

# ANÁLISIS DE LA VIDA A FATIGA MEZCLA DENSA FRÍA

Análisis de la vida a fatiga de una mezcla densa fría tipo MDF-19 con adición de cemento hidráulico evaluada por el ensayo de fatiga a flexión en viga de cuatro puntos.

Maritza Lorena Delgado Díaz Del Castillo y Asdrúbal Serna Corrales

Universidad del Cauca

Octubre 31 de 2019



Maritza Lorena Delgado Díaz Del Castillo y Asdrúbal Serna Corrales, Facultad de Ingeniería

Civil, Universidad del Cauca

La correspondencia relacionada con esta investigación debe ser dirigida a Maritza Delgado

Universidad del Cauca, Cl. 5 #4-70, Popayán, Cauca

Contacto: [iclorenadelgado@gmail.com](mailto:iclorenadelgado@gmail.com)

**Universidad del Cauca**  
**Facultad de Ingeniería Civil**  
**Departamento de Geotecnia**  
**Maestría en Ingeniería de Pavimentos**

**Maritza Lorena Delgado Diaz Del Castillo**

**Asdrúbal Serna Corrales**

Trabajo de grado de maestría sometido al departamento de geotecnia adscrito a la facultad de ingeniería civil de la Universidad del Cauca como parte de los requisitos necesarios para obtención del grado de magíster en ingeniería de pavimentos.

APROBADO POR:

---

JORGE HERNÁN FLÓREZ GÁLVEZ Dr. Ing.  
(DIRECTOR)

---

NOMBRE: HENRY MAURICIO MUÑOZ TROCHEZ  
(JURADO INTERNO)

---

NOMBRE: CIRA PIEDRAHITA CESPEDES  
(JURADO EXTERNO)

FECHA: POPAYÁN, octubre de 2019.

## FICHA CATALOGRÁFICA

DELGADO, MARITZA LORENA; SERNA, ASDRÚBAL.

Análisis de la vida a fatiga de una mezcla densa fría tipo mdf-19 con adición de cemento hidráulico evaluada por el ensayo de fatiga a flexión en viga de cuatro puntos.

Trabajo de grado de Maestría – Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

Departamento de Geotecnia. Maestría en Ingeniería de Pavimentos.

- |                       |                                      |
|-----------------------|--------------------------------------|
| 1. Mezcla Densa Fría  | 2. Vida a fatiga                     |
| 3. Adición de cemento | 4. Flexión en viga de cuatro puntos. |

### Referencia Bibliográfica

Delgado, M. L. & Serna, A. (2019). Análisis de la vida a fatiga de una mezcla densa fría tipo mdf-19 con adición de cemento hidráulico evaluada por el ensayo de fatiga a flexión en viga de cuatro puntos. Trabajo de grado de Maestría, Universidad del Cauca, Popayán.

## Cesión de derechos

Nombres de los autores: Maritza Lorena Delgado Díaz del Castillo, Asdrúbal Serna Corrales.

Título: Análisis de la vida a fatiga de una mezcla densa fría tipo mdf-19 con adición de cemento hidráulico evaluada por el ensayo de fatiga a flexión en viga de cuatro puntos.

Grado / año: Magíster / 2019.

Se concede a la Universidad del Cauca el permiso para reproducir copias de este trabajo de grado de Maestría y para prestar o vender tales copias solamente para propósitos académicos y científicos. Los autores se reservan otros derechos de publicación y ninguna copia de este trabajo puede ser reproducida sin la autorización por escrito de los autores.

---

Maritza Lorena Delgado Díaz del Castillo

C.C. 34.324.512

E-mail: iclorenadelgado@gmail.com

---

Asdrúbal Serna Corrales

C.C. 1.144.046.013

E-mail: asdru01@hotmail.com

## Resumen estructurado

La fabricación de mezclas asfálticas en caliente requiere elevar la temperatura hasta valores entre 150 y 180°C, trayendo consigo la liberación a la atmósfera de diferentes contaminantes, produciendo gases de efecto invernadero, los cuales acarrearán una serie de consecuencias negativas para el planeta entre las que se destaca el cambio climático. De forma paralela la tendencia hacia el envejecimiento en las mezclas asfálticas calientes, debido a los puntos críticos en su fabricación e instalación; es mucho mayor al de las mezclas asfálticas en frío (Pérez, 2008).

La fatiga es uno de los criterios de deterioro considerados para el diseño de pavimentos asfálticos, se define por su capacidad para responder ante cargas repetidas del tránsito bajo condiciones normales de tráfico sin agrietamiento significativo o fallas prematuras (Flores, Alamilla, Anguas y García, 2008).

“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 evaluarla resistencia a la fatiga se encuentran el ensayo de tensión-compresión, flexión en cuatro puntos, fatiga trapezoidal entre otros” (Gómez, Flores, Alamilla, Garnica, Angua, 2010).

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la resistencia a fatiga de una mezcla densa fría tipo MDF-19 al adicionar cemento hidráulico como llenante mineral, para lo cual se determinó utilizar el ensayo de flexión en cuatro puntos, con el propósito de encontrar y analizar la curva carga- desplazamiento, estableciendo las características físicas de los materiales, luego se elaboró los diseños de la mezcla según el método de resistencia, tanto para el concreto asfáltico patrón como para los concretos con remplazo del 1%, 2%, 3%, 4% de cemento hidráulico con respecto al peso del agregado, según su especificación técnica,

posteriormente se elaboraron las briquetas para los respectivos ensayos de laboratorio con los diferentes contenidos de cemento por medio de vigas de ensayo, 12 unidades por cada porcentaje de cemento hidráulico, finalmente se realizó el ensayo de flexión en cuatro puntos; como ensayos complementarios se ejecutaron el de deformación plástica (Rueda de Hamburgo) y Modulo de mezcla (Determinación curva Maestra).

