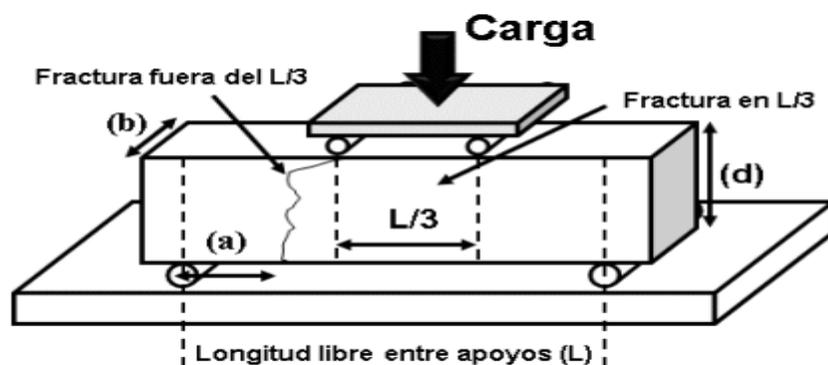


Fuente. Elaboración propia

#### 14.1 Ensayo a flexión bajo carga monotónica

Se realizó un ensayo de resistencia a la flexión bajo carga monotónica para dos mezclas asfálticas MDC-19 con contenidos de asfalto de 5% y 5.5% en la ilustración 2 se observa el esquema del ensayo ejecutado sobre las vigas elaboradas.

Ilustración 5. Esquema del ensayo



Fuente. Medición de la resistencia a flexión de mezclas de concreto asfáltico a partir del análisis de la magnitud de deformaciones ocurridas en especímenes sometidos a cargas puntuales

Para la realización de este ensayo se contó con la maquina multiensayos en tipo de ensayo Marshall del cual se aplica una carga sobre el espécimen con la prensa de

deformación constante de 50.8 mm (2") por minuto, hasta que ocurra la falla, esto quiere decir cuando alcance la carga máxima, se anota el valor registrado en el digital de la máquina de ensayo y simultáneamente se toma la de formación que presenta el espécimen cuando fallo.

#### 14.1.1 Montaje del equipo

Una vez preparados los especímenes a ensayar se ubican sobre la máquina y el suplemento con los apoyos y el deformímetro.

Foto 8. Ensayo a flexión bajo carga monotónica



Fuente. Elaboración propia

## 15.RESULTADOS

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos en el ensayo bajo carga monotónica

### 15.1 Resultados de laboratorio

Tabla 4. Resultados de laboratorio vigas con contenido de asfalto de 5.0 %

Vigas asfálticas reforzadas con geomalla con contenido de asfalto de 5.0%												
Referencia	Viga 1			Viga 2			Viga 3			Viga 4		
Ancho de la zona de falla (b) (cm)	15	15.6	15.4	15.4	15.2	15.4	15.6	15.8	15.5	15.3	15.2	15.1
Altura en la zona de falla (d) (cm)	10.7	10.5	10.6	10.1	10.1	10.3	10.7	10.8	10.7	10.6	10.3	10.5
Longitud libre entre apoyos (L)(cm)	42			42			42			42		
Apariencia del asfalto	Normal			Normal			Normal			Normal		
Marque con un X si la fractura se encuentra dentro del tercio medio de la luz libre	x			x			x			x		
Marque con un X si la fractura se encuentra fuera del tercio medio de la luz libre												
Distancia entre la línea de fractura y el soporte más cercano (a) (cm)	20.3	18.5	21.4	18.9	20.2	21	22.2	18.9	19.9	18	21.7	22.4
Carga máxima aplicada (P) (kN)	7.16			7.48			7.19			7.15		
Deformación (mm)	22.8			21.6			21.6			20.3		

