

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN ESPECÍMENES DE  
CONCRETO ASFÁLTICO, USANDO UNA RED DE CÁPSULAS DE CAFÉ  
DESECHO.**

**YULY CARDONA CAMPUZANO  
CÓDIGO: 504715  
LUIS EDUARDO CADENA  
CÓDIGO: 504818**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D. C.  
2018**

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN ESPECÍMENES DE  
CONCRETO ASFÁLTICO, USANDO UNA RED DE CÁPSULAS DE CAFÉ  
DESECHO.**

**YULY CARDONA CAMPUZANO  
CÓDIGO: 504715  
LUIS EDUARDO CADENA  
CÓDIGO: 504818**

**ASESOR  
JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS  
INGENIERO CIVIL**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D. C.  
2018**



## 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.

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**BOGOTÁ D.C., octubre 2018**

## **AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA**

Agradecemos a todos aquellos que nos brindaron su apoyo en este proceso, a los amigos que estuvieron a nuestro lado viviendo el agite propio de la universidad. Aquellos Amigos de momento y aquellos amigos que serán para toda la vida a todos ellos nuestros más profundos agradecimientos.

A nuestras familias nuestro infinito agradecimiento por ser el pilar de nuestras vidas, sin su respaldo en los momentos difíciles este objetivo no sería realidad; a ellos que en el momento en que el agotamiento y los sacrificios de la universidad nos hacían pensar en desistir mil gracias por evitarlo y mostrarnos el camino.

## TABLA DE CONTENIDO

|   | Pág.      |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN .....  | 10        |
| <b>1. GENERALIDADES .....</b>                               | <b>13</b> |
| 1.1. ANTECEDENTES .....                                     | 13        |
| 1.2. FORMULACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....          | 15        |
| 1.2.1.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....                        | 15        |
| 1.2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....                       | 16        |
| 1.3. OBJETIVOS .....  | 17        |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....                               | 17        |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                           | 17        |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN .....                                    | 18        |
| 1.5. DELIMITACIÓN.....                                      | 20        |
| 1.5.1. ESPACIO.....   | 20        |
| 1.5.2. TIEMPO.....  | 20        |
| 1.5.3. CONTENIDO.....                                       | 20        |
| 1.5.4. ALCANCE .....  | 20        |
| 1.5.5. LIMITACIONES .....                                   | 20        |
| 1.6. MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL.....                  | 21        |
| 1.6.1.GENERALIDADES DE MEZCLA BITUMINOSA .....              | 21        |
| 1.6.1.1. COMPOSICIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS .....       | 21        |
| 1.6.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS .....    | 22        |
| 1.6.1.3. PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....            | 23        |
| <b>2. DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA MEZCLA DE ENSAYO.....</b> | <b>29</b> |
| 2.1. ENSAYO MODIFICADO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN .....    | 31        |

|   |    |
|---|----|
| <b>3. ANALISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN BAJO CARGA MONOTÓNICA</b> ..... | 34 |
| 3.1. CONDICIÓN DE LA MEZCLA.....  | 34 |
| 3.1.1. GRANULOMETRIA.....   | 34 |
| 3.1.2. PORCENTAJE DE VACIOS.....  | 37 |
| <b>4. RESULTADOS</b> .....  | 38 |
| 4.1. COMPARACION DE RESULTADO CON Y SIN CAPSULAS DE CAFÉ .....                                      | 38 |
| 4.2. COMPARACION DE RESULTADOS VARIANDO CONTENIDO DE ASFALTO .....                                  | 40 |
| 4.3. COMPARACION DE RESULTADOS RESPECTO A LA LINEA DE FALLA .....                                   | 41 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....   | 42 |
| BIBLIOGRAFÍA .....  | 44 |
| ANEXOS .....  | 48 |
| ANEXO I GRANULOMETRÍA .....   | 48 |
| ANEXO II RESULTADOS RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....   | 49 |

## LISTA DE IMÁGENES

|  | Pág. |
|--|------|
| IMAGEN 1 DISTRIBUCIÓN RED VIAL EN COLOMBIA .....   | 10   |
| IMAGEN 2 CARROLL STREET, BROOKLYN, NY, ANTES Y DESPUÉS DE SER PAVIMENTADA<br>CON ASFALTO EN 1900. .... | 13   |
| IMAGEN 3 MUESTRAS DE DAÑOS AL CONCRETO ASFÁLTICO, POR FALTA DE FLEXIÓN....                             | 16   |
| IMAGEN 4 CÁPSULAS DE CAFÉ.....   | 17   |
| IMAGEN 5 SECCIÓN TRANSVERSAL CONCRETO ASFALTICO .....  | 18   |
| IMAGEN 6 ESTADO DE LA RED A CARGO DEL INVIAS. ....   | 19   |
| IMAGEN 7 ENCUESTA REALIZADA POR LA ORGANIZACIÓN DE CONSUMIDORES Y<br>USUARIOS EN ESPAÑA EN 2012.....   | 28   |
| IMAGEN 8 MEZCLA ASFÁLTICA FINAL .....  | 30   |
| IMAGEN 9 DISTRIBUCIÓN DE LAS CÁPSULAS DE CAFÉ EMBEBIDAS EN LA VIGA DE<br>MUESTRA.....                  | 30   |
| IMAGEN 10 CÁPSULAS DE CAFÉ SOBRE BASE DE MEZCLA ASFÁLTICA .....  | 31   |
| IMAGEN 11 MÁQUINA COMPACTADORA .....   | 31   |
| IMAGEN 12 MÁQUINA DE ENSAYO .....  | 32   |
| IMAGEN 13 DISTANCIA LIBRE ENTRE APOYOS.....  | 32   |
| IMAGEN 14 FALLA DE LA MUESTRA.....   | 33   |
| IMAGEN 15 TOMA DE LAS TRES MEDIDAS.....  | 33   |



## LISTA DE TABLAS

|  | Pág. |
|--|------|
| TABLA 1 FRANJAS GRANULOMÉTRICAS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRADACIÓN CONTINUA..... | 34   |
| TABLA 2 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA MDC-19 CON 5% DE CONTENIDO DE ASFALTO .....               | 35   |
| TABLA 3 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA MDC-19 CON 5,5% DE CONTENIDO DE ASFALTO .....             | 36   |

## LISTA DE GRÁFICOS

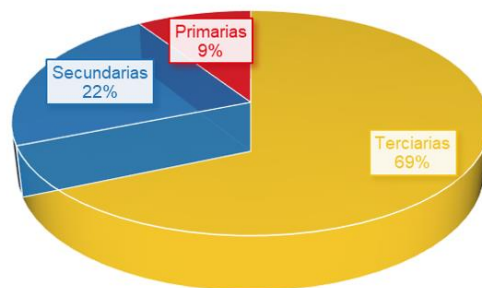
|  | Pág. |
|--|------|
| GRÁFICO 1 CURVA DE WÔHLER. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS .....     | 26   |
| GRÁFICO 2 CURVA GRANULOMÉTRICA ENSAYO 5% DE ASFALTO VS INV-450 .....                                   | 35   |
| GRÁFICO 3 CURVA GRANULOMÉTRICA ENSAYO 5,5% DE ASFALTO VS INV-450 .....                                 | 36   |
| GRÁFICO 4 BARRAS DE COMPORTAMIENTO SIN ADICIÓN Y CON ADICIÓN DE CAPSULAS DE CAFÉ 5% DE ASFALTO .....   | 38   |
| GRÁFICO 5 BARRAS DE COMPORTAMIENTO SIN ADICIÓN Y CON ADICIÓN DE CAPSULAS DE CAFÉ 5,5% DE ASFALTO ..... | 39   |
| GRÁFICO 6 COMPORTAMIENTO A LA FLEXIÓN VARIANDO EL CONTENIDO DE ASFALTO DE 5% A 5.5%. .....             | 40   |
| GRÁFICO 7 APARICIÓN DE LA LÍNEA DE FALLA RESPECTO A LOS APOYOS .....                                   | 41   |

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la infraestructura vial es un factor determinante en cualquier país para su avance económico y progreso social, ya que a través de las carreteras se genera el transporte de todo tipo de mercancías y personas. No obstante, Colombia presenta un déficit significativo tanto en número de vías como en el estado de estas, lo que trae como consecuencias la reducción del nivel de servicio y costos elevados, que se derivan de las malas condiciones, y quizás las causas de estos problemas son la poca inversión y la topografía que presenta el territorio nacional.

De acuerdo con el Ministerio de Transporte - (Transporte, 2015) , “La Red Primaria cuenta con un total de 19.079 km, divididos en Red Concesionada con 10.155 km, a cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura - ANI y en Red no Concesionada con 8.924 km a cargo del Instituto Nacional de Vías – INVIAS, la Red Secundaria a cargo de los departamentos asciende a 45.137 km y la Red Terciaria cuenta con una longitud aproximada de 142.284 km.”, en la Imagen 1 se observa que tan sólo el 9% corresponde a vías primarias, el 22% a vías secundarias y el 69% de la malla vial en Colombia pertenece a vías terciarias.

**Imagen 1 Distribución Red Vial en Colombia**



Fuente: Ministerio de Transporte. (2016).

Por otro lado, en los últimos años, Colombia ha tenido un aumento significativo del parque automotriz, tanto en magnitud de carga como en número; debido a las exigencias de los usuarios sobre los patrones de comodidad y seguridad, se hace necesario que las carreteras tengan una mayor vida útil, que la inversión destinada a la construcción sea debidamente adecuada según las exigencias y que presenten la menor cantidad de intervenciones de mantenimiento o rehabilitación; es importante que el Estado presente una gran inversión económica y efectúe controles necesarios sobre la construcción de las vías, brindando así una mejor calidad en estas obras de gran magnitud para el país.

Por lo tanto, este proyecto se genera a partir del semillero de investigación de GEOMATERIALES de la Universidad Católica de Colombia, donde se evaluarán las mezclas bituminosas a través de procesos experimentales con materiales no convencionales.

Existe un impacto ecológico bastante amplio, que es generado a causa de la producción y utilización de envases biodegradables, como las cápsulas de café hechas de aluminio y plástico, utilizadas para su consumo en monodosis. Estas capsulas serán usadas con el fin de generar una especie de “geo celda” en una mezcla asfáltica, con la cual se pueda mitigar el impacto ambiental, ya que: *“Las cápsulas de café requieren innecesarios recursos para su fabricación y generan excesivos desechos. No pueden reciclarse fácilmente porque mezclan plástico y aluminio. Son 6 gramos de café y 3 gramos de envoltorio”*<sup>1</sup>. Además de esto, tardan entre 150-500 años en descomponerse convirtiéndose así en un problema ambiental.

La preocupación mundial por el medio ambiente ha hecho que, en los últimos años, el estudio y análisis de comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas a partir del uso de materiales contaminantes y no reciclables aumente, debido a la necesidad de generar nuevas alternativas de diseño.