En los resultados obtenidos se encontró aumento en la resistencia a deformación plástica al aumentar el contenido de cemento, así como también incremento en el módulo dinámico de la mezcla asfáltica con mayores contenidos de cemento. En el caso de la fatiga los resultados no presentaron este comportamiento, lo obtenido correspondió a una mejoría hasta para contenidos de cemento del 1% y 2% seguido de una pérdida en la capacidad de la mezcla para resistir ciclos de carga en fatiga.

De acuerdo a lo anterior es interesante la evaluación de las propiedades evaluadas y brinda un panorama sobre el desempeño de la mezcla asfáltica en frío al ser adicionadas con cemento hidráulico donde se muestra mejoras en pequeños porcentajes.

### Structured abstract

The manufacture of hot asphalt mixtures requires raising the temperature to values between 150 and 180 ° C, bringing complete release into the atmosphere of different pollutants, producing greenhouse gases, which carry a series of negative consequences for the planet between That climate change stands out. In parallel, the trend towards aging in hot asphalt mixtures, due to the critical points in its manufacture and installation; It is much higher than cold asphalt mixtures (Pérez, 2008).

Fatigue is one of the deterioration criteria considered for the design of asphalt pavements, it is defined by its ability to respond to repeated traffic loads under normal traffic conditions without significant cracking or premature failures (Flores, Alamilla, Anguas and García, 2008).

“Fatigue is one of the deterioration criteria considered for the design of asphalt pavements and can be evaluated through laboratory tests. Among the tests used to assess fatigue resistance are the tension-compression test, four-point flexion, trapezoidal fatigue among others” (Gómez, Flores, Alamilla, Garnica, Angua, 2010).

The purpose of this research is to evaluate the fatigue resistance of a cold dense MDF-19 type mixture by adding hydraulic cement as a mineral filler, for which it was determined to use the four-point bending test, in order to find and analyze the load-displacement curve, establishing the physical characteristics of the materials, then the designs of the mixture were prepared according to the resistance method, both for the standard asphalt concrete and for the concrete with replacement of 1%, 2%, 3%, 4 % of hydraulic cement with respect to the weight of the aggregate, according to its technical specification, later the briquettes were prepared for the respective laboratory tests with the different cement contents by means of test beams, 12 units for each percentage of hydraulic cement, finally the four-point bending test was performed; as

complementary tests, the plastic deformation (Hamburg Wheel) and Mixing Module (Master curve Determination) were executed.

In the results obtained, an increase in the resistance to plastic deformation was found as the cement content increased, as well as an increase in the dynamic modulus of the asphalt mixture with higher cement contents. In the case of fatigue, the results did not show this behavior, the result corresponded to an improvement even for cement contents of 1% and 2% followed by a loss in the ability of the mixture to resist fatigue load cycles.

According to the above, the evaluation of the properties evaluated is interesting and provides an overview of the performance of the cold asphalt mixture when added with hydraulic cement where improvements in small percentages are shown.



## Contenido

<b>Introducción .....</b>	<b>15</b>
<b>1. Descripción del problema.....</b>	<b>17</b>
<b>2. Justificación.....</b>	<b>19</b>
<b>3. Objetivos .....</b>	<b>22</b>
3.1 Objetivo general.....	22
3.2 Objetivos específicos .....	22
<b>4. Marco teórico .....</b>	<b>23</b>
4.1 Requisitos de los materiales.....	23
4.1.1 Ensayos sobre los agregados.....	23
4.1.2. Ensayos sobre productos asfálticos.....	25
4.1.3 Ensayos sobre emulsiones asfálticas.....	26
4.1.4 Ensayos de desempeño en laboratorio de mezclas asfálticas.....	28
4.2 Pavimento. ....	29
4.3 Asfalto.....	30
4.4 Agregados pétreos.....	30
4.4.1. Agregado grueso. ....	31
4.4.2 Agregado fino. ....	31
4.4.3 llenante mineral.....	31
4.5 Cemento hidráulico.....	32
4.6 Emulsión asfáltica.....	33
4.7 Mezclas asfálticas .....	33
4.8 Mecanismos de daño de mezclas asfálticas para el diseño.....	35
4.9 Caracterización mezcla densa fría .....	40

	10
4.9.1 Ventajas mezcla densa fría.....	40
4.9.2 Desventajas de la mezcla densa fría.....	41
<b>5. Metodología .....</b>	<b>42</b>
5.1 Caracterización de los materiales.....	43
5.1.1. Emulsión asfáltica.....	43
5.1.2 Agregados pétreos.....	43
5.2 Diseño de mezcla densa fría MDC-19 .....	46
5.2.1 Mezcla 10.5% ligante.....	49
5.2.2 Mezcla 12.12% ligante.....	49
5.2.3 Mezcla 13.73% ligante.....	50
5.2.4 Mezcla 15.36% ligante.....	50
5.2.5 Mezcla 16.97% ligante.....	51
5.2.6 Verificación del diseño por resistencia.....	51
5.2.7 Determinación de la fórmula de trabajo.....	54
<b>6. Desempeño de la mezcla con adición de cemento .....</b>	<b>55</b>
6.1 Matriz experimental.....	55
6.2 Resultados ensayos a fatiga .....	56
6.2.1. Ensayo de fatiga con proporción de cemento 0%.....	57
6.2.2 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 1%.....	59
6.2.3 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 2%.....	61
6.2.4 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 3%.....	63
6.2.5 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 4%.....	65
6.2.6 Análisis resultados ensayo a fatiga.....	67
6.3 Ensayos deformación plástica.....	69
6.3.1. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 0%.....	69