Fuente. Elaboración propia

Foto 9. Ensayo a flexión bajo carga monotónica



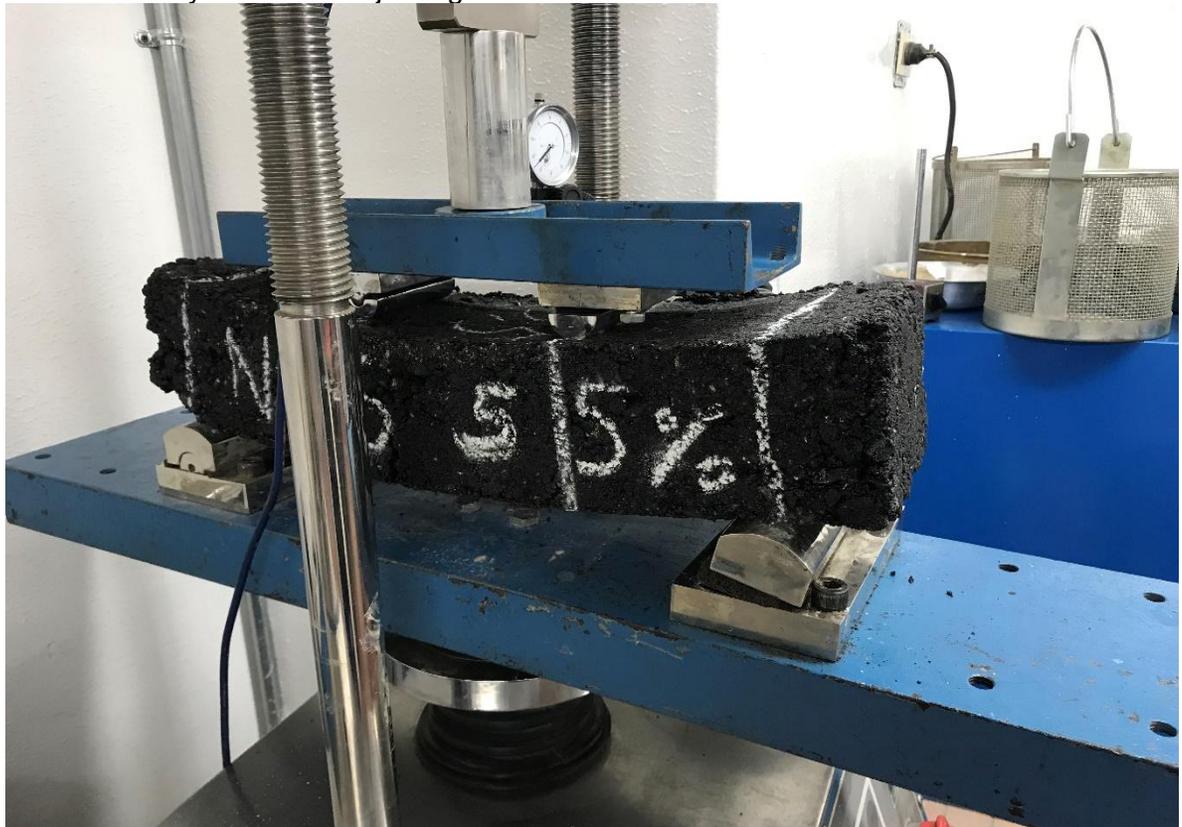
Fuente. Elaboración propia

Tabla 5. Resultados de laboratorio vigas con contenido de asfalto de 5.5%

<b>Vigas asfálticas reforzadas con geomalla con contenido de asfalto de 5.50%</b>												
<b>Referencia</b>	<b>Viga 5</b>			<b>Viga 6</b>			<b>Viga 7</b>			<b>Viga 8</b>		
Ancho de la zona de falla (b) (cm)	15.2	15.4	15.2	15.2	15.7	15.5	15.2	15.1	15.2	15.4	15.6	15.2
Altura en la zona de falla (d) (cm)	10.4	10.4	10.2	10.8	10.6	10.8	10.7	10.3	10.8	10.3	10.7	10.8
Longitud libre entre apoyos (L) (cm)	42			42			42			42		
Apariencia del asfalto	Normal			Normal			Normal			Normal		
Marque con un X si la fractura se encuentra dentro del tercio medio de la luz libre	x			x			x			x		
Marque con un X si la fractura se encuentra fuera del tercio medio de la luz libre												
Distancia entre la línea de fractura y el soporte más cercano (a) (cm)	23.5	22.3	21	23.5	23.3	24	24	18.7	24.5	22	20	17
Carga máxima aplicada (P) (kN)	<b>7.91</b>			<b>7.98</b>			<b>8.42</b>			<b>8.2</b>		
Deformación (mm)	15.2			18.4			24.2			20.3		

Fuente. Elaboración propia

Foto 10. Ensayo a flexión bajo carga monotónica 5.50 % asfalto



Fuente. Elaboración propia

Tabla 6. Ensayo a flexión bajo carga monotónica 5.0 % asfalto



Fuente. Elaboración propia

Foto 11. Fallas de las vigas



Fuente. Elaboración propia

Foto 12. Geomalla después de la aplicación de carga



Fuente. Elaboración propia

Foto 13. Comportamiento de la geomalla después de la aplicación de carga



Fuente. Elaboración propia

## 16. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 16.1 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA MEZCLA

Los resultados de dicho ensayo se determinaron en la Universidad Católica de Colombia.

#### 16.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

La tabla 4 muestra los ensayos de caracterización básica al agregado de las cuales la mayoría están procesadas con normas más exigentes, pero de igual forma cada una tiene su estándar en la norma técnica colombiana INVIAS.

Tabla 7. Caracterización básica de los agregados

<b>Ensayo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultado</b>
Gravedad específica/ Absorción (3/4")		2.51/1.66%
Gravedad específica/ Absorción (3/8")		2.49/1.70%
Gravedad específica/ Absorción (No. 4)	AASHTO T 84-00	
Gravedad específica/ Absorción (No. 80)		
Gravedad específica/ Absorción (No. 200)		
Gravedad específica de arenas y finos/ Absorción		2.50/1.50%
Abrasión en Máquina de los Ángeles 500 Rev.	AASHTO T 96-02	24.60%
Micro-Deval	AASHTO T327-05	22.40%
10% de finos (resistencia seca)	DNER-ME 096-98	115 kN
Partículas fracturadas 1 cara	ASTM D 5821-01	87%
Partículas fracturadas 2 caras	ASTM D 5821-01	80%