Como mezcla de referencia se utilizó una Mezcla Densa en Caliente (MDC-19), adicionalmente como complemento de la mezcla bituminosa se empleó agregado pétreo procedentes de planta de asfalto y arena como agregado fino, materiales que generan mayor resistencia a la mezcla, permitiendo la fácil combinación y manejo con otros materiales nada convencionales a los estipulados en las especificaciones de construcción del INVÍAS, cumpliendo con las condiciones y criterios de calidad.

Por lo tanto, el desarrollo del trabajo inicia con la identificación de conceptos claves, formulaciones prácticas y técnicas resultado de una revisión bibliográfica, que pueden afirmarse como una constante importante dentro de los procesos de evaluación de ensayos de mezclas asfálticas con materiales no convencionales.

---

<sup>1</sup> Estas son las declaraciones de Jan Dube, miembro del Departamento de Medioambiente del Ayuntamiento de Hamburgo y una de las mayores voces en contra del “kaffeekapselmaschine”

Para ello, se contempló varias etapas, la primera corresponde a la identificación de información relacionada al diseño de mezclas bituminosas, su composición, sus características y propiedades. La segunda se enmarca en el desarrollo del diseño la mezcla y metodología utilizada para el procedimiento de elaboración de la viga de ensayo, en esta se contemplan los materiales empleados para la ejecución de las muestras (asfalto, materiales granulares, y cápsulas de café) con su respectiva descripción. La tercera describe el desarrollo experimental y los resultados con su respectivo análisis para mezclas bituminosas, obtenidas por el método de ensayo basado en la normativa INVIAS 414-13. Posteriormente se presenta el análisis de resultados y comparación técnica mediante métodos analíticos y gráficos, para terminar con las conclusiones y recomendaciones, las cuales son tratadas al final de la Tesis.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES

La mezcla bituminosa artificial de arena y asfalto fue usada por primera vez en forma de aplicaciones locales en Newark, Nueva Jersey, in 1870, y en la 5ª Avenida de Nueva York en 1873, aunque su uso extensivo se daría inicialmente en Washington en 1877. Hoy en día conocido como pavimento asfáltico, hacia 1902 había sido ya extendido en vastísimas cantidades en alrededor de 100 ciudades de los Estados Unidos (Imagen 2). (Sanz, 2016)

#### **Imagen 2 Carroll Street, Brooklyn, NY, antes y después de ser pavimentada con asfalto en 1900**



Fuente: Sanz, J. (2016). Recuperado de <https://ingeniaviarum.wordpress.com/2016/04/21/1902-el-asfalto-se-abre-paso/>

A lo largo de estos de 140 años la composición de la mezcla asfáltica ha cambiado muy poco salvo algunas experiencias en la generación bases granulares con material reciclado de pavimentos removidos previamente, se han hecho pocos intentos por realizar mezclas con materiales recuperados o reciclables

En Colombia, según (Mejía Umbarila & Sierra Hernández, 2017), las Instituciones de Educación Superior de Bogotá D.C. han formulado productos investigativos en el área de las mezclas asfálticas modificadas, acorde a sus capacidades en cuanto a: personal, infraestructura y financiamiento de los mismos, obteniendo resultados que aportan a la implementación de nuevos agentes modificadores en la realización de mezclas asfálticas en el país, siguiendo así la corriente mundial de mitigar el posible impacto ambiental de la utilización de dichos materiales en la

construcción de obras de infraestructura.

A continuación, se presentan investigaciones realizadas por varias Universidades:

La Universidad Piloto de Colombia mediante el semillero de investigación en Geo tecnología, (Buitrago Palacios, Salgado Orjuela, & Serrano Romero, 2017) diseñaron un ensayo para 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. Consta de un ensayo de laboratorio para ocasionar la falla en una mezcla asfáltica tipo MDC-19 y MDC-25, modificando diferentes parámetros físicos, mediante una carga monotónica puntual, pretendiendo entender a priori el efecto de este tipo de cargas más simples sobre el material bajo análisis, para luego en una fase posterior aplicar cargas repetitivas que provoquen la falla por fatiga en la mezcla asfáltica.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de cargas monotónicas a flexión fueron un indicador inicial que brindaron datos importantes para posteriores estudios donde se apliquen cargas repetitivas a especímenes de las mismas características.

(Millán Durán & Ramírez Lozano, 2017), en la tesis “Influencia Del Uso De Capsulas De Café Recicladas En La Resistencia A Flexión De Mezclas Asfálticas”, plantearon embeber en la muestra una red de capsulas de café (pods) de desecho de 5 cm de diámetro, que actuaran a manera de tejido de celdas (geoceldas), para minimizar las deflexiones en las vigas brindando eventualmente un mejor comportamiento en el tercio inferior del espécimen, el cual estuvo sometido a trayectorias de tracción, para las cuales la mezcla asfáltica no presentó un comportamiento apropiado.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, fomenta la innovación desde los grupos de investigación como TOPOVIAL, en pro de suplir las necesidades que demanda el desarrollo económico y social del país; es así como este grupo de investigación por medio de la producción y elaboración de diferentes estudios creó un aditivo nombrado HUSIL, el cual contiene las propiedades físicas y químicas acordes con los cementos asfálticos tipo 60-70 y 80-100 fabricados en el país y además ser apto para el medio ambiente, manteniendo las propiedades de las mezclas que han sido expuestas al ensayo Marshall, las cuales evalúan su resistencia bajo carga monotónica y alta temperatura de servicio.

Al emplear el aditivo HUSIL, los vacíos con aire en las mezclas disminuyen debido principalmente al efecto de espumado que desarrolla cuando aumenta la temperatura dentro del asfalto. Asimismo, se reportó un aumento en la resistencia bajo carga monotónica cuando se emplea dicho aditivo como producto principalmente de la disminución de los vacíos con aire en las mezclas y al efecto de rigidización que ejerce sobre el asfalto. (Parra Nieto & Bautista Barón, 2018).

En una investigación realizada por los Ingenieros (Piragauta Pantoja & Bacca Prieto, 2015) de la Universidad Católica de Colombia, se analizó el comportamiento que presenta una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC-19) modificada con residuos de caucho proveniente de una remontadora de calzado.

Mediante un ensayo dinámico reglamentado bajo la norma INVIAS INV – E – 749, -Ensayo de Tensión Indirecta Para Determinar el Módulo Resiliente de Mezclas Asfálticas-, la mezcla mostró tener mejores resultados al ensayo Marshall, sin embargo se consideró que no es bueno el comportamiento del asfalto modificado para temperaturas superiores a 20° y su aporte a mejorar las condiciones mecánicas de la mezcla no es significativo, se obtuvieron valores de Modulo muy bajos y que se traducirían en ahuellamientos de la capa asfáltica.

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

### **1.2.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

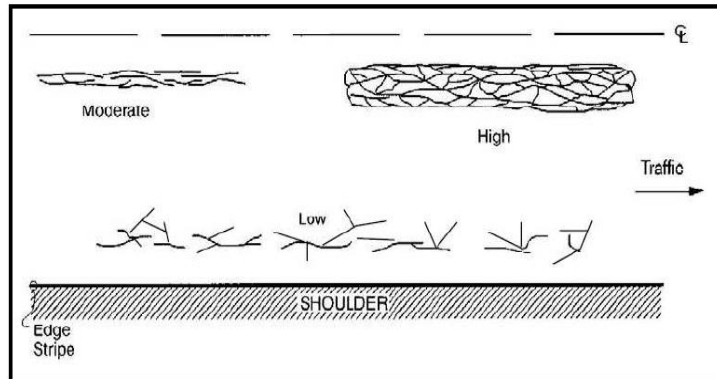
El requerimiento constante de nuevas vías de comunicación, o la necesidad de realizar mantenimiento a las ya existentes, generan la explotación constante de materiales destinados a los procesos de mantenimiento, rehabilitación o construcción de nuevas vías. Por ello, se hace necesario la búsqueda de materiales alternativos que replacen estos recursos no renovables, como son las gravas o gravilla, utilizada como base granular en los concretos asfálticos, es así que la sobre explotación de este material además ha causado graves impactos ambientales, sociales e incluso catástrofes por derrumbes.

Uno de estos materiales alternativos, se podría encontrar en las capsulas de café en desuso: *“entre 2007 y 2014 el mercado del café en cápsulas creció globalmente a un ratio anual del 26%, ocho veces más rápido que el resto de modalidades de café juntas. Colbert también apunta otro dato: aunque el consumo mundial del café crece un 1.6% cada año, las cápsulas llevan un ritmo de expansión de un 9% anual desde 2011. Para 2013, el consumo de las dosis patrocinadas por George Clooney superó al de las cafeteras de goteo. En Estados Unidos, el consumo apunta a un 25% del total, pero Europa es, junto con el país de la libertad, la otra gran consumidora (juntos suman el 90% de las ventas)”*<sup>2</sup>, sin embargo al ser un material nuevo a incluir en una mezcla, antes de la generación de un proyecto de aprovechamiento o reutilización de estas capsulas, es necesario la generación de pruebas al material resultante, una de estas pruebas es la resistencia, capacidad muy apreciada en los concretos asfálticos, y evitar las fallas a la estructura de pavimento, observadas en la Imagen 3” . .

---

<sup>2</sup> Según Ross Colbert, analista de Rabobank- <https://magnet.xataka.com/preguntas-no-tan-frecuentes/por-que-hamburgo-ha-prohibido-las-capsulas-de-cafe-y-por-que-podria-no-ser-la-unica-ciudad-en-hacerlo>

### Imagen 3 Muestras de daños al concreto asfáltico, por falta de flexion



Fuente: Li, N. (2013). Tesis doctoral "ASPHALT MIXTURE FATIGUE TESTING - Influence of Test Type and Specimen Size".

#### 1.2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El pavimento asfáltico permite la integración de materiales reciclados y la reutilización de otros, teniendo en cuenta esto y que la generación de residuos sólidos ha incrementado considerablemente, principalmente debido a la falta de planificación y una adecuada gestión final de los mismos. Generalmente estos son depositados en rellenos sanitarios o aún más grave son arrojados a botaderos a cielo abierto, sin importar los impactos ambientales negativos que se generen a causa de ello, poniendo en riesgo no solo el medio ambiente sino también la existencia de recursos no renovables es así que muchos de estos residuos tienen un alto potencial de ser reciclados o reutilizados.

Según el banco cooperativo Rabobank: *"El café es el segundo producto que más se consume en el mundo, por detrás del petróleo"*, en la última década la venta de este producto ha aumentado en un 26%. Halo, una de las productoras de envases biodegradables afirma que: *"se calcula que cada minuto se tiran 13.500 cápsulas de aluminio y plástico al cubo de residuos, o sea que, en un año, hay más de 7 mil millones de cápsulas que tardarán al menos un siglo en reciclarse en forma natural"*. (Actual, 2017), si bien por composición (aluminio, plástico y residuos de café, ver Imagen 4), estas cápsulas no son susceptibles de ser recicladas, si tienen una alta probabilidad de ser reutilizadas en un proceso o fin diferente para el cual fueron fabricadas.



#### Imagen 4 Cápsulas de café



Fuente: Elaboración propia. (2018).