6.3.2. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 1%. .....	70
6.3.3. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 2%. .....	71
6.3.4. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 3%. .....	72
6.3.5. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 4%. .....	73
6.3.6 Análisis resultados deformación plástica.....	74
6.4 Resultados ensayos modulo dinámico .....	76
6.4.1 Ensayo modulo dinámico con proporción de cemento 0%.....	76
6.4.2 Ensayo modulo dinámico con proporción de cemento 1%.....	76
6.4.3 Ensayo módulo dinámico con proporción de cemento 2%.....	77
6.4.4 Ensayo módulo dinámico con proporción de cemento 3 %.....	78
6.4.5 Ensayo módulo dinámico con proporción de cemento 4 %.....	78
6.4.6 Análisis resultados ensayo módulo dinámico. ....	79
<b>7. Recomendaciones .....</b>	<b>82</b>
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>83</b>
<b>9. Referencias .....</b>	<b>86</b>
<b>Apéndices.....</b>	<b>89</b>

## Lista de Tablas

Tabla 1 Ensayos sobre los agregados pétreos .....	23
Tabla 2 Ensayos sobre productos asfálticos.....	25
Tabla 3 Ensayos sobre emulsiones asfálticas.....	27
Tabla 4 Caracterización cemento hidráulico.....	32
Tabla 5 Agregados pétreos.....	44
Tabla 6 Granulometría .....	45
Tabla 7 Diseño de mezcla densa fría MDC-19 .....	47
Tabla 8 Porcentaje de Emulsión Asfáltica Teórica Método de DURIEZ.....	47
Tabla 9 Diseño por resistencia .....	48
Tabla 10 Mezcla 10.5% ligante.....	49
Tabla 11 Mezcla 12.12% ligante.....	49
Tabla 12 Mezcla 13.73% ligante.....	50
Tabla 13 Mezcla 15.36% ligante.....	50
Tabla 14 Mezcla 16.97% ligante.....	51
Tabla 15 Resumen contenido óptimo de emulsión asfáltica .....	54
Tabla 16 Matriz experimental ensayo a fatiga .....	55
Tabla 17 Matriz experimental ensayo deformación plástica.....	55
Tabla 18 Matriz experimental ensayo modulo dinámico .....	56
Tabla 19 Resultados ensayo de fatiga MDF-19 adición cemento 0%.....	57
Tabla 20 Resultados ensayo de fatiga MDF-19 adición cemento 1%.....	59
Tabla 21 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 2%.....	61
Tabla 22 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 3%.....	63
Tabla 23 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 4%.....	65
Tabla 24 Resumen variación módulo dinámico.....	80

## Lista de Figuras

Figura 1. Metodología usada usado en el desarrollo de la investigación.....	42
Figura 2. Emulsión CRL-1. Fuente: Certificado de Calidad emulsión CRL-1 HQ, abril 2018....	43
Figura 3. Ubicación cantera agregados pétreos. Google maps (2019). .....	43
Figura 4. Granulometría MDC-19 requerida y obtenida en laboratorio. ....	46
Figura 5. Ensayos previos con briquetas.....	48
Figura 6. Resistencia en seco vs % emulsión .....	52
Figura 7. Resistencia en húmedo vs % emulsión.....	52
Figura 8. Resistencia en húmedo vs resistencia en seco .....	53
Figura 9. % resistencia conservada vs % emulsión .....	53
Figura 10. Equipo fatiga viga en cuatro puntos y corte de vigas para ensayo de fatiga .....	57
Figura 11. Energía disipada vs ciclos de carga .....	58
Figura 12. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga .....	58
Figura 13. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 0%.....	59
Figura 14. Energía disipada vs ciclos de carga .....	60
Figura 15. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga .....	60
Figura 16. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 1%.....	61
Figura 17. Energía disipada vs ciclos de carga .....	62
Figura 18. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga .....	62
Figura 19. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 2%.....	63
Figura 20. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 2%.....	64
Figura 21. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga .....	64
Figura 22. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 3%.....	65
Figura 23. Energía disipada vs ciclos de carga .....	66
Figura 24. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga MDF-19 + Cemento 4%. .....	66
Figura 25. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 4%.....	67
Figura 26. Ley de fatiga MDF-19 con diferentes contenidos de cemento.....	67
Figura 27. Contenido de cemento vs ciclos de falla .....	69
Figura 28. Muestras antes y después del ensayo deformación plástica Cemento 0% .....	69
Figura 29. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 0%,.....	70
Figura 30. Muestras antes y después del ensayo deformación plástica Cemento 1% .....	70
Figura 31. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 1%,.....	71

Figura 32. Muestras antes y después del ensayo deformación plástica Cemento 2% .....	71
Figura 33. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 2%,.....	72
Figura 34. Muestras antes y después del ensayo deformación plástica Cemento 3% .....	72
Figura 35. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 3%.....	73
Figura 36. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 4%.....	73
Figura 37. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 4%.....	74
Figura 38. Gráfica deformación plástica MDF-19 + adición de cemento vs Tiempo (min).....	75
Figura 39. Módulo dinámico sin adición de Cemento 0%, a temperaturas del .....	76
Figura 40. Módulo dinámico con adición de Cemento 1%, a temperaturas .....	77
Figura 41. Módulo dinámico con adición de Cemento 2%, a temperaturas .....	77
Figura 42. Módulo dinámico con adición de Cemento 3%, a temperaturas .....	78
Figura 43. Módulo dinámico con adición de Cemento 4%, a temperaturas .....	79
Figura 44. Resumen módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias.....	81

## Introducción

Las mezclas asfálticas, también llamadas aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que cubre los agregados. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de llenante mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico.