Continuación tabla 7. Caracterización básica de los agregados

<b>Ensayo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultado</b>
Contenido de impurezas	UNE 4613:2000	0%
Índice de plasticidad	ASTM D 4318-00	NP
Índice de aplanamiento	NLT 354-91	9.50%
Índice de elongación	NLT 354-91	9.50%
Equivalente de arena	AASHTO T 176-02	76%

Fuente. Diseños de mezcla

### 16.1.2 VOLUMEN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

De acuerdo con la granulometría se aprecia que la distribución de tamaños es igual para los dos contenidos de asfalto, con esto se proseguirá con el cálculo de los volúmenes de asfalto, agregado y vacíos ya que en los especímenes los contenidos de asfalto varían en la tabla 4 se aprecia el cálculo de volumen para los especímenes con el 5% y en la tabla 5 los volúmenes para especímenes con contenido de asfalto de 5.5%. Cabe resaltar que el volumen de la geomalla es aproximadamente del 1% por lo cual fue despreciado este valor.

Tabla 8. Volúmenes mezcla asfáltica 5.0%

<b>VOLUMEN</b>		
<b>Asfalto [cm3]</b>	59.29	431.87
<b>Asfalto [%]</b>	11.52	11.52
<b>Briqueta Marshall [cm3]</b>	<b>514.82</b>	<b>3750</b>
<b>Agregados [cm3]</b>	52.39	381.61
	35.63	259.50
	92.21	671.64
	83.82	610.58
	80.77	588.34
	32.31	235.33
	30.00	218.52
	27.69	201.71
<b>Asfalto + agregado</b>	494.10	3599.11
<b>Vacíos [cm3]</b>	20.71	150.89
<b>Vacíos [%]</b>	4.02	4.02
<b>VOLUMEN [%]</b>	<b>514.82</b>	<b>3750</b>

Fuente. Elaboración propia

Tabla 9. Volúmenes mezcla asfáltica 5.5%

<b>VOLUMEN</b>		
<b>Asfalto [cm3]</b>	65.22	475.05
<b>Asfalto [%]</b>	12.67	12.67
<b>Briqueta Marshall [cm3]</b>	<b>514.82</b>	<b>3750</b>
<b>Agregados [cm3]</b>	52.11	379.61
	35.44	258.13
	91.72	668.11
	83.38	607.37
	80.34	585.24
	32.14	234.10
	29.84	217.37
	27.55	200.65
<b>Asfalto + agregado</b>	497.74	3625.63
<b>Vacíos [cm3]</b>	17.07	124.37
<b>Vacíos [%]</b>	3.32	3.32
<b>VOLUMEN [%]</b>	<b>514.82</b>	<b>3750</b>

Fuente. Elaboración propia

### 16.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MDC-19

El cemento asfáltico 60-70 MDC-19 que será utilizado como ligante asfáltico entre agregados fue caracterizado como se aprecia en la tabla 6.

Tabla 10. Caracterización de asfalto 60-70

<b>Ensayo</b>	<b>Método</b>	<b>Unidad</b>	<b>valor</b>
Penetración (25°C - 100 g-5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	62.5
Índice de penetración	NLT 181/88		-0.7
Punto de ablandamiento	ASTM D-36.95	°C	52.5
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1750
Gravedad específica	AASHTO T 228-04		1.012
Viscosidad a 135°C	AASHTO T-316	Pa-s	0.36
Ductilidad /25°C 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>105
<b>Ensayo sobre el residuo de asfalto después del RTFOT</b>			
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0.47
Penetración (25°C100 g-5s) % de la penetración original I	ASTM D-5	%	72
Incremento del punto de ablandamiento	ASTM D-36.95	°C	5

Fuente. Elaboración propia

## **16.2 DESCARTE DE INFORMACIÓN**

### **16.2.1 Ensayo de flexión bajo carga monotónica**

Debido a que no es un ensayo normalizado no se presentan requerimientos para determinar si los datos obtenidos en el laboratorio son óptimos o deben ser descartados, sin embargo, los resultados obtenidos en este proyecto investigativo en cuanto a carga y deformación no supera el 10% de dispersión se procederá con el análisis de resultados.

## **16.3 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS**

Generalmente para las probetas de asfalto deben ser cilíndricas. De 101.6 mm (4.0”) de diámetro y  $101.6 \pm 2.5$  mm ( $4.0 \pm 0.1$ ”) de altura, sin embargo, para este proyecto y debido al objeto de este se optó por vigas asfálticas cuya geometría permitirá una mejor reacción del refuerzo con geomalla.

## **16.4 TEMPERATURA DE LA MEZCLA**

Los agregados se deberán sacar hasta masa constante a una temperatura entre 105° C y 110° C (221° F y 230° F) y se separarán por tamizado en los tamaños deseados.

La temperatura a la cual se debe calentar el cemento asfáltico para las mezclas será la requerida para producir una viscosidad de  $170 \pm 20$  centiStokes. (1 centistoke = 1 mm<sup>2</sup> /s). La temperatura a la cual se deberá calentar el cemento asfáltico para que tenga una viscosidad de  $280 \pm 30$  centiStokes, será la temperatura de compactación. (Ver Figura 6).