En atención a esto, la presente investigación pretende reutilizar estas cápsulas, para lograr a largo plazo mitigar los efectos ambientales del uso indiscriminado de estos envases y a la vez lograr que sean un elemento adicional de un material compuesto para mejorar ciertas propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, para lo cual, considerando esta problemática y el objeto de esta investigación, surge la siguiente pregunta de investigación:

*¿Es posible mejorar el comportamiento a la flexión de mezclas asfálticas sometidas a cargas monotónicas, mediante la utilización de materiales no reciclables, como una red de capsulas de café incorporada en la mezcla asfáltica?*

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la resistencia a la flexión en especímenes de concreto asfáltico, usando una red de cápsulas de café desecho.

#### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

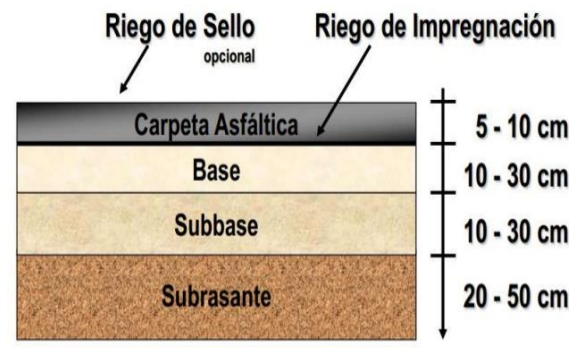
- Realizar un marco de referencia y estado del arte, identificando una serie de iniciativas, propuestas y análisis sobre ensayos que se han elaborado con concreto asfáltico, utilizando materiales contaminantes.
- Elaborar el diseño metodológico para la mezcla de ensayo y determinar la resistencia a la flexión.

- Analizar los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión bajo carga monotónica utilizando método analítico y gráfico.

#### 1.4. JUSTIFICACIÓN

El asfalto, es el material de construcción de autopistas más utilizado en el mundo, y a diferencia del concreto hidráulico, este es 100% reciclable. El uso de materiales de asfalto reciclados reduce los costos de materiales porque los materiales vírgenes son reemplazados por asfalto y agregados en materiales de asfalto reciclado, sin embargo, la generación del presente proyecto, en el cual se pretende incorporar a la base asfáltica de 10 cm de altura (ver Imagen 5), una red de capsulas de café, el uso de materiales reciclados reduce la demanda de recursos naturales no renovables, como el agregado virgen y el aglutinante de asfalto.

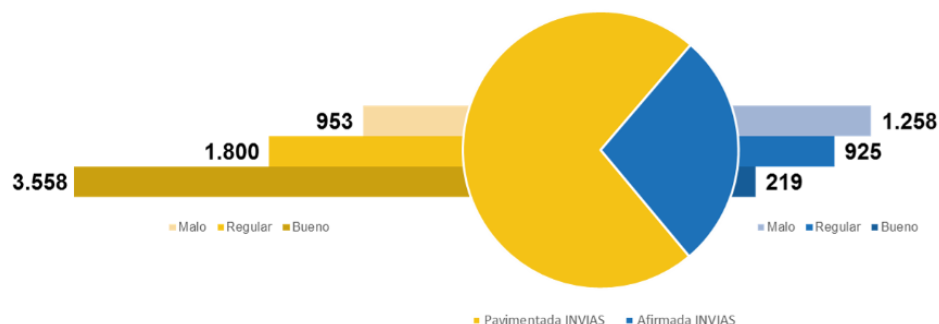
**Imagen 5 Sección transversal concreto asfáltico**



Fuente: Villareal, L. (2016). Recuperado de <http://propiedadesdelasfalto.blogspot.com/2016/06/propiedades-del-asfalto-losasfaltos-son.html>

Según lo mencionado en el artículo, Pavimento Flexible, (2017): “el volumen de tráfico es cada vez mayor en las carreteras y la creciente demanda de los pavimentos más fuertes, más duraderos y más seguros han llevado a la búsqueda de nuevos materiales, procedimientos de diseño y soluciones más rentables. Como resultado de estas investigaciones, hay constantemente innovaciones en los procedimientos de diseño y técnicas de construcción (ver Imagen 6) ya que en Colombia el mayor porcentaje de las vías están pavimentadas, con 3.558 km en estado bueno pero con 2.753 km en regular y mal estado, esto demuestra que el 43.6% de estas vías necesitan intervención de mantenimiento.

**Imagen 6 Estado de la Red a cargo del INVIAS**



Fuente: Ministerio de Transporte. (2016).

Sin embargo, unas de las principales características que se deben tener en cuenta al momento del diseño de concretos asfálticos, son la seguridad y la funcionabilidad de este; Para asegurar estos principios se deben realizar diferentes pruebas, entre ellas la prueba de la flexibilidad, característica que le permite al concreto asfáltico mayor resistencia al peso y deformación, así como eventualmente retomar su forma, posterior a una deflexión.

Para autores como (Rondón & Ruge, 2017), estimar de manera cuantitativa el comportamiento a flexión de una mezcla asfáltica, ya sea por el cálculo de la máxima deformación o por la carga máxima soportada por un espécimen, en la actualidad es poco viable, debido a la ausencia de un ensayo estandarizado que permita obtener de manera confiable este par de variables.

Ensayos realizados por (Buitrago, 2017), utilizaron una muestra de mezcla asfáltica prismática a manera de viga, sometida a cargas puntuales monotónicas, variando diferentes parámetros en el ensayo, tales como el cemento asfáltico, dimensiones de la probeta, granulometría de la muestra, entre otros, y lograr analizar el comportamiento a flexión de las mezclas asfálticas.

Para minimizar las deflexiones en las vigas, en la investigación actual se pensó en embeber en la muestra una red de capsulas de café (pods) de desecho que actúen a manera de tejido de celdas (geoceldas), brindando eventualmente un mejor comportamiento en el tercio inferior del espécimen, el cual está sometido a trayectoria de tracción, para las cuales la mezcla asfáltica no presenta un comportamiento apropiado.

El uso de estas capsulas en este proyecto, es por un asunto ambiental, debido al impacto que genera la producción y uso de estos envases, el reciclaje de estas cápsulas de aluminio consume un 5% más de energía que la producción de aluminio a partir del mineral. Una cápsula contiene unos 5-6 gramos de café molido, y el envase es de 3 gramos. (Ambiente, 2017)

Dado que hace solo una taza de café, la proporción de cápsulas de Nespresso no recicladas aumenta a un ritmo alarmante. Se han estimado calculo cercanos a los dos billones de capsulas usadas por día en el mundo, lo que significa que se pueden cubrir aproximadamente 450.000 campos de fútbol con esa cantidad de capsulas.

En 2016, las cápsulas representaron el 46% de todas las ventas globales de café y su crecimiento estimado desde el año 2000 supera el 200%. Los productores de estos elementos en la actualidad disponen de puntos y recolectan gratuitamente estos productos de desecho, debido a que no son reciclables; pero no todas las personas tienen tiempo o conciencia para acercarse al punto de reciclaje: se calcula que sólo una de cada cinco se preocupa en recolectarlos y entregarlos. (Ambiente, 2017)

## **1.5. DELIMITACIÓN**

### **1.5.1. ESPACIO**

El proyecto de grado realizará pruebas de laboratorio en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia, bajo normas internacionales ASTM C1609 y nacionales INV-414-13.

### **1.5.2. TIEMPO**

El proyecto de grado se desarrollará de acuerdo al cronograma establecido para tal fin.

### **1.5.3. CONTENIDO**

Aprovechamiento de las cápsulas de café desecho en mezclas asfálticas como mitigación al impacto ambiental.

### **1.5.4. ALCANCE**

El alcance del proyecto está delimitado a lograr el comparativo de parámetros como carga máxima y deflexión en el tercio de 16 vigas. Esta investigación es académica y se generarán conclusiones y recomendaciones de acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio.

### **1.5.5. LIMITACIONES**

Por temas presupuestales se limitará la cantidad de muestras a desarrollar, para este ensayo se realizarán 16 vigas siguiendo la normativa INV E 702-07, INV E 709-07 e INV E 712-07.

## **1.6. MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL**

En el siguiente capítulo se mostrarán de forma general algunos conceptos y referencias teóricas del comportamiento de las mezclas bituminosas, estos dos puntos serán de gran interés en el documento ya que dan un aporte importante en la elaboración de este.

### **1.6.1. GENERALIDADES DE MEZCLA BITUMINOSA**

Para autores como (Martín S, 2007), las mezclas bituminosas, también denominadas aglomerados bituminosos, constituyen el principal componente de los pavimentos flexibles de carretera. Estas mezclas están formadas por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado que, junto con las partículas más finas, denominadas filler o polvo mineral, constituyen el mastico que aglomera y cohesiona al conjunto. De este modo, las partículas que forman los áridos quedan cubiertas por una película continua de filler y betún, formando la mezcla bituminosa con unas características funcionales y estructurales adecuadas para su empleo como unidad de obra en los pavimentos de carretera.

#### **1.6.1.1. COMPOSICIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS**

##### **Agregados pétreos**

- (Higuera Sandoval, 2010), define los agregados pétreos, como una mezcla, natural o no, de piedra o gravas trituradas, escorias, arenas finas, arenas gruesas y llenante mineral. Puede contener todos o algunos de estos materiales. Los agregados deben ser limpios, duros y durables. Los agregados son los responsables de la capacidad de carga o resistencia de la mezcla y constituyen entre el 90% y 95% en peso de la mezcla y entre el 75% y 85% en volumen de esta.
- Del mismo modo (Higuera Sandoval, 2010) establece las propiedades de los agregados pétreos, como agregados MDF – 1 a MDF – 3; MDC – 1 a MDC – 3, empleados para la ejecución de cualquier mezcla bituminosa, deberán poseer una naturaleza tal, que, al aplicarle una capa de material asfáltico por utilizar en el trabajo, éste no se desprenda por la acción del agua y del tránsito. Solo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas, si se añade algún aditivo de comprobada eficacia para proporcionar una buena adhesividad.

El agregado grueso deberá proceder de la trituración de roca o grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o des integrables. Estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias objetables que

puedan impedir la adhesión completa del asfalto. El agregado fino está constituido por arena de la trituración o una mezcla de ella con arena natural. La proporción admisible de esta última dentro del conjunto se encuentra definida en la respectiva especificación (artículo 450 – 07). Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular.

## **Asfalto**

Es un material cementante de color café a negro, con consistencia sólida, semisólida o líquida, procedente de yacimientos o lagunas asfálticas o de la destilación del petróleo. El asfalto es útil al ingeniero porque es un cementante altamente impermeable y durable. Es resistente a la acción de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. También es altamente viscoso a temperatura ambiente y puede licuarse aplicando calor, un disolvente o emulsificándolo en agua. El uso del asfalto en vías puede tener dos campos de aplicación, el diseño de mezclas asfálticas y la elaboración y colocación de estas. Francis N. Hveem clasificó las propiedades de los materiales asfálticos de acuerdo con:

- La Consistencia (fluidez, viscosidad o plasticidad).
- La Durabilidad o resistencia al envejecimiento.
- La Velocidad de Curado.
- La Resistencia a la acción del agua.