Componentes que son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y llenante mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total. (Rodríguez, 2010).

La elaboración de mezclas asfálticas presenta ventajas o dificultades de acuerdo al plan aplicado. Por experiencia en los proyectos de pavimentación en el departamento del Cauca en los que se ha tenido participación, se ha observado que esta tendencia en la fabricación está fuertemente inclinada hacia el de mezclas en caliente.

Sin embargo, se ha observado que los cambios climáticos que se presentan en el planeta han impulsado el desarrollo y la utilización de diferentes tecnologías que buscan disminuir los impactos ambientales. El uso de mezclas asfálticas elaboradas en frío se presenta como uno de los procesos en los cuales se puede ayudar en este propósito (Reyes y Rondón, 2015), los diferentes métodos de pavimentación desarrollan sus propias características, siendo necesario evaluar las diferentes alternativas al momento de seleccionar la tecnología a aplicar en la elaboración de las mezclas asfálticas.

En la investigación se plantea brindar información técnica sobre el uso del cemento hidráulico en mezclas en frío presentando los resultados obtenidos para una mezcla densa en frío

MDF-19 según INVIAS. El estudio se enfoca en el análisis de la vida a fatiga de la mezcla mediante el ensayo de viga a flexión de cuatro puntos.

Diferentes investigaciones han arrojado importantes resultados, en las que se muestra que algunas propiedades mecánicas como: Módulo resiliente, resistencia a la tracción indirecta, resistencia conservada y desgaste han sido mejoradas con la adición de cemento hidráulico. Otros autores como Oruc, Celik y Akpinar, (2006) reportan mejoras en el comportamiento de mezclas asfálticas en frío al ser adicionadas con cemento hidráulico mediante la evaluación de propiedades como: Susceptibilidad a la temperatura, daños por humedad, fluencia, resistencia a la deformación permanente y modulo.

Considerando que, uno de los principales mecanismos de degradación que se busca controlar en el diseño de pavimento es la fatiga y exceso de deformación permanente en la dirección vertical. La fatiga ocurre en las capas ligadas de pavimento y en el caso de estructuras flexibles se presentan cuando se generan valores grandes de deformación a tracción en la fibra inferior de la capa, esto debido a las cargas ejercidas por los vehículos (Reyes et al., 2015).

Por lo tanto, al ser la fatiga uno de los principales mecanismos de degradación, se desarrolla un procedimiento para evaluar el comportamiento de la mezcla densa en frío MDF-19 al ser adicionada con cemento hidráulico en diferentes porcentajes exponiendo los resultados obtenidos.



## 1. Descripción del problema

Cada proyecto de pavimentación presenta sus propias características, existiendo diferentes alternativas y tecnologías aplicables a la ejecución de actividades, entre las que se encuentran técnicas de mezclado y compactación en caliente, en frío, tibias, etc. (Rondón y Reyes, 2015). Las más utilizadas en Colombia y sobre las que se tienen mayores experiencias corresponden a las elaboradas en caliente (Reyes-Ortiz, Álvarez, & Valdés-Vidal, 2014).

Los proyectos de pavimentación tienen diferentes condiciones de clima, ubicación, disponibilidad de materiales y conocimientos de las diferentes tecnologías, factores que son fundamentales para definir el tipo y proceso de fabricación de las mezclas asfálticas a utilizar (Rondón y Reyes, 2015).

El uso de mezclas densas en frío presenta grandes ventajas en diversos campos, entre ellos se encuentra la facilidad constructiva; son amigables con el medio ambiente; su compatibilidad con variedad de agregados, impermeabilización de superficies entre otros. A pesar de las bondades que brinda la tecnología, no ha sido muy atractiva debido a las limitaciones respecto al comportamiento mecánico y a la susceptibilidad al daño por humedad, en los primeros años de uso pueden presentarse elevadas deformaciones al recibir cargas pesadas, debido a lo anterior, se usan generalmente en carreteras de baja intensidad vehicular (Doré G. y Zubeck, 2009).

Si bien, unas investigaciones muestran propiedades mecánicas inferiores en las mezclas asfálticas en frío respecto a las mezclas asfálticas en caliente, se tienen también diferentes alternativas para el mejoramiento y poder usar la tecnología por medio del uso de aditivos o adiciones de cemento hidráulico como lo mostrado por (Bocci et al., 2011), donde se encontró una disminución en el daño por humedad en resistencia a la tracción indirecta. También, Oruc,

Celic y Akpınar (2007) establecen que la resistencia aumenta en función del porcentaje de cemento y no presenta relevancia la temperatura del ensayo. Otra investigación realizada por Kuvussi y Modarres (2010) establecen por medio de ensayos de laboratorio que las propiedades mecánicas de mezclas recicladas con emulsión asfáltica y cemento mejoran respecto a las evaluadas sin cemento, pero realizan una observación importante respecto a la elevación de la fragilidad afectando la resistencia a la fatiga.

Como se muestra anteriormente, en diferentes investigaciones se observan mejoras en propiedades mecánicas al adicionar cemento, pero además de ser necesario evaluar estos efectos en un contexto local, se presenta la necesidad de enfocar la evaluación en el efecto de la adición de cemento hidráulico en las mezclas asfálticas en frío mediante la obtención de leyes de fatiga obtenidas en el laboratorio a partir del ensayo de viga en cuatro puntos.