Para las temperaturas de mezclado y posterior compactación fue seguido el procedimiento señalado en ASTM D6925 que adopta temperaturas de mezclas densas en caliente de  $85 \pm 15$  SSF (170 cP) y  $140 \pm 15$  SSF (280 cP) FALLA DE LAS VIGAS

Durante la elaboración del ensayo de carga monotónica aplicada a las ocho (8) vigas asfálticas se apreció que todas fallaron a una carga promedio de 7.245 kN para las vigas con contenido de asfalto de 5.0 % y una carga promedio de 8.13 kN para las vigas con contenido de asfalto de 5.5 %.

De acuerdo con estos resultados, las cargas muestran una estabilidad similar esto quiere decir que los ensayo no muestran valores atípicos en los resultados.

## 16.5 DEFORMACIÓN DE LAS VIGAS

En el proceso de ensayo a flexión se realizó la medición de deformación máxima cuando la carga máxima es aplicada sobre las vigas hasta su falla la cual arrojo un promedio de 2.09 mm para las vigas con contenido de asfalto de 5.0% y 2.07 para vigas con contenido de asfalto de 5.5%

La deformación que se presentó en el ensayo a flexión bajo carga monotónica es coherente con la cantidad de asfalto aplicado a los dos grupos de mezcla, ya que al tener mayor cantidad de asfalto su deformación fue menor, tal como se esperaba antes de iniciar el ensayo.

## 16.6 RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación, se presenta el resumen de resultados obtenidos en laboratorio

Tabla 11. Resumen de resultados

Mezcla	MDC-19 (5.0 % contenido de asfalto)			
Carga Max. (kN)	7.16	7.48	7.19	7.15
Def. (mm)	2.260	1.90	2.15	2.03
Promedio carga (kN)	7.245			
Promedio de deformación (mm)	2.09			
Mezcla	MDC-19 (5.5 % contenido de asfalto)			
Carga Max. (kN)	7.91	7.98	8.42	8.2
Def. (mm)	1.90	2.150	2.03	2.2
Promedio carga (kN)	8.13			
Promedio de deformación (mm)	2.07			

Fuente. Elaboración propia

**16.6.1 Resultados de especímenes de 10 cm de espesor con contenido asfáltico de 5% con refuerzo con geomalla a un tercio inferior de la base de la viga.**

Tabla 12. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 1 (MDC-19 CA 5.0 %)

Ref.	VIGA No 1			PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO
b (cm)	15	15.6	15.4	15.3	15.6	15
d (cm)	10.7	10.5	10.6	10.6	10.7	10.5
L (cm)	42			42	42	42
a (cm)	20.3	18.5	21.4	20.1	21.4	18.5
Def. (in/1000)	<b>90</b>					
P (kN)	<b>7.16</b>					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 13. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 2 (MDC-19 CA 5.0 %)

Ref.	VIGA No 2			PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO
b (cm)	15.4	15.2	15.4	15.3	15.4	15.2
d (cm)	10.1	10.1	10.3	10.2	10.3	10.1
L (cm)	42			42	42	42
a (cm)	18.9	20.2	21	20.0	21	18.9
Def. (in/1000)	<b>75</b>					
P (kN)	<b>7.48</b>					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 14. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 3 (MDC-19 CA 5.0 %)

Ref.	VIGA No 3			PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO
b (cm)	15.6	15.8	15.5	15.6	15.8	15.5
d (cm)	10.7	10.8	10.7	10.7	10.8	10.7
L (cm)	42			42	42	42
a (cm)	22.2	18.9	19.9	20.3	22.2	18.9
Def. (in/1000)	<b>85</b>					
P (kN)	<b>7.19</b>					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 15. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 4 (MDC-19 CA 5.0 %)

Ref.	VIGA No 4			PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO
b (cm)	15.3	15.2	15.1	15.2	15.3	15.1
d (cm)	10.6	10.3	10.5	10.5	10.6	10.3
L (cm)	42			42	42	42
a (cm)	18	21.7	22.4	20.7	22.4	18
Def. (in/1000)	<b>80</b>					
P (kN)	<b>7.15</b>					

Fuente. Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo bajo carga monotónica, para los resultados de especímenes de 10 cm de espesor con contenido asfáltico de 5.5% con refuerzo con geomalla a un tercio inferior de la base de la viga. Los ensayos no muestran valores atípicos en resultados.

Tabla 16. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 5 (MDC-19 CA 5.5 %)

Ref.	VIGA No 5			PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO
b (cm)	15.2	15.4	15.2	15.3	15.4	15.2
d (cm)	10.4	10.4	10.2	10.3	10.4	10.2
L (cm)	42			42	42	42
a (cm)	23.5	22.3	21	22.3	23.5	21
Def. (in/1000)	<b>60</b>					
P (kN)	<b>7.91</b>					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 17. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 6 (MDC-19 CA 5.5 %)

Ref.	VIGA No 6			PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO
b (cm)	15.2	15.7	15.5	15.5	15.7	15.2
d (cm)	10.8	10.6	10.8	10.7	10.8	10.6
L (cm)	42			42	42	42
a (cm)	23.5	23.3	24	23.6	24	23.3
Def. (in/1000)	<b>85</b>					
P (kN)	<b>7.98</b>					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 18. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 7 (MDC-19 CA 5.5 %)