Así mismo, el asfalto debe ser puro y se deben tener las precauciones de seguridad adecuadas para su manejo.

## **Vacíos de Aire**

Vacíos de aire son importantes en el comportamiento de la mezcla ya que permiten absorber los cambios volumétricos producidos por el clima o el tránsito. Para mezclas asfálticas en caliente se recomienda un porcentaje entre 3% y 5% de vacíos y para mezclas en frío se sugiere un valor mayor. Un alto contenido de vacíos puede producir deformaciones permanentes y un bajo contenido de estos, exudación.

### **1.6.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

- **Estabilidad:** Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta ahuellamientos, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.
- **Durabilidad:** Es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observa en desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.

- **Impermeabilidad:** Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.
- **Flexibilidad:** Es la capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante.
- **Resistencia a la fatiga:** Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.
- **Resistencia al deslizamiento:** Capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada.

#### 1.6.1.3. PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

- **Densidad de la mezcla:** Es el peso de un volumen específico de mezcla. La densidad obtenida en el laboratorio es la densidad patrón y la densidad obtenida in-situ se expresa como un porcentaje de esta. Una densidad alta en el pavimento terminado se traduce en una mayor durabilidad.
- **Contenido de asfalto:** Es el componente más importante. Debe ser determinado en laboratorio y controlado en obra. Mientras más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.
- **Envejecimiento de mezclas asfálticas:** Existe otra característica especial de los asfaltos. Debido a que los componen moléculas orgánicas, reaccionan con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se llama oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto; puede provocar que se haga más duro o frágil, dando origen al término “endurecimiento por oxidación” o “endurecimiento por envejecimiento”. Este fenómeno ocurre en el pavimento a una velocidad relativamente baja, si bien es mucho más rápido en un clima cálido que en uno frío. Así, el endurecimiento por oxidación es estacional, siendo más marcado en el verano que en el invierno.

#### 1.6.1.4. CUALIDADES FUNCIONALES EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LA CAPA DE RODADURA

Estas inciden fundamentalmente en su superficie, en su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

- La adherencia del neumático a la capa de rodadura.
- El desgaste de los neumáticos.
- El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- La comodidad y estabilidad en marcha.
- Las cargas dinámicas del tráfico.
- La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
- El envejecimiento de los vehículos.
- Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales de la capa de rodadura están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento.

#### **1.6.1.5. PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Se denominan los que la estructura total del pavimento se defleca o flexiona, un pavimento flexible se adapta a las cargas. Este tipo de pavimentos son de amplio uso en zonas de tráfico.

La estructura de pavimento flexible está compuesta por varias capas de material. Cada capa recibe las cargas por encima de la capa, se extiende en ella, entonces pasa estas cargas a la siguiente capa inferior. Por lo tanto, la capa más abajo en la estructura del pavimento recibe menos carga.

#### **1.6.1.6. RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Se reutiliza la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido mediante un tratamiento con aportación de calor que se realiza en el mismo lugar de la obra.

El firme se calienta mediante unos quemadores y se fresa un grosor determinado, este material es mezclado normalmente con agentes químicos rejuvenecedores y con nueva mezcla. Finalmente, la nueva mezcla se extiende y se compacta mediante procedimientos convencionales.

#### **1.6.1.7. PRUEBAS TÉCNICAS**

Consiste en la determinación de las propiedades y desempeño de los materiales, estas se logran a partir de un conjunto de ensayos o pruebas establecidas precisamente para comprobar que dichos materiales funcionen correctamente de acuerdo con rangos, límites y/o valores estándares para condiciones similares o



equivalentes. Por otro lado, la caracterización de dichos materiales se divide en dos campos de la ingeniería: infraestructura civil e infraestructura vial.<sup>3</sup>

#### **1.6.1.8. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

El objetivo de la mayoría de los estudios de flexión se concentra en investigar y predecir este comportamiento a fin de evitarlo o mitigarlo. La predicción de la vida a la flexión del concreto asfáltico es un aspecto de gran relevancia en el diseño estructural de pavimentos. Así mismo el agrietamiento ocasionado por el daño acumulado debido al paso repetido de los vehículos suele iniciarse en la cota inferior de la carpeta asfáltica donde los esfuerzos y deformaciones a la tensión son más altos.

Con el aumento del número de ciclos de carga, las grietas se propagan a la superficie manifestándose de manera longitudinal y transversal, formando un patrón comúnmente llamado agrietamiento tipo piel de cocodrilo. Entre los factores que influyen para provocar el deterioro por fatiga son: las cargas de los vehículos (sobrecargas), incremento en el volumen del tránsito y las presiones de inflado de los neumáticos. Por consiguiente, para tratar esta deficiencia la literatura técnica recomienda la utilización de asfaltos modificados Yang & Fatemi, (1998).

#### **1.6.1.9. FALLA POR FATIGA**

La falla por fatiga es uno de los principales problemas que tiene el pavimento asfáltico produciendo deterioro de su composición estructural, haciendo que aparezcan deformaciones y agrietamiento de la superficie, como resultado de los esfuerzos permanentes producidos por el tráfico recurrente que pasa sobre este.

El problema más común de este tipo de falla es que debido a la concentración de tensiones que se producen en el material, tiende a formarse un agrietamiento que fácilmente va aumentando su tamaño hasta terminar convertirse en una rotura permanente del material.

Actualmente se encuentran diferentes procedimientos y ensayos para disminuir este tipo de falla en la mezcla asfáltica. Por tal motivo es importante que al realizar la inclusión de materiales para la mezcla se elijan piezas con la menor irregularidad posible para así evitar la aparición de elementos extraños en la mezcla los cuales tienen una mayor probabilidad de causar fatiga. (Patiño Boyacá, Reyes Ortiz, & Camacho Tauta, 2014)

---

<sup>3</sup> Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de calidad en materiales de un pavimento asfáltico

Uno de los procedimientos para visualizar el rango de fatiga que tiene un material es el descrito por la curva de Wohler en la cual se visualiza la relación que tiene el esfuerzo vs el No de ciclos de la rotura, y con la cual se obtiene un número aproximado de repeticiones de la carga, que puede soportar una probeta hasta su ruptura.

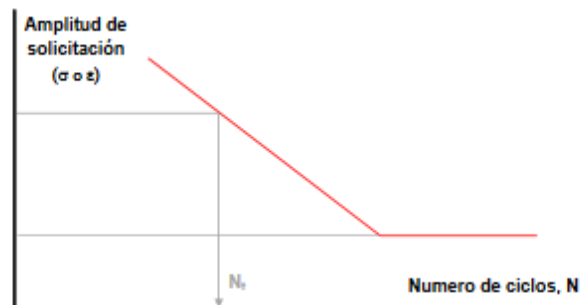
Esta curva es generalmente caracterizada por una de estas dos relaciones:

$S = A.N^b$ : la curva es una recta en coordenadas logarítmicas,

$S = a - b \log(N)$ : la curva es una recta en escala semi-logarítmica. 4

Se denomina resistencia a la fatiga para n ciclos de sollicitación, como el valor de la sollicitación que conduce a la ruptura para N ciclos. Para ciertos materiales, existe un valor límite de la amplitud de sollicitación por debajo del cual el material resiste de manera indefinida y la ruptura de la probeta no se presenta. Este valor es denominado límite de fatiga o de resistencia. En el caso de los materiales asfálticos, todavía no se ha encontrado ningún límite de resistencia. (Flores Flores, Delgado Alamilla, Garnica Anguas, & Garcia, 2013)

**Gráfico 1 Curva de Wöhler. Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas**



Fuente: Flores Flores, Delgado Alamilla, Garnica Anguas, & Garcia, (2013).

## 1.6.2. GENERALIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS CÁPSULAS DE CAFÉ

Estas pequeñas cápsulas, tienen un problema: sus materiales no son biodegradables. Cada cápsula de seis gramos de café requiere otros tres gramos de envoltorio, que en su mayoría son aluminio y plástico que no se recicla, o que se tira en el contenedor equivocado. Y eso sin contar el cartón o plástico del envase que las resguarda.

4 Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas  
[http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/8cma\\_2013/mezclas\\_asfalticas/mezclas05.pdf](http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/8cma_2013/mezclas_asfalticas/mezclas05.pdf)

A nivel mundial se estima que a cada minuto se producen casi 40 mil cápsulas de café, de plástico o de aluminio, de las cuales entre el 45 y el 70% acabarán en la basura, sin que se haga de ellas un correcto reciclaje.

### ✓ **VENTAJAS**

Las capsulas biodegradables están hechas de un material creado por Basf producido en base a un poliéster llamado Ecoflex (también desarrollado por la multinacional germana) y el biopolímero PLA, elaborado con almidón de maíz. Un papel reciclable recubre la parte exterior de la cápsula, y en su interior se encuentra este tipo de plástico biodegradable. Además, la estructura se unifica con un adhesivo compostable llamado Epotal Eco, otra creación de Basf. De esta manera, se evita –como las demás cápsulas- que la humedad, el oxígeno o la luz perjudiquen al producto<sup>5</sup>.

Estas cápsulas se fabrican “a base de fibras vegetales de procedencia 100% biológica”, informa la empresa, y asegura que en seis meses se degrada gracias a un sistema de compost industrial. Al momento de tirarlo, hay que arrojarlo al cubo de basura orgánica<sup>6</sup>.

Los alemanes, que tampoco han optado por incorporar sistemas de reciclado preparados para esta contingencia, se olvidan de comentar las bondades del reciclado del aluminio que ellos mismos están usando, en algunos casos, para fabricar componentes automovilísticos. Loable y deseable, ya que este material puede tener muchas vidas, especialmente empleado en el sector industrial.

### ✓ **DESVENTAJAS**

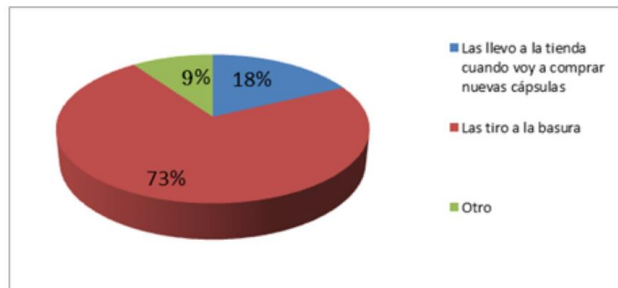
Un problema de este tipo de producto es que los consumidores lo reciclan de forma incorrecta, en la Fuente: , se refleja que el 73% de los consumidores del café en cápsula en España las tiran a la basura sin ningún proceso de reciclaje, desconociendo que éstas terminarán en un relleno sanitario causando un gran impacto negativo al medio ambiente ya que las regulaciones no lo consideran como un envase, y no debe tirarse en el contenedor amarillo. Si alguna persona trata de vaciar el café y tirar la cápsula de aluminio, siempre quedarán restos orgánicos.

---

<sup>5</sup> Otra marca que presenta sus cápsulas biodegradables es Café Ético, la filial de Ethical Coffee Company, fundada por el exdirector general de Nespresso Jean-Paul Galliard, en 2008.