## 2. Justificación

Para posibilitar la fabricación y compactación de las mezclas asfálticas en caliente, se hace necesario elevar la temperatura de los materiales hasta valores que generalmente oscilan entre 150°C y 180°C, trayendo consigo la liberación a la atmosfera de diferentes contaminantes como lo son: dióxido de nitrógeno, azufre, carbono, entre otros gases. Estas emisiones conllevan a producir gases de efecto invernadero y con eventuales consecuencias para el clima del planeta (Perez, 2008).

En la actualidad se encuentran diferentes movimientos ambientalistas que buscan contrarrestar el impacto causado por los seres humanos al planeta, referente a los pavimentos asfálticos, el uso de mezclas en frío constituye una ayuda a disminuir la producción de gases de efecto invernadero, debido a que se requiere menor temperatura de fabricación y manejo para este tipo de mezclas asfálticas (Acuña, Sibaja, & Molina, 2009).

Desde el punto de vista de la salubridad, las personas que trabajan con pavimentos asfálticos en caliente se ven expuestas a condiciones altamente nocivas para la salud, comenzando con la exposición a altas temperaturas hasta los efectos tóxicos generados por la aspiración de gases. Al evaluar el factor económico, la fabricación, manipulación y transporte de mezclas en frío con emulsión, presenta ventajas considerables dando menores costos, debido a, la menor utilización de energía que cuando se usan mezclas asfálticas en caliente (Martinez Diaz, Pérez, & Sa, 2012).

Anteriormente, se planteaban algunos beneficios de la implementación de mezclas asfálticas en frío; sin embargo, el limitado conocimiento que existía con relación a su comportamiento mecánico y vida a la fatiga constituía la principal barrera para su uso. En investigaciones realizadas por Doré y Zubeck (2009), se plasman resultados en los que se evalúa

el comportamiento mecánico de las mezclas en frío, siendo inferiores a las usadas tradicionalmente (mezclas en caliente), ya que presentan baja estabilidad, tienden a presentar elevada deformabilidad frente a cargas pesadas y escasa resistencia. Como alternativa para mejorar el comportamiento mecánico, en dicha investigación se llevaron a cabo modificaciones en las mezclas asfálticas en frío con emulsiones usando una adición de cemento hidráulico como reemplazo de llenante mineral, lo cual ha demostrado mejoras frente a ensayos de tracción indirecta en estado seco y húmedo, resistencia conservada, módulo resiliente, desgaste en el ensayo de Máquina de los Ángeles (Reyes, Ortiz, Álvarez y Valdés – Vidal, 2014), pero debido a la rigidización causada por el cemento hidráulico, es necesario evaluar el comportamiento a fatiga con el objetivo de poder caracterizar de manera integral sus efectos.

En efecto, explicar los daños de las vías en Colombia la red vial colombiana para el año 2016 de acuerdo a un artículo de la revista dinero mostraba para el año 2016 el estado de la infraestructura del país de acuerdo con los diferentes reportes y lo mencionado por la revista Dinero se tienen datos estadísticos mencionados de la siguiente forma. “En Colombia la red vial terciaria representa aproximadamente el 70% de la red carretera (1.600.000 kilómetros), la cual, en su mayoría, requiere de intervenciones para mejorar la competitividad y la calidad de vida de las comunidades, para ello, se deben evaluar nuevas alternativas de mayor alcance y durabilidad” (Revista Dinero, noviembre de 2016). Para lograr ampliar la cantidad de vías pavimentadas en la red nacional es necesario desarrollar diferentes alternativas para la fabricación de mezclas asfálticas, las cuales pueden tener mejores comportamientos según el proyecto. Conocer las diferentes alternativas en la fabricación de mezclas asfálticas y caracterizar su comportamiento ayuda a tener mayores herramientas de decisión tanto técnica como económica, teniendo como beneficio la optimización de los recursos invertidos.

El método planteado al adicionar cemento hidráulico a las mezclas asfálticas en frío respondería a la necesidad de implementar nuevas técnicas, ya que como se mencionó anteriormente, instalar una planta para mezclas en caliente resulta antieconómico para proyectos pequeños, mientras que el transporte, el acopio y el manejo de agregados, emulsión asfáltica y cemento hidráulico se facilita en contratos por etapas o de bajo presupuesto, teniendo en cuenta que el cemento hidráulico adicionado en porcentajes bajos y de facilidad para su adquisición.

Por medio de esta investigación se realizará un aporte al conocimiento de elementos teóricos y prácticos, brindando conocimiento sobre el comportamiento de la vida a fatiga en mezclas en frío fabricadas con materiales de la región y adicionadas con cemento hidráulico.

En el caso del cemento hidráulico, el efecto de su adición en el mejoramiento del comportamiento de propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío, ha sido objeto de estudio por diversos autores como (Reyes, 2014,) y (Oruc, Celik, & Akpinar, 2006). El principal inconveniente en la aplicación de este aditivo se encuentra en la rigidización de la mezcla, llegando a generar para contenidos altos de cemento hidráulico un comportamiento frágil, así como una disminución en la capacidad a fatiga del material. En el presente documento se realizó la evaluación del desempeño a fatiga, módulo y deformación plástica de una mezcla densa en frío con tamaño máximo de agregado 19 mm al ser adicionada contenidos de cemento entre el 0% y el 4% del peso en agregado seco permitiendo conocer su desempeño.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Evaluar el comportamiento a fatiga de una mezcla densa fría tipo MDF -19 cuando se adiciona cemento hidráulico en diferentes proporciones evaluada por el ensayo de fatiga a flexión en viga de cuatro puntos.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Realizar una revisión documental del comportamiento de las mezclas asfálticas en frío y el comportamiento al ser adicionadas con cemento hidráulico.
- Determinar la fórmula de trabajo para una MDF-19 de acuerdo con el procedimiento de diseño por resistencia descrito en el artículo 440-13 (INVIAS, 2013).
- Documentar los hallazgos acerca de la evaluación del comportamiento a fatiga evaluada por el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos para una MDF-19 al adicionar cemento hidráulico.