Ref.	VIGA No 7			PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO
b (cm)	15.2	15.1	15.2	15.2	15.2	15.1
d (cm)	10.7	10.3	10.8	10.6	10.8	10.3
L (cm)	42			42	42	42
a (cm)	24	18.7	24.5	15.7	18.7	14
Def. (in/1000)	<b>45</b>					
P (kN)	<b>8.42</b>					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 19. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para el espécimen No. 8 (MDC-19 CA 5.5 %)

Ref.	VIGA No 8			PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO
b (cm)	15.4	15.6	15.2	15.4	15.6	15.2
d (cm)	10.3	10.7	10.8	10.6	10.8	10.3
L (cm)	42			42	42	42
a (cm)	22	20	17	19.7	22	17
Def. (in/1000)	<b>55</b>					
P (kN)	<b>8.2</b>					

Fuente. Elaboración propia

Tabla 20. Resumen de resultados

Mezcla	MDC-19 (5.0 % contenido de asfalto)			
Carga Max. (kN)	7.16	7.48	7.19	7.15
Def. (mm)	2.260	1.90	2.15	2.03
Promedio carga (kN)	7.245			
Promedio de deformación (mm)	2.09			
Mezcla	MDC-19 (5.5 % contenido de asfalto)			
Carga Max. (kN)	7.91	7.98	8.42	8.2
Def. (mm)	1.90	2.150	2.03	2.2
Promedio carga (kN)	8.13			
Promedio de deformación (mm)	2.07			

Fuente. Elaboración propia

## 16.7 FALLA EN LA VIGAS

A continuación, se presenta la recopilación de fracturas que se tuvieron en los ocho (8) especímenes.

Tabla 21. Distancia entre la línea de fractura y el soporte más cercano (a) (cm) 5% asfalto.

Distancia entre la línea de fractura y el soporte más cercano (a) (cm)	20.3	18.5	21.4	18.9	20.2	21	22.2	18.9	19.9	18	21.7	22.4
--	------	------	------	------	------	----	------	------	------	----	------	------

Fuente. Elaboración propia

Tabla 22. Distancia entre la línea de fractura y el soporte más cercano (a) (cm) 5.5% asfalto.

Distancia entre la línea de fractura y el soporte más cercano (a) (cm)	23.5	22.3	21	23.5	23.3	24	24	18.7	24.5	22	20	17
--	------	------	----	------	------	----	----	------	------	----	----	----

Fuente. Elaboración propia

## 16.8 COMPARACIÓN DE VIGAS REFORZADAS CON GEOMALLA VS VIGAS ASFÁLTICAS REFORZADAS CON MATERIAL NO CONVENCIONAL VS VIGAS DE REFERENCIA SIN REFUERZO

A continuación, se presenta la comparación estadística de tres mezclas asfálticas reforzadas con diferentes materiales y sin refuerzo, estos datos son obtenidos de la colaboración de dos artículos referenciados en esta investigación.

La investigación realizada por Buitrago, Salgado y Romero que consiste en la medición de la resistencia a flexión de mezclas de concreto asfáltico a partir del análisis de la magnitud de deformaciones ocurridas en especímenes sometidos a cargas puntuales y la investigación de Millan y Ramirez que consiste en la influencia del uso de capsulas de café recicladas en la resistencia a flexión de mezclas asfálticas.

Esta comparación se realiza con el fin de observar gráficamente el comportamiento de las tres mezclas reforzadas con material convencional de la cual consiste este proyecto vs mezcla asfáltica reforzada con material no convencional (capsulas de café) estas dos investigaciones cumplen con los mismos parámetros físicos y mecánicos en cuanto a elaboración y ensayo a flexión y mezcla asfáltica llamada en este proyecto (Control) la cual no posee refuerzo en su composición.

Tabla 23. Resultados vigas de control

<b>Vigas de control (Buitrago, Salgado &amp; Romero - Medición de la resistencia a flexión de mezclas de concreto asfáltico a partir del análisis de la magnitud de deformaciones ocurridas en especímenes sometidos a cargas puntuales).</b>			
<b>Contenido de Asfalto (%)</b>	<b>5%</b>		
<b>Numero de vigas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Carga (kN)</b>	4.6	4.56	4.45
<b>Deformación (in/1000)</b>	170	160	155
<b>Promedio Carga (kN)</b>	<b>4.53</b>		
<b>Promedio Deformación (in/1000)</b>	<b>162</b>		
<b>Promedio Rigidez</b>	<b>0.02802</b>		
<b>Contenido de Asfalto</b>	<b>5.5%</b>		
<b>Numero de vigas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Carga (kN)</b>	4.81	4.99	5.12
<b>Deformación (in/1000)</b>	160	175	170
<b>Promedio Carga (kN)</b>	<b>4.97</b>		
<b>Promedio Deformación (in/1000)</b>	<b>168</b>		