<sup>6</sup> "No importa lo que digan sobre el reciclaje, esas cosas nunca serán reciclables", dijo John Sylvan, fundador de Keurig e inventor de la copa K, a James Hamblin en *The Atlantic* .

### Imagen 7 Encuesta realizada por la Organización de Consumidores y Usuarios en España en 2012



Fuente: Organización de Consumidores y Usuarios en España en 2012

## 2. DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA MEZCLA DE ENSAYO.

A continuación se muestra el resultado de las distribuciones granulométricas con sus respectivas dosificaciones realizadas en el ensayo, de acuerdo a la ubicación en la banda granulométrica especificada, en este caso la MDC-19, escogida para el proceso en los ensayos de laboratorio, paralelamente se presenta los resultados de la caracterización de los materiales gruesos y finos, para luego realizar diferentes alternativas con varias combinaciones de materiales para ajustar la gradación y la posterior aplicación de la metodología según la norma.

En la primera etapa, se realizaron 16 muestras de mezcla asfáltica con inclusión de cápsulas de café de 3 cm de diámetro para el desarrollo experimental, con una compactación constante de 75 golpes, realizando un experimento factorial variando un factor, el contenido de asfalto variable en 0.5% para cada mezcla con la misma franja granulométrica, lo anterior con el objeto de encontrar la fórmula de trabajo para el ensayo, seguido del proceso de compactación y toma de resultados del comportamiento y análisis de la resistencia a la flexión

Se consideraron aquellas variables controlables e incontrolables dentro del control de aceptación en laboratorio, con las que se obtuvo respuestas aceptables en cuanto al análisis de la resistencia a la flexión de las mezclas y así proponer las adecuadas fórmulas de trabajo mediante los criterios de control de las mezclas bituminosas.

Los moldes de ensayo son preparados logrando que cada uno tenga una ligera cantidad de porcentaje de bitumen. Este porcentaje de bitumen está determinado con base en el análisis previo de los agregados de la mezcla. Este margen da a los ensayos de laboratorio un punto de partida para determinar la fórmula de trabajo o porcentaje óptimo de bitumen de la mezcla final, donde se utilizó un contenido de asfalto variable de 5% y 5.5%, además las proporciones de las mezclas se encuentran formuladas por los resultados del análisis granulométrico.

A continuación, se describe el procedimiento según la norma INV-414-13, para la preparación de las muestras:

a) Fue obtenido el contenido óptimo de asfalto compactando cinco muestras Marshall por medio de 75 golpes por cara, aumentando los porcentajes de asfalto de 4,5% a 6,0%.

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  $140\pm 15$  SF (280 cP). (ver Imagen 8).

### Imagen 8 Mezcla Asfáltica Final

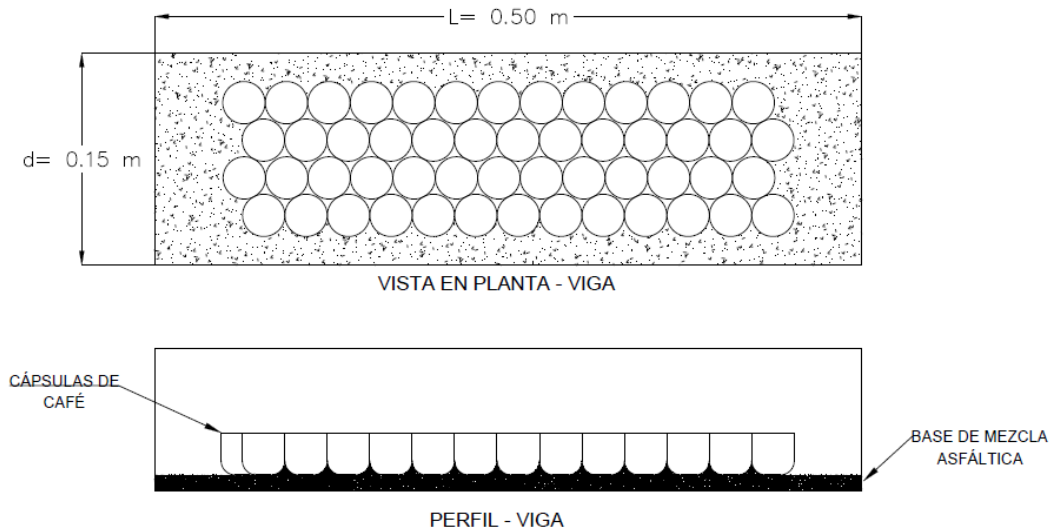


Fuente: Elaboración Propia (2018).

b) Obteniendo la caracterización de los materiales a utilizar, se inició con el armado de la viga embebiendo la red de cápsulas de café (52 unidades de 3 cm), a las cuales previamente se les retiró la tapa y el material orgánico (café), este proceso es necesario para asegurar que la mezcla asfáltica penetre en cada elemento evitando la menor cantidad de vacíos en la muestra.

Las cápsulas fueron adheridas con silicona entre sí, para asegurar varios puntos de contacto y poder hacer un acercamiento a un comportamiento de "geo celda". (ver Imagen 9)

### Imagen 9 Distribución de las cápsulas de café embebidas en la viga de muestra



Fuente: Elaboración Propia (2018).

c) Se observa en la Imagen 10, una capa de mezcla asfáltica por debajo de la red de cápsulas, la cual se extiende para que estas no queden en contacto directo con el molde.

### Imagen 10 Cápsulas de café sobre base de mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración Propia (2018).

d) Cada muestra fue compactada 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. (ver Imagen 11)

### Imagen 11 Máquina Compactadora



Fuente: Elaboración Propia (2018).

## 2.1. ENSAYO MODIFICADO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

- *Máquina de ensayo* – (ver Imagen 12) La máquina de ensayo deberá cumplir con los requerimientos del apéndice "Bases de verificación, Correcciones, e Intervalos de tiempo entre verificaciones". El método de carga en los tercios se

deberá utilizar en la realización de ensayos de flexión, empleando bloques de carga, los cuales asegurarán que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara del espécimen y sin excentricidad. (INVIAS, 2013).

### **Imagen 12 Máquina de Ensayo. Laboratorio Universidad Católica de Colombia**



Fuente: Elaboración Propia (2018).

- Los especímenes de ensayo deben cumplir con los requerimientos de la norma INV E-402 "Elaboración y curado de muestras de concreto para ensayos de compresión y flexión". Las muestras deben tener una distancia libre entre apoyos (ver Imagen 13) de al menos, tres veces su altura, con una tolerancia del 2%. Los lados de la muestra deben formar ángulos rectos con las caras superior e inferior. Todas las superficies en contacto con los bloques de aplicación de carga y de soporte deben ser suaves y libres de grietas, indentaciones, agujeros o inscripciones. (INVIAS, 2013).

### **Imagen 13 Distancia Libre entre Apoyos**



Fuente: Elaboración Propia (2018). Laboratorio Universidad Católica de Colombia



- La carga se debe aplicar de manera continua sin sobresaltos, a una tasa que incremente constantemente el esfuerzo de la fibra extrema entre 0.9 MPa/min y 1.2 MPa/min, hasta que ocurra la rotura. (ver Imagen 14).

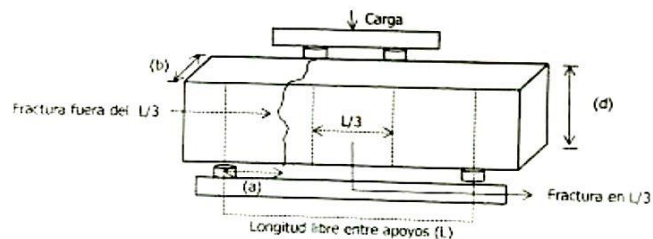
### Imagen 14 Falla de la Muestra



Fuente: Elaboración Propia (2018).

- Como paso final se toman tres medidas de cada dimensión (una en cada borde y en el centro) (ver Imagen 15), con una precisión de 1.3 mm (0.05") para determinar el ancho promedio, la altura promedio y la localización de la línea de fractura del espécimen en la sección de falla.

### Imagen 15 Toma de las tres medidas. Viga con inclusión de cápsulas de café desecho



Fuente: Elaboración Propia (2018).

### 3. ANALISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN BAJO CARGA MONOTÓNICA

#### 3.1. CONDICIÓN DE LA MEZCLA

##### 3.1.1. GRANULOMETRIA

La norma colombiana determina que la granulometría obtenida de la combinación de las distintas fracciones de agregado pétreo en los concretos asfálticos del tipo MDC-19, deberá estar comprendida dentro de las fajas establecidas en Tabla 1., con el fin de evitar segregaciones y garantizar los niveles de resistencia y compactación requeridos en la norma. (INV-450, 2013).

**Tabla 1 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua**

| TIPO DE MEZCLA  |         | TAMIZ (mm / U.S. Standard) |       |       |       |       |       |        |        |        |         |
|---|---------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
|   |         | 37.5                       | 25.0  | 19.0  | 12.5  | 9.5   | 4.75  | 2.00   | 0.425  | 0.180  | 0.075   |
|   |         | 1 ½"                       | 1"    | ¾"    | ½"    | 3/8"  | No. 4 | No. 10 | No. 40 | No. 80 | No. 200 |
|   |         | % PASA                     |       |       |       |       |       |        |        |        |         |
| DENSА   | MDC-25  |                            | 100   | 80-95 | 67-85 | 60-77 | 43-59 | 29-45  | 14-25  | 8-17   | 4-8     |
|   | MDC-19  |                            |       | 100   | 80-95 | 70-88 | 49-65 | 29-45  | 14-25  | 8-17   | 4-8     |
|   | MDC-10  |                            |       |       |       | 100   | 65-87 | 43-61  | 16-29  | 9-19   | 5-10    |
| SEMIDENSА   | MSC-25  |                            | 100   | 80-95 | 65-80 | 55-70 | 40-55 | 24-38  | 9-20   | 6-12   | 3-7     |
|   | MSC-19  |                            |       | 100   | 80-95 | 65-80 | 40-55 | 24-38  | 9-20   | 6-12   | 3-7     |
| GRUESА  | MGC-38  | 100                        | 75-95 | 65-85 | 47-67 | 40-60 | 28-46 | 17-32  | 7-17   | 4-11   | 2-6     |
|   | MGC-25  |                            | 100   | 75-95 | 55-75 | 40-60 | 28-46 | 17-32  | 7-17   | 4-11   | 2-6     |
| ALTO MÓDULO   | MAM -25 |                            | 100   | 80-95 | 65-80 | 55-70 | 40-55 | 24-38  | 10-20  | 8-14   | 6-9     |
| TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±) |         | 4 %                        |       |       |       |       | 3 %   |        |        | 2 %    |         |