## 4. Marco teórico

En esta sección se presenta un análisis de las diferentes exigencias sobre calidad, tipo de ensayos de control de campo y laboratorio, umbrales de aprobación o rechazo para los materiales de construcción de pavimentos asfálticos según las especificaciones generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías de Colombia del año 2013, así como lo relacionado con algunas ventajas y desventajas de su proceso constructivo.

### 4.1 Requisitos de los materiales

Se presentan los ensayos exigibles a cada material con la codificación del Instituto Nacional de Vías del año 2013, la descripción del método, su propósito y su variable de medida.

#### 4.1.1 Ensayos sobre los agregados.

En la Tabla 1 se presentan 12 ensayos de laboratorio que se deben realizar a los agregados según lo establecido en las normas viales Colombianas.

Tabla 1  
*Ensayos sobre los agregados pétreos*

Ensayo	Descripción	¿Que mide?	¿Para qué sirve?
INV E-238-13	Describe el procedimiento para medir la resistencia a la abrasión de una muestra de agregado grueso utilizando el aparato de Micro-Deval.	Determinar la resistencia de los agregados al agua y a cargas abrasivas.	Es un indicador de calidad relativa o la competencia de las fuentes de materiales .
INV E-224-13	Determinación del valor del 10% de finos, constituidos por el material que pasa el tamiz de 2,36 mm (Nº.8)	Resistencia mecánica de un agregado grueso al aplastamiento sometido a un esfuerzo de compresión.	Evaluar el comportamiento de los materiales de cada capa sometidos a degradación mecánica.
INV E-220-13	Resistencia del agregado pétreo a desintegrarse simulando condiciones de humedad y congelamiento.	Resistencia de los agregados a sulfatos.	Determinar la resistencia de los agregados a la intemperie y condiciones del ambiente.

Ensayo	Descripción	¿Que mide?	¿Para qué sirve?
INV E-213-13	Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos.	La distribución a través de tamizajes, el tamaño del agregado grueso y fino de un material.	Determinar la distribución de las partículas de los agregados en una mezcla.
INV E-227-13	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso. (Entre 9.5 y 90mm de diámetro).	Porcentaje de partículas con un número especificado de caras fracturadas en los agregados.	Evaluar la resistencia al corte y el incremento de la fricción de las partículas de los agregados.
INV E-230-13	Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (6.3 y 63 mm de diámetro).	Forma de las partículas en los agregados.	Evitar problemas de modificación de granulometría y ruptura de los agregados en la compactación.
INV E-239-13	Determinación del contenido de vacíos de agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría.	Contenido de vacíos en una muestra de agregado fino no compactada.	Determinar la forma y textura de los agregados pétreos.
INV E-237-3	Contenido de impurezas.	El contenido de partículas de diámetro inferior a 0.5mm que se encuentran presentes en los agregados pétreos gruesos (diámetro superior a 4.75mm).	Evitar que se encuentren partículas indeseables como lo son arcilla, plástico, madera, polvo, materia orgánica, entre otros.
INV E-235-3	Valor azul de metileno en agregados finos.	Cantidad de arcillas en los agregados.	Detectar la presencia de materiales nocivos en los agregados.
INV E-133-3	Equivalente de Arena de suelos y agregados finos.	Cantidad de materiales finos, plásticos indeseables o con presencia arcillosa existen en los agregados finos	Limitar la cantidad de materiales nocivos en el agregado y determinar variaciones de calidad de los agregados.
INV E-125-3	Determinación del límite líquido de los suelos.	Contenido de humedad (agua) y consistencia de un suelo entre los estados líquido y plástico.	Caracterización de la fracción fina de los suelos.



Ensayo	Descripción	¿Que mide?	¿Para qué sirve?
INV E-218-13	Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 m (1 1/2") por medio del ensayo Maquina de los Ángeles.	Resistencia a la degradación de los agregados mayores a 1 1/2".	Es un indicador de calidad relativa o la competencia de las fuentes de materiales.

Nota: Elaboración propia con datos tomados de INVIAS (2013) y Marín (2018).

#### 4.1.2. Ensayos sobre productos asfálticos.

En la Tabla 2 se presentan 6 ensayos que se realizan según lo establecido en las normas INVIAS.

Tabla 2  
*Ensayos sobre productos asfálticos*

Ensayo	Descripción	¿Qué mide?	¿Para qué sirve?
INV. E-706-13	Penetración de los materiales bituminosos.	Resistencia que presenta el concreto asfáltico al ser penetrado por una aguja normalizada de 100g de masa durante 5 segundos a una temperatura de 25°C.	Medir la consistencia de los materiales a altas temperaturas en relación a la densidad. el valor medido corresponde a 1/10mm.
INV.E-724-13	Índice de penetración	El grado de susceptibilidad térmica, valores altos (mayores a 1.0).	Evaluar rigidez elevada, presentando problemas de fisuración. y Valores bajos (menores a -1.2).
INV. E-712-13	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola).	Punto de ablandamiento de productos bituminosos.	Clasificar los materiales bituminosos según su susceptibilidad térmica.
INV. E-702-13	Ductilidad de los materiales asfálticos.	Ductilidad de los materiales asfálticos de consistencia sólida y semisólida antes de producirse la rotura.	Medir la resistencia a la tensión de los materiales bituminosos.