Fuente. Elaboración propia

Tabla 24. Resultados vigas reforzadas con capsulas de café

<b>Vigas reforzadas con material no convencional - Capsulas de café (Millan &amp; Ramirez - Influencia del uso de capsulas de café recicladas en la resistencia a flexión de mezclas asfálticas).</b>				
<b>Contenido de Asfalto (%)</b>	<b>5%</b>			
<b>Numero de vigas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Carga (kN)</b>	2.91	2.94	2.71	2.63
<b>Deformación (in/1000)</b>	25	44	25	35
<b>Promedio Carga (kN)</b>	<b>2.85</b>			
<b>Promedio Deformación (in/1000)</b>	<b>32.25</b>			
<b>Promedio Rigidez</b>	<b>0.08848</b>			
<b>Contenido de Asfalto (%)</b>	<b>5.5%</b>			
<b>Numero de vigas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Carga (kN)</b>	2.07	2.38	2.16	2.05
<b>Deformación (in/1000)</b>	49	53	49	53
<b>Promedio Carga (kN)</b>	<b>2.20</b>			
<b>Promedio Deformación (in/1000)</b>	<b>51.00</b>			

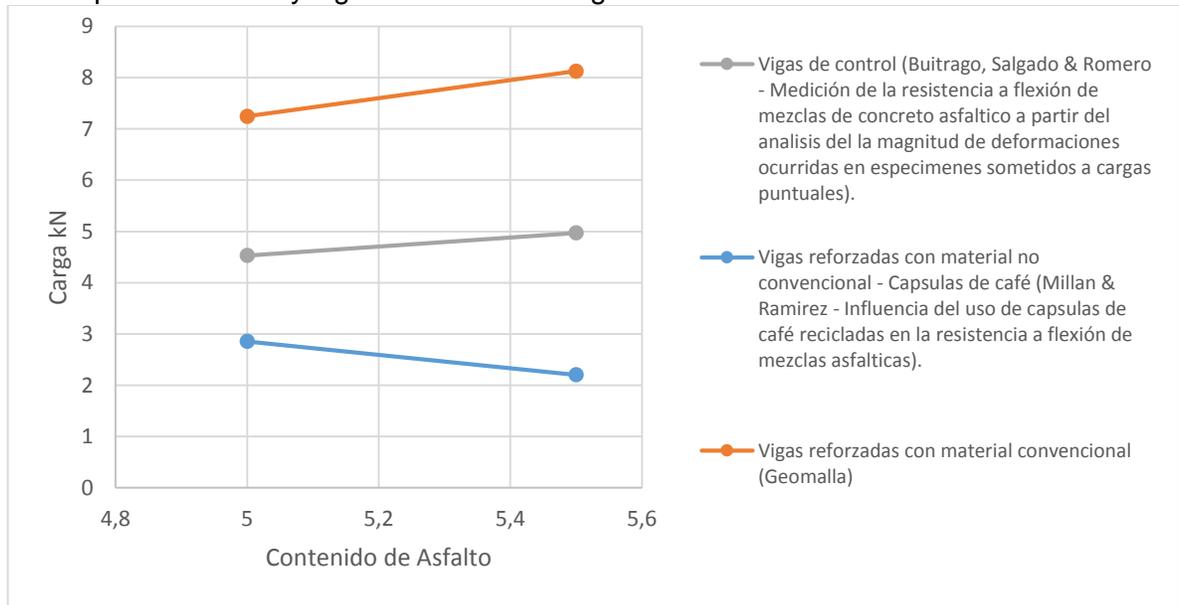
Fuente. Elaboración propia

Tabla 25. Resultados vigas reforzadas con geomalla

Vigas reforzadas con material convencional (Geomalla)				
Contenido de Asfalto (%)	5%			
Numero de vigas	1	2	3	4
Carga (kN)	7.16	7.48	7.19	7.15
Deformación (in/1000)	23	22	22	20
Promedio Carga (kN)	7.25			
Promedio Deformación (in/1000)	21.75			
Promedio Rigidez	0.33310			
Contenido de Asfalto (%)	5.5%			
Numero de vigas	1	2	3	4
Carga (kN)	7.91	7.98	8.42	8.2
Deformación (in/1000)	15	18	24	20
Promedio Carga (kN)	8.13			
Promedio Deformación (in/1000)	19.25			