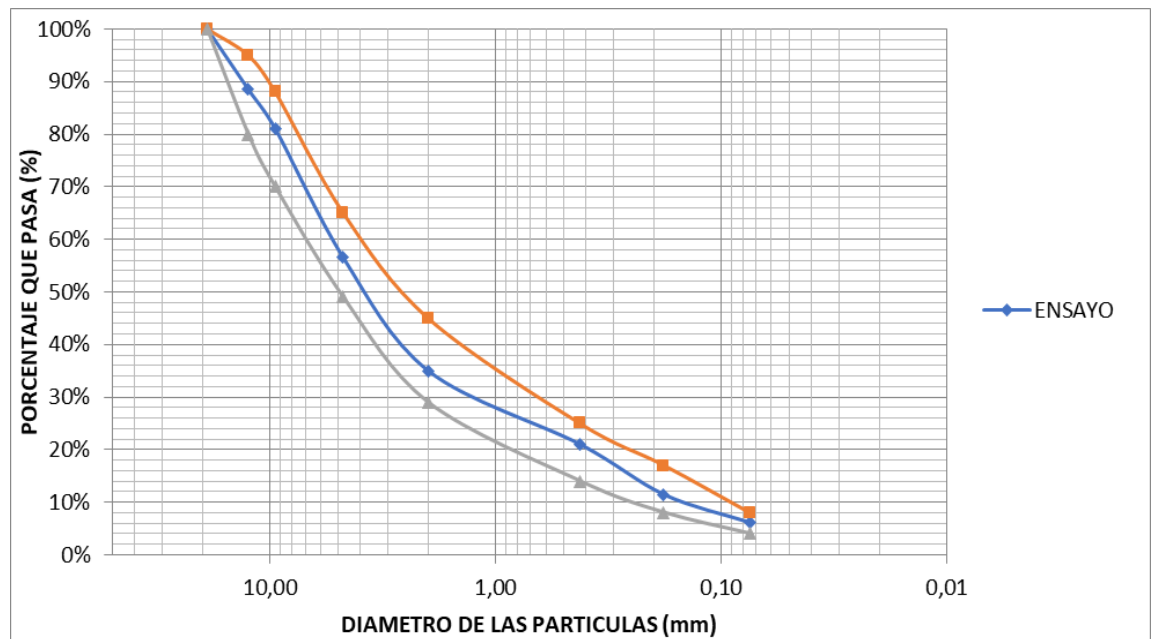
Fuente: (INV-450, 2013)

**Tabla 2 Caracterización de la mezcla MDC-19 con 5% de contenido de asfalto**

| MDC-19           |            |        |              |             |        | VOLUMEN                  |               |             |
|------------------|------------|--------|--------------|-------------|--------|--------------------------|---------------|-------------|
| TAMIZ            | Tamiz [mm] | % PASA | % RETENIDO   | 5,00%       |        | Asfalto [cm3]            | 59,29         | 863,73      |
|                  |            |        |              | 60          | 874,1  | Asfalto [%]              | 11,52         | 11,52       |
| 3/4"             | 19,00      | 100,0  | 0,0          | 0,0         | 0      | Brique ta Marshall [cm3] | <b>514,82</b> | <b>7500</b> |
| 1/2"             | 12,50      | 88,5   | 11,5         | 131,1       | 1909,9 | Agregados [cm3]          | 48,20         | 702,17      |
| 3/8"             | 9,50       | 81,0   | 7,5          | 85,5        | 1245,6 |                          | 31,43         | 457,94      |
| 4                | 4,75       | 56,5   | 24,5         | 279,3       | 4068,9 |                          | 102,68        | 1495,93     |
| 10               | 2,00       | 35,0   | 21,5         | 245,1       | 3570,7 |                          | 90,11         | 1312,75     |
| 40               | 0,43       | 21,0   | 14,0         | 159,6       | 2325,1 |                          | 64,62         | 941,34      |
| 80               | 0,18       | 11,4   | 9,6          | 109,4       | 1594,4 |                          | 44,31         | 645,49      |
| 200              | 0,075      | 6,1    | 5,3          | 60,4        | 880,2  |                          | 24,46         | 356,36      |
| FONDO            |            | 0,0    | 6,1          | 69,5        | 1013,1 |                          | 28,15         | 410,15      |
|                  |            |        | <b>100,0</b> | <b>1140</b> |        | Asfalto + agregado       | 493,25        | 7185,86     |
| Gs asfalto       | 1,012      |        |              |             |        | Vacíos [cm3]             | 21,56         | 314,14      |
| Gs agreg. grueso | 2,72       |        | 14,5683      |             |        | Vacíos [%]               | 4,19          | 4,19        |
| Gs agreg. FINO   | 2,47       |        |              |             |        | VOLUMEN [%]              | <b>514,82</b> | <b>7500</b> |

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 2 Curva granulométrica ensayo 5% de asfalto vs INV-450**



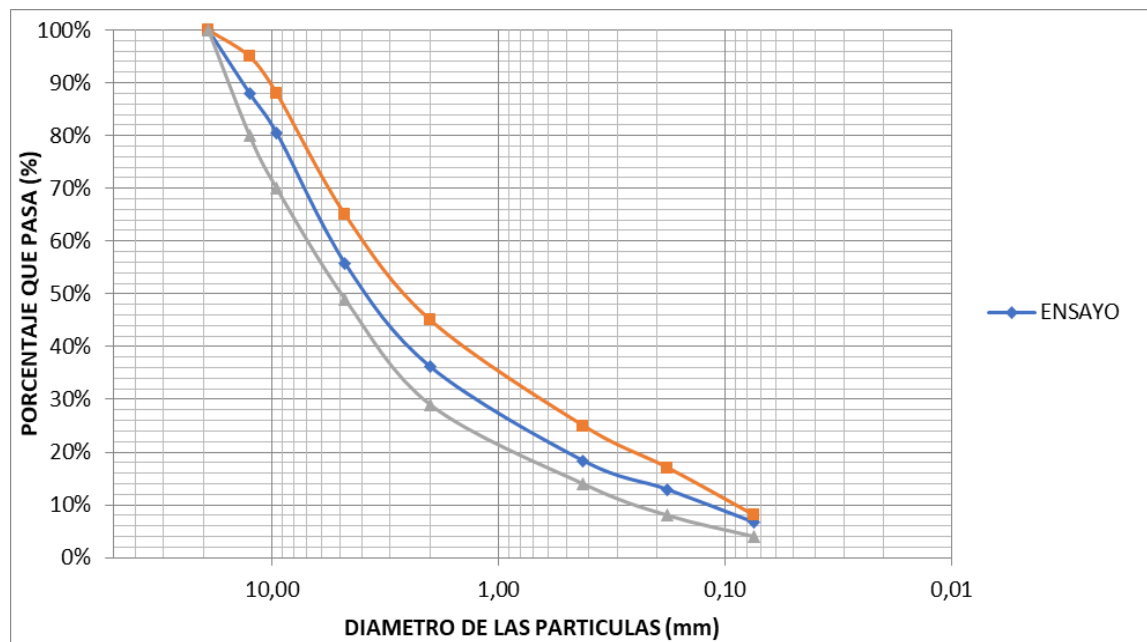
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3 Caracterización de la mezcla MDC-19 con 5,5% de contenido de asfalto**

| MDC-19           |            |        |              |             |        | VOLUMEN                  |               |             |
|------------------|------------|--------|--------------|-------------|--------|--------------------------|---------------|-------------|
| TAMIZ            | Tamiz [mm] | % PASA | % RETENIDO   | 5,50%       |        | Asfalto [cm3]            | 65,22         | 950,11      |
|                  |            |        |              | 66          | 961,51 | Asfalto [%]              | 12,67         | 12,67       |
| 3/4"             | 19,00      | 100,0  | 0,0          | 0,0         | 0      | Briqueita Marshall [cm3] | <b>514,82</b> | <b>7500</b> |
| 1/2"             | 12,50      | 88,0   | 12,0         | 136,1       | 1982,5 | Agregados [cm3]          | 50,03         | 728,84      |
| 3/8"             | 9,50       | 80,5   | 7,5          | 85,1        | 1239,0 |                          | 31,27         | 455,53      |
| 4                | 4,75       | 55,8   | 24,7         | 280,1       | 4080,6 |                          | 102,98        | 1500,20     |
| 10               | 2,00       | 36,2   | 19,6         | 222,3       | 3238,0 |                          | 81,71         | 1190,44     |
| 40               | 0,43       | 18,4   | 17,8         | 201,9       | 2940,6 |                          | 81,72         | 1190,54     |
| 80               | 0,18       | 12,9   | 5,5          | 62,4        | 908,6  |                          | 25,25         | 367,86      |
| 200              | 0,075      | 6,7    | 6,2          | 70,3        | 1024,3 |                          | 28,46         | 414,68      |
| FONDO            |            | 0,0    | 6,7          | 76,0        | 1106,9 |                          | 30,76         | 448,13      |
|                  |            |        | <b>100,0</b> | <b>1134</b> |        | Asfalto + agregado       | 497,40        | 7246,34     |
| Gs asfalto       | 1,012      |        |              |             |        | Vacíos [cm3]             | 17,41         | 253,66      |
| Gs agreg. grueso | 2,72       |        | 14,5683      |             |        | Vacíos [%]               | 3,38          | 3,38        |
| Gs agreg. FINO   | 2,47       |        |              |             |        | VOLUMEN [%]              | <b>514,82</b> | <b>7500</b> |

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 3 Curva granulométrica ensayo 5,5% de asfalto vs INV-450**



Fuente: Elaboración Propia

Se observa en las gráficas 1 y 2 la representación gráfica de las granulometrías de las tablas 2 y 3, para las mezclas MDC 19 de 5% y 5,5% de contenido de asfalto

respectivamente, se puede observar que encuentran dentro de los parámetros según la norma colombiana INV-450 de 2013, reduciendo comportamientos anormales debido a los agregados.