Ensayo	Descripción	¿Qué mide?	¿Para qué sirve?
INV. E-713-13	Solubilidad de materiales asfálticos	Grado de solubilidad de materiales asfálticos.	Medir porcentaje de contaminantes en el asfalto.
INV. E-720-13	Ensayo de película delgada en RTFOT.	Simula el almacenamiento, fabricación, extendido y compactación de la mezcla.	Determinar envejecimiento a corto plazo.
AASHTO T321-14	Determinación de la vida a fatiga de una mezcla asfáltica	Cantidad de ciclos de carga donde el espécimen muestra un 50% de reducción en relación con la rigidez inicial.	Capacidad de almacenamiento de energía antes de que presente el fallo considerado en el momento de pérdida de su capacidad a la mitad de la inicial.
AASHTO T324-17	Ensayo de pista para rueda de Hamburgo.	Profundidad de la deformación producida por el paso de una rueda con determinada presión y condiciones de temperatura.	Evaluar la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica
AASHTO T324-11	El ensayo consiste en aplicar un esfuerzo de compresión axial sinusoidal a un espécimen de concreto asfáltico, a una temperatura y frecuencia de carga determinada	Calcula el módulo dinámico y el ángulo de fase	Determinar las propiedades elásticas de la mezcla asfáltica sometida a una carga sinusoidal. El módulo es empleado en el diseño de pavimentos para la determinación de espesores

Nota: Elaboración propia con datos tomados de INVIAS (2013), AASHTO y Marín (2018)

#### 4.1.3 Ensayos sobre emulsiones asfálticas.

Las emulsiones asfálticas adicional a los ensayos propios del asfalto requieren realizar caracterizaciones adicionales como lo muestra la Tabla 3:

Tabla 3  
*Ensayos sobre emulsiones asfálticas*

Ensayo	Descripción	¿Qué mide?	¿Para qué sirve?
INV. E-765-13	Tamizado de las emulsiones asfálticas.	Porcentaje de partículas de asfalto que queda retenido en el tamiz No. 20.	Controlan las impurezas, debido a que permite estimar la cantidad de grumos o contaminaciones presentes en la emulsión y la aplicación.
INV.E-766-13	Demulsibilidad de las emulsiones asfálticas.	Mediante ensayo de demulsibilidad, la estabilidad de las emulsiones asfálticas aniónicas y catiónicas.	Indicar la cantidad de material bituminoso que se unirá o se separará, causando la ruptura de la emulsión.
INV. E-768-13	pH de las emulsiones asfálticas o potencial de hidrogeno	Valor de pH en una emulsión.	Permite verificar si una emulsión es aniónica (Alcalina) o catiónica (Acida) y el comportamiento de la emulsión con los agregados. se considera emulsión acida (catiónica) y valores entre 7 hasta 14 se considera alcalina (aniónica).
INV. E-769-13	Cubrimiento y resistencia de las emulsiones asfálticas al desplazamiento por el agua.	Grado de cubrimiento de los agregados con emulsión asfáltica.	Determina la habilidad de una emulsión durante el proceso de mezclado y lavado con agua, para adherirse como una película a los agregados

Nota: Elaboración propia con datos tomados de INVIAS (2013) y Marín (2018)

Cabe resaltar el ensayo recubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento por el agua (INV. E-769-13), el cual mide la capacidad de la emulsión de recubrir y adherirse de forma adecuada las partículas de agregados pétreos con los que forma la mezcla asfáltica.

En Colombia, los asfaltos se clasifican por grados de penetración según el Artículo 400 “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” de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías del año 2013.

#### 4.1.4 Ensayos de desempeño en laboratorio de mezclas asfálticas.

Para el análisis del desempeño de las mezclas se tienen diferentes procedimientos de ensayo, algunos de ellos mencionados a continuación:

Método estándar ensayo de pista para rueda de Hamburgo en inmersión para mezclas asfálticas compactadas en caliente (AASHTO T324-17), Por medio de este ensayo se evalúa la susceptibilidad al ahuellamiento evaluando la resistencia al rodamiento y la afectación debido a la humedad de los materiales de pavimentación asfáltica tras la simulación del paso repetido de cargas dinámicas. La metodología consiste en pasar una rueda a una velocidad de  $52 \pm 2$  pases por minuto sobre la mezcla asfáltica con una presión de  $705 \pm 4,5$  N ( $158 \text{ lb} \pm 1,0$  libras), a medida que se ejercen los pasos es medida la deformación producida en condiciones de temperatura y presión constantes. Al realizar esta evaluación es posible tener una proyección de susceptibilidad al fallo prematuro en las mezclas asfálticas causadas por diferentes factores como lo puede ser la estructura inadecuada del agregado, falta de rigidez del aglomerante o daños causados por susceptibilidad a la humedad.

Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas AASHTO T342-11, El método de prueba mencionado anteriormente sirve para construir las curvas maestras utilizadas en la determinación del módulo de diseño de acuerdo a las variaciones de temperatura y aplicación de cargas, las temperaturas y frecuencias del ensayo usadas corresponden a:  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $4.4^{\circ}\text{C}$ ,  $21.1^{\circ}\text{C}$ ,  $37.7^{\circ}\text{C}$ ,  $54.4^{\circ}\text{C}$ , y 0.1Hz, 0.5Hz, 1.0Hz, 5Hz, 10Hz y 25Hz.