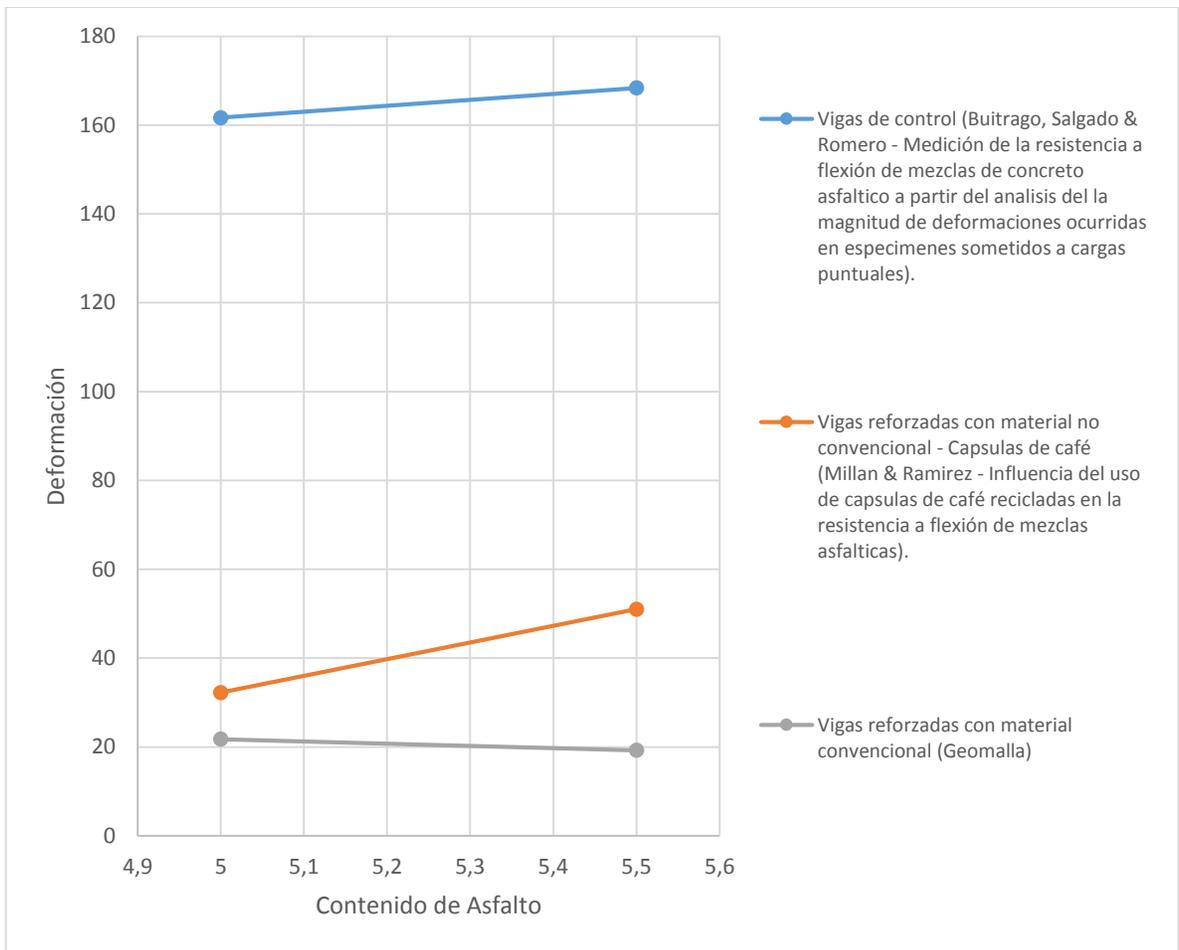
Fuente. Elaboración propia

Grafica 2. Comparación Carga vs Contenido de Asfalto de vigas de control, vigas reforzadas con capsulas de café y vigas reforzadas con geomalla



Fuente. Elaboración propia

Grafica 3. Comparación Deformación vs Contenido de Asfalto de vigas de control, vigas reforzadas con capsulas de café y vigas reforzadas con geomalla



Fuente. Elaboración propia

Tabla 26. Coeficiente de variación de carga de las diferentes mezclas asfálticas

Mezcla	Contenido de asfalto (%)	Carga	Promedio	Coeficiente de variación
Vigas de control	5%	4.6	4.54	1.71%
		4.56		
		4.45		
	5.50%	4.81	4.97	
		4.99		
		5.12		
Vigas reforzadas con capsulas de café	5%	2.91	2.7975	5.41%
		2.94		
		2.71		
		2.63		
	5.50%	2.07	2.165	
		2.38		
		2.16		
		2.05		
Vigas reforzadas con geomalla	5%	7.16	7.245	2.18%
		7.48		
		7.19		
		7.15		
	5.50%	7.91	8.1275	
		7.98		
		8.42		
		8.2		

Fuente. Elaboración propia

## 17. CONCLUSIONES

1. El objetivo principal fue evaluar la resistencia a flexión de los diferentes especímenes prismáticos de mezcla asfáltica con en dos grupos de contenido de asfalto diferente, induciendo hasta la falla mediante la respuesta bajo carga monotónica con la inclusión de geomalla en el tercio inferior del espécimen, los resultados obtenidos mediante el análisis de cargas monotónicas a flexión son buenos indicadores para realizar posteriores estudios de correlación con refuerzos alternativos no convencionales.
2. El ensayo modificado con el cual se evaluó la flexión en muestras prismáticas de mezcla asfálticas es apropiado para el fin de la investigación, de los cuales mostraron resultados razonables, de acuerdo con la configuración de muestras y ensayos propuestos.
3. Los especímenes que físicamente presentaban una robustez evidente mostraron un comportamiento mecánico esperado en el cual no llegaron a la ruptura total de las vigas si no por el contrario grietas superficiales.
4. En cuanto a la deflexión mostrada en las vigas en el momento de falla, muestra valores menores cuando el contenido de asfalto es mayor y por consiguiente la carga fue mayor en estas vigas, lo cual brinda luces valiosas en cuanto a los resultados obtenidos.
5. De acuerdo con la caracterización de los materiales utilizados se muestra la misma granulometría para los dos grupos con contenido de asfalto diferente.
6. Durante los ensayos de laboratorio fue indispensable como refuerzo la geomalla la cual brindo durante el ensayo una buena tensión dentro de la viga la cual se notó al momento de que ninguno de los especímenes llegase a la ruptura total.
7. Las fallas que se presentaron en todos los especímenes se presentaron dentro del tercio medio de la luz libre esto es un buen indicador de que los materiales granulares, el ligante asfáltico y la geomalla cumplieron su objetivo de deformación.
8. El ensayo modificado a flexión bajo carga monotónica para especímenes de vigas asfálticas muestra una deformación bastante visible la cual puede ser de estudio para futuros proyectos de análisis.