### **3.1.2. PORCENTAJE DE VACIOS**

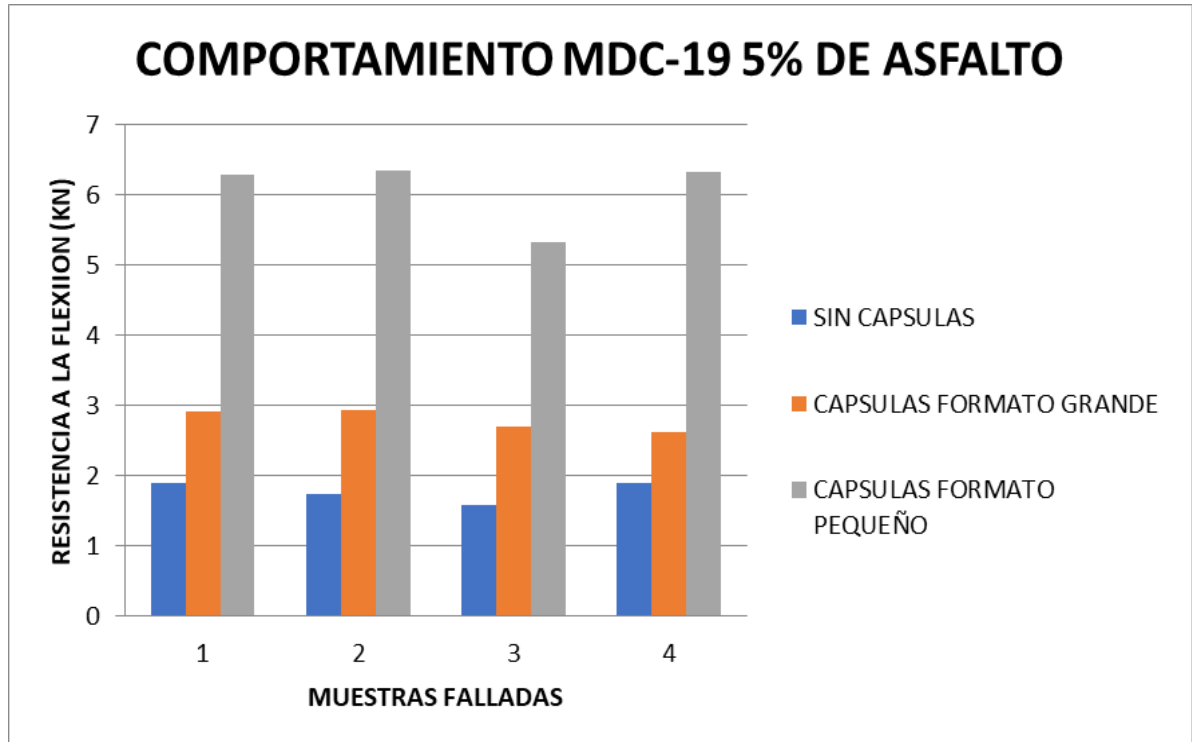
Se tuvo especial cuidado para controlar el porcentaje de vacíos en la mezcla, llenando cuidadosamente con mezcla entre las capsulas logrando 4,19% y 3,38% de vacíos ver tablas 9 y 10 respectivamente. La norma exige porcentajes de entre 3% y 5% de contenido de vacíos con aire para obtener una mezcla aceptable. (INV-736, 2013)

## 4. RESULTADOS

### 4.1. COMPARACION DE RESULTADO CON Y SIN CAPSULAS DE CAFÉ

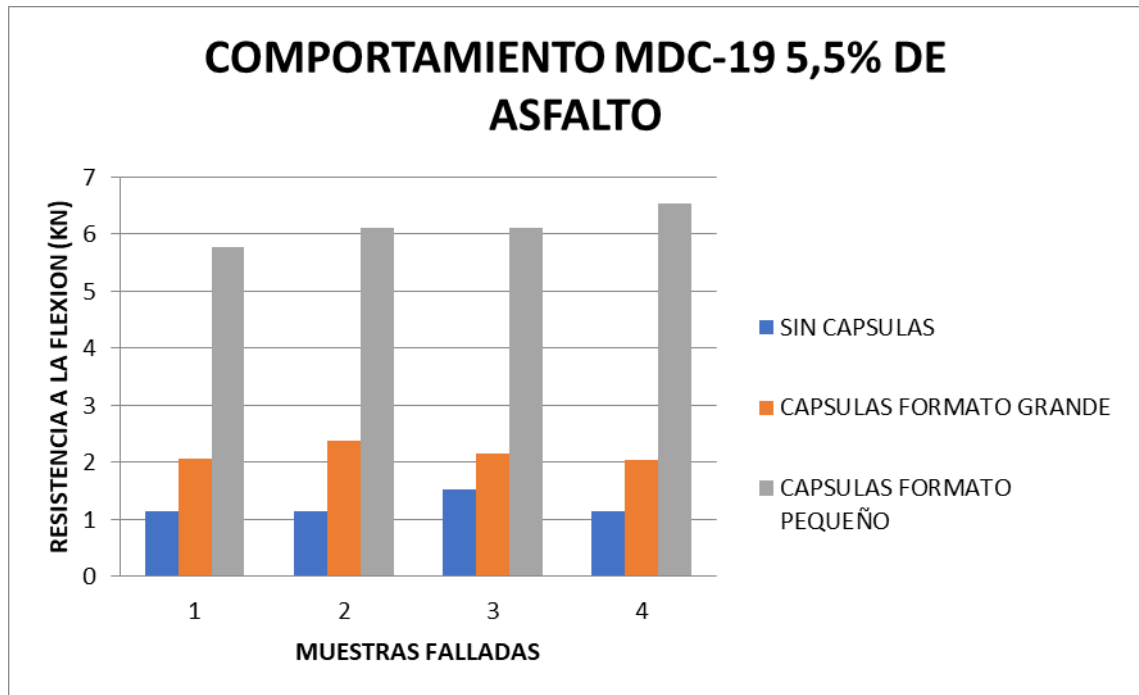
A continuación, se relaciona los resultados obtenidos en estudios previos (Millán & Ramirez, 2017), los cuales vincularon toma de datos en vigas sin la adición de capsulas y con la adición de capsulas de café de gran formato, versus vigas con adición de cápsulas de café de formato pequeño, las que son objeto de la presente investigación.

**Gráfico 4 Barras de comportamiento sin adición y con adición de capsulas de café 5% de asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfico 5 Barras de comportamiento sin adición y con adición de capsulas de café 5,5% de asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

Ambas graficas; tanto con 5% y 5,5% de contenido de asfalto, son claras al indicar un aumento en la resistencia a la carga en vigas con adición de capsulas de café, y aun la diferencia es más evidente en vigas con adición de capsulas de café de formato pequeño.

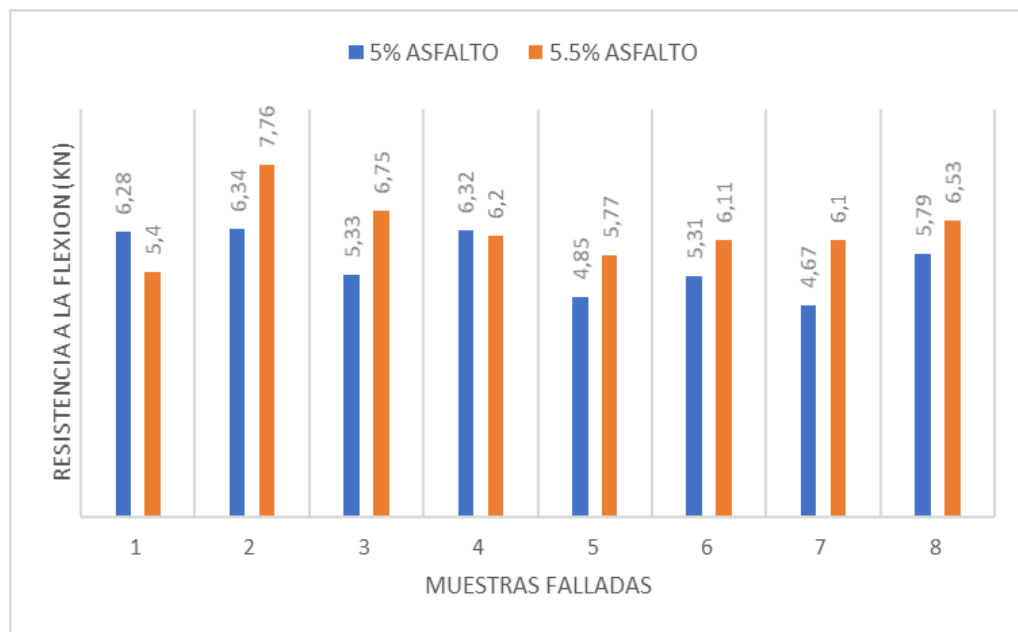
La resistencia en vigas sin ninguna adición está por el orden de 1.7 KN, con capsulas de café de gran formato en 2.8KN mientras que con adición de capsulas de café de formato pequeño se logran hasta 6.7KN. Hipotéticamente se puede relacionar este comportamiento a un funcionamiento similar al de geo celdas. (Duarte Duarte & Sierra Parra, 2011) en su estudio indica que los sistemas de geo celdas son estructuras tridimensionales dispuestas en forma de panal, permeables, a base de polímeros (sintéticos o naturales), interconectadas, que encierran completamente un tipo de relleno, proporcionando confinamiento a toda la estructura, previendo la extensión lateral del material de relleno. Cuando se le aplican cargas verticales a este sistema, las tensiones circunferenciales en las paredes de las celdas y las resistencias de las celdas adyacentes se movilizan. Estas tensiones y resistencias reducen la deformación lateral del material de relleno. Como resultado la rigidez incrementa generando que la capa de material

de relleno y geo celda actué como una matriz rígida y distribuya las cargas verticales del tráfico sobre un área más grande que la del suelo de la subrasante.

#### 4.2. COMPARACION DE RESULTADOS VARIANDO CONTENIDO DE ASFALTO

El segundo parámetro de análisis del presente ensayo es determinar la influencia en la variación de contenido de asfalto.

**Gráfico 6 Comportamiento a la flexión variando el contenido de asfalto de 5% a 5.5%.**



Fuente: Elaboración Propia

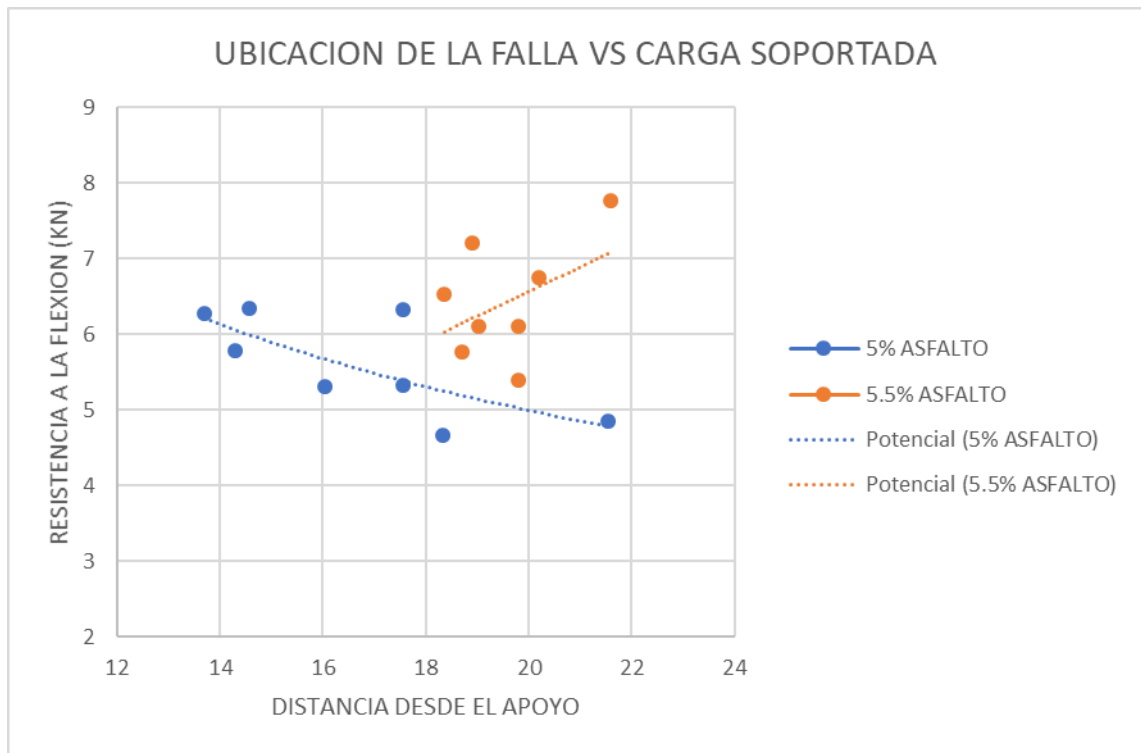
En el Gráfico 6, se observa que existe mejor tendencia a la resistencia a la flexión en vigas con contenido de asfalto de 5.5%, posiblemente asociado a que un contenido mayor de asfalto, liga de forma más efectiva las partículas de la mezcla. Es claro que se deben tomar en cuenta que el óptimo de asfalto es de 5.5% si se excede en este porcentaje o se altera las condiciones de temperatura los resultados serían más bajos de los enseñados en este trabajo.