Vida a la Fatiga de Mezclas Asfálticas sometidas a la Viga de Flexión en cuatro puntos AASHTO T321-14, el procedimiento utilizado la determinación de la vida a fatiga se entiende como la capacidad de almacenamiento de energía antes de que presente el fallo considerado en el momento de pérdida de su capacidad a la mitad de la inicial. El ensayo de flexión en cuatro

puntos puede controlarse por esfuerzos controlados o deformación controlada y la finalización del ensayo corresponde a la caída del esfuerzo a la mitad o el doble de la deformación de acuerdo al parámetro seleccionado.

A continuación, se presentan una serie de conceptos que se utilizaron para el desarrollo del análisis.

#### **4.2 Pavimento.**

Estructura constituida por capas, estratificada de forma horizontal, construida con materiales seleccionados y compactados por métodos adecuados, apoyada sobre una superficie natural o artificial (Suelo de fundación) llamada sub – rasante de una vía, después del proceso de movimiento de tierras. Ésta debe tener la capacidad de soportar los esfuerzos transmitidos por el pavimento, ocasionados por las repeticiones de carga del tránsito en el periodo de diseño; el cual debe cumplir con características de resistencia a las cargas e intemperismo, durabilidad, economía y darle seguridad y confort al usuario a velocidades de diseño y bajo cualquier condición climática. Los pavimentos se pueden clasificar en rígidos, semi – rígidos, flexibles y pavimentos articulados (Montejo Fonseca, 2002).

Los pavimentos presentan diferentes configuraciones y materiales utilizados para su construcción, identificándose en términos generales de la siguiente forma:

- Pavimentos flexibles: Están constituidos generalmente por dos capas granulares (base y sub – base), y una carpeta bituminosa de rodadura.
- Pavimentos semi – rígidos: Varían en que una de sus capas se rigidiza artificialmente por medio de un aditivo.
- Pavimentos rígidos: son estructuras por una losa en concreto hidráulica apoyada sobre sub – rasante o un material seleccionado. Se componen por una losa de concreto

hidráulico apoyado sobre una base, realiza su transmisión de esfuerzos al suelo en pequeñas proporciones.

- Pavimentos articulados: Están constituidos por una capa de rodadura de bloques de concretos prefabricados, denominados adoquines, los cuales se apoyan sobre una capa fina de arena, y esta a su vez se apoya sobre una sub – base o sobre sub – rasante (Montejo Fonseca, 2002).

### **4.3 Asfalto**

Material de color que varía entre negro o pardo oscuro, solido o semisólido a temperatura ambiente, pero se licua gradualmente al incrementarse la temperatura, con propiedades ligantes o aglutinantes, obtenido a partir de la destilación del petróleo, se conforma por una serie de compuestos en los que sobresalen los hidrocarburos, gran parte disulfuro de carbono. En el proceso de separación de componentes de él se separan las fracciones volátiles quedando el asfalto como residuo de dicho proceso. Así mismo, en procesos de destilación natural a través de millones de años se han formado depósitos naturales de asfaltos. Los asfaltos se clasifican de acuerdo con la densidad, contenido de betún y composición química (Arenas Lozano, 1992).

### **4.4 Agregados pétreos**

Los agregados pétreos son minerales inertes y duros, empleados en fragmentos para la construcción de pavimentos. Se utilizan también en la construcción de base y sub - base granular sirviendo como estructura de soporte a los pavimentos; a su vez, se combina en tamaños gruesos (gravas), tamaño fino (arenas) y una llenante mineral (filler).

“Los agregados pétreos que son utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas deben contar con propiedades específicas, que, al emplear una capa del material asfáltico, ésta no

se desprenda por la acción combinada del agua y del tránsito” (Instituto de Desarrollo Urbano IDU,2016).

#### **4.4.1. Agregado grueso.**

Se llama agregado grueso a la porción del agregado retenida en el tamiz de 4,75 mm (No.4). Este agregado deberá provenir de la desintegración de roca, de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin presencia exagerada de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, deberá estar exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias que puedan impedir la adhesión completa del asfalto o afecten adversamente la durabilidad de la mezcla compactada.

#### **4.4.2 Agregado fino.**

Se llama agregado fino a la porción del agregado comprendida entre los tamices No. 4 y N 200.

“Deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena. La proporción de arena natural no podrá exceder del quince por ciento (15 %) de la masa total del agregado combinado, cuando el tránsito de diseño sea superior a cinco millones ( $> 5 \cdot 10^6$ ) de ejes equivalentes de 80 ken en el carril de diseño, ni exceder de veinticinco por ciento (25 %) para tránsitos de menor intensidad. En todo caso, la proporción de agregado fino no triturado no podrá exceder la del agregado fino triturado” (INVIAS, 2013).

#### **4.4.3 llenante mineral.**

La llenante mineral es la porción del agregado que pasa el tamiz de 75 mm (No.200), este será de polvo de piedra caliza, cenizas de carbón o de fundición, cemento Portland u otro material mineral inerte.

Debe estar seco y libre de terrones. “La llenante mineral podrá provenir de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos o podrá ser aporte como producto comercial, generalmente Cal hidratada o cemento hidráulico.” (INVIAS,2013)

El agregado fino puede proceder de un proceso de trituración de piedra de cantera o de grava natural, o de fuentes naturales de arena. La llenante mineral o filler puede provenir de los agregados pétreos, sometiéndolos a un proceso de tamizado y posterior clasificación.

#### 4.5 Cemento hidráulico

Las características se describen en la tabla 4, la cuales hacen referencia a la ficha técnica proporcionada por la empresa ARGOS fabricante del cemento hidráulico, para el caso del presente estudio clasificado como de uso general.

Tabla 4  
*Caracterización cemento hidráulico*

Parámetros físicos		Norma de ensayo