## 18.RECOMENDACIONES

1. No desencofrar los especímenes antes de las 24 horas de mezcladas, con el fin de evitar perdida en el área de contacto, que puede modificar los resultados obtenidos de la resistencia bajo carga monotónica.
2. Después de que han pasado las 24 y se han desencofrado los especímenes deben ser trasladados a un cuarto libre de humedad de forma ordenada y libre de cargas axiales.
3. Para el ensayo a flexión de carga monotónica, la superficie debe ser en lo posible lisa, limpia y libre de humedad superficial.
4. Es importante mencionar que para garantizar resultados coherentes se debe contar con equipos calibrados y con sus mantenimientos actualizados.
5. Se debe realizar una ampliación de la investigación con el fin de aumentar el número de muestras y variar las condiciones de evaluación tales como ambiente, clima etc....

## BIBLIOGRAFÍA

- NTC 1486 de 2008. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado, y otros trabajos de investigación. ICONTEC. (2008).
- NTC 4342 de 2003. Método de ensayo para determinar la retención asfáltica de geotextiles utilizados en pavimentos asfálticos. ICONTEC. (2003).
- NTC 1998 de 2009. Método de ensayo para determinación de la carga de rotura y la elongación de geotextiles. ICONTEC. (2003).
- ASTM C 127 – 01. Método de ensayo estándar para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso.
- ASTM C 128 – 01. Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.
- ASTM D 5821-13 Standard Test Method for Determining the Porcentaje of Fractured Particles in Coarse Aggregate emitida por la American Society for Testing and Materials.
- INV-E 731-13 Toma de muestras de mezclas asfálticas para pavimentos.
- INV-E 747-13 Resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas
- INV-E 738 -13 Efecto del agua sobre la resistencia a la compresión de mezclas asfálticas compactadas
- INV-E 748-13 Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.
- ARTICULO 400-07 Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos
- Buitrago et al, (2017). Medición de la resistencia a flexión de mezclas de concreto asfáltico a partir del análisis de la magnitud de deformaciones ocurridas en especímenes sometidos a cargas puntuales. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Piloto de Colombia.
- Rondón, H. & Ruge, J.C. (2017). Medición de fatiga en mezclas asfálticas mediante ensayos de carga monotónica (en redacción).

- ALMENDAREZ, REYES & MONCADA. 2017. Diseño de Pavimentos Flexibles con Refuerzo de Geomalla Triaxial Utilizando la Metodología Giroud-Han: Caso de Aplicación en Honduras. s.l. : LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, 2017.
- ALMENDAREZ, REYES & MONDACA. 2017. Diseño de Pavimentos Flexibles con Refuerzo de Geomalla Triaxial Utilizando la Metodología Giroud-Han: Caso de Aplicación en Honduras. Boca ratón : s.n., 2017.
- ALVAREZ. 2009. Determinación de la energía superficial libre de cementos asfálticos colombianos. Bogotá : s.n., 2009.
- Assessing artificial neural network performance in estimating the layer properties of pavements. ROMO, BELTRAN &. 2017. 2, s.l. : ingeniería e investigación, 2017, Vol. 34.
- Assessing artificial neural network performance in estimating the layer properties of pavements. ROMO, BELTRAN &. 2017. 2, s.l. : ingeniería e investigación, 2017, Vol. 34.
- 
- BAUTISTA, ROCALLO &. 2013. Desempeño a Fatiga y Ahuellamiento de Mezclas en Servicio en la Ciudad de Bogotá, Comparadas con Mezclas Envejecidas en Laboratorio en Cámara UV. Bogotá : s.n., 2013.
- CARCAÑO, SOLIS. 2003. Influencia de los agregados pétreos en las características del pavimento. Yucatán : Redalyc, 2003.
- DURAN, MILLAN &. 2018. *INFLUENCIA DEL USO DE CAPSULAS DE CAFÉ RECICLADAS EN LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Bogotá, D.C. : s.n., 2018.
- FLORES, DELGADO & GARNICA. 2017. Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas . 2017.
- FLORES, DELGADO, GARNICA & GARCIA. 2017. Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas . 2017.
- *Geogrid Reinforcement of Granular Bases in flexible pavements*. WALLS. 2010. 2010.
- Grupp, Blanco &. 2008. Plan de estudio para la evaluación del comportamiento de un pavimento flexible reforzado con geosintéticos. Maracay : s.n., 2008.

- Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles. VALDÉS, PEREZ & MARTÍNEZ. 2012. 0717-7925, Santiago De Chile : Revista de la construccion, 2012.