### 4.3. COMPARACION DE RESULTADOS RESPECTO A LA LINEA DE FALLA

Otro dato que se observó en el ensayo fue la ubicación de la línea de falla respecto a los apoyos, en el Gráfico 7, se ilustra su comportamiento.

**Gráfico 7 Aparición de la línea de falla respecto a los apoyos**



Fuente: Elaboración Propia

Se observa como las muestras con contenido de asfalto de 5%, siguen una tendencia más definida y coherente con los datos esperados, mientras que las muestras con 5.5% de asfalto presentan un comportamiento más errático, pero se centralizan muy próximas a la línea central de la luz que es de 42cm. Se esperaría que las muestras resistieran menos carga, cuanto más se alejen de los apoyos acercándose más a la línea de tendencia de la muestra con 5% de contenido de asfalto.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- A lo largo de la investigación de documentos académicos e investigativos y de los resultados obtenidos en laboratorio que dieron origen al presente trabajo, se concluye que es prometedor el uso de materiales no convencionales para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.
- Las prácticas de laboratorio y la metodología empleada permiten determinar que los resultados están directamente condicionados a los procesos de ejecución. Por tal motivo se concluye que la aplicación de la norma y el uso de aparatos calibrados depuran la información obtenida.
- Aunque el presente trabajo es la culminación de un ensayo experimental de laboratorio, el cual no se encuentra normalizado para concretos asfálticos, los resultados obtenidos son de resaltar y consolidan futuras líneas de investigación al respecto.
- Es necesario realizar más ensayos pues se observa una gran dispersión en los datos, influyendo directamente en la determinación de una línea de tendencia o ecuación de comportamiento.
- Para próximos ensayos se sugiere, inducir agujeros a las capsulas con el propósito de generar una superficie más rugosa, ya que al momento de la falla de los especímenes se observó que la liga entre la mezcla asfáltica y las capsulas era nula, similar a la que se presenta cuando se emplea agregados de canto rodado. Corrigiendo esta situación es posible aumentar la resistencia a la flexión.
- Es imperativo controlar las características propias de la mezcla asfáltica. Al controlar la granulometría, el contenido de asfalto, el contenido de vacíos entre otras condiciones; se puede aproximar los resultados al comportamiento real que inducen las capsulas sobre la mezcla asfáltica.
- Aunque se considera que los resultados obtenidos son prometedores, es necesario realizar más ensayos que validen el comportamiento de las capsulas y viabilidad en proyectos de infraestructura como vías terciarias.
- Basados en las experiencias y resultados obtenidos a lo largo del presente trabajo se recomienda continuar con la investigación, a través de semilleros de

investigación. El aporte que se puede obtener de futuras líneas de investigación respecto al manejo de residuos contaminantes (capsulas de café) y su aprovechamiento, podría inducir avances significativos en la disposición final de las capsulas de café y encontrar un enorme beneficio ambiental y socio económico que mitigue la actual problemática que generan este tipo de residuos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Actual, B. E. (Octubre de 2017). *Ecoportal.net*. Recuperado el 27 de Octubre de 2018, de <https://www.bioecoactual.com/2017/10/20/capsulas-de-cafe-problema-ambiental/>
- al, B. e. (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.
- Ambiente, L. c. (10 de Marzo de 2017). *Ecoticias*. Obtenido de <https://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/133565/Las-capsulas-cafe-y-su-dano-al-Medio-Ambiente>
- Buitrago. (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.
- Buitrago Palacios, L. A., Salgado Orjuela, N. A., & Serrano Romero, S. (2017). *Measurement of the flexural strength of mixtures of asphaltic concrete from the analysis of the magnitude of deformations occurred in specimens subjected to point loads*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
- DUARTE DUARTE, M. C., & SIERRA PARRA, V. (2011). *Estudio Del Comportamiento De Un Material De Subrasante Típico De Bogotá Estabilizado Con Un Sistema De Geoceldas Ante La Aplicación De Ciclos De Carga Y Descarga Mediante Pruebas De Laboratorio*. BOGOTÁ D.C.: Pontificia Universidad Javeriana.
- EcuRed. (s.f.). *EcuRed, conocimiento con todos y para todos*. Obtenido de [https://www.ecured.cu/Pavimento\\_flexible](https://www.ecured.cu/Pavimento_flexible)
- Ensayos para pavimentos asfálticos (no pose información de autor y año)
- European committee for standardization, Bituminous Mixtures-Test Methods for Hot Mix Asphalt, BS EN 12697: Part 24: Resistance to Fatigue. CEN, Brussels, 2004.

- Flexible, P. (Mayo de 2017). *Ecu Red, Conocimiento con todos y para todos*.  
Obtenido de [https://www.ecured.cu/Pavimento\\_flexible](https://www.ecured.cu/Pavimento_flexible)
- Flores Flores, M., Delgado Alamilla, H., Garnica Anguas, P., & Garcia, E. (2013). *Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas*. México: Instituto Mexicano del Transporte, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Gerritsen, A.H.; van Gurp, C.A.P.M.; van der Heide, J.P.J.; Molenaar, A.A.A. and Pronk, A.C., Prediction and Prevention of Surface Cracking in Asphaltic Pavements. Proceedings, 6th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, The University of Michigan. Ann Arbor, Michigan, July 1987, pp. 378-391.
- Higuera Sandoval, C. H. (2010). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos de carreteras*. (1 ed., Vol. 1). (978-958-660-149-8, Trad.) Tunja: Principios fundamentales, el tránsito, factores climáticos y geotécnica vial .
- INV-450. (2013). Mezclas Asfálticas En Caliente De Gradación Continua (Concreto Asfáltico). BOGOTA: INVIAS.
- INV-736. (2013). Porcentaje De Vacíos De Aire En Mezclas Asfálticas Compactadas Densas Y Abiertas. BOGOTA: INVIAS
- León Castaño, F., & Martínez, J. M., & Herrera B. (2009). Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible en la ciudad de Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana.
- Li, N. (2013). *Asphalt Mixture Fatigue Testing: Influence of Test Type and Specimen Size*. Hubei Province, P.R. China : Wuhan University of Technology, P.R. China .
- Li, X., Marasteanu, M.O. (2005) Cohesive modeling of fracture in asphalt mixtures at low temperatures. *Int J Fract* 136(1–4):285–308
- Martín S, A. (2007). *Tesis. Efecto de la concentración volumétrica fíller/betún en la cohesión y adhesividad del mástico*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

- Mejía Umbarila, C. A., & Sierra Hernández, C. A. (2017). *Estado Del Arte De Mezclas Asfálticas Modificadas En Los Últimos 10 Años: Caso De Estudio Universidades De Bogotá D.C.* Bogotá D.C.: Universidad Piloto De Colombia, Facultad De Ingeniería Civil.
- Millán Durán, A. F., & Ramírez Lozano, C. A. (2017). *Influence Of The Use Of Recycled Coffee Pods In The Resistance To Flexion Of Asphalt Mixtures.* Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
- Montanez Tupayachi, A., (2010) Ensayo de resistencia a la flexión; Perú 2016.
- Moya, M. S. (28 de 06 de 2004). Effects of the granulate incorporation in the asphalt pavements recycled with emulsion using the gyratory compactor. Barcelona, España. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6623/01.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Muñoz Estévez, R. N. (2013). Estudio de mezclas de áridos reciclados de hormigón y asfáltico estabilizados con cemento para su aplicación en bases y subbases de carreteras . Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.
- M.S. Ranadive, Anand B., (2016) Parameter sensitive analysis of flexible pavement, Tapase Department of Civil Engineering, College of Engineering, Pune, Maharashtra India Received 21 March 2016; received in revised form 17 October 2016; accepted 2 December 2016, Available online 18 December 2016.
- Parra Nieto, L. F., & Bautista Barón, M. F. (2018). *Medición De La Resistencia Bajo Carga Monotónica De Una Mezcla Asfáltica Tibia Reciclada Sustituyendo Parte Del Agregado Pétreo Por Escoria De Alto Horno.* Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José De Caldas Facultad De Medio Ambiente Y Recursos Naturales.
- Patiño Boyacá, N. B., Reyes Ortiz, O. J., & Camacho Tauta, J. F. (2014). *Fatigue behavior of asphalt mixtures colombian with addition recycled pavement asphalt to 100 %.* Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Piragauta Pantoja, A. Y., & Bacca Prieto, I. E. (2015). *Análisis dinámico de una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC-19) modificada con desechos de caucho-cuero provenientes de una remontadora de calzado - cemento asfáltico 60-70 y agregado de peña .* Bogotá d.c. : Universidad Católica De Colombia, Especialización En Pavimentos .

- Reyes, F.A (2004) *Diseño Racional de Pavimentos*, Universidad Javeriana y Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, ISBN 958-683-622-3. Colombia.
- Rondón, H. &. (2017). *Medición de fatiga en mezclas asfálticas mediante ensayos de carga monotónica (en redacción)*.
- Rondon, H., & Ruge, J. C. (2017). *Medición de fatiga en mezclas asfálticas mediante ensayos de carga monotónica (en redacción)*.
- Sanz, J. M. (21 de Abril de 2016). *Ingenia Viarum*. Obtenido de <https://ingeniaviarum.wordpress.com/2016/04/21/1902-el-asfalto-se-abre-paso/>
- Sasha, G., & Biligiri, K. P. (2015). *Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using Semi-Circular Bending test based on fracture energy approach* (Vol. 142). India: Elsevier.
- S. Immanuel, D.H. Timm, (2006), Measured and theoretical pressures in base and subgrade layers under dynamic truck loading, in: Proc., 2006 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference, American Society of Civil Engineers, pp. 155–166.
- Ulloa Calderón, A., (2011) LanammeUCR; Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de calidad en materiales de un pavimento asfáltico.
- Yang, L., & Fatemi, A. (1998). *Cumulative Fatigue Damage Mechanisms and Quantifying Parameters: A Literature Review* (Vol. 26). Holanda: Journal of Testing and Evaluation.

## **ANEXOS**

### **ANEXO I GRANULOMETRÍA**



**ANEXO II RESULTADOS RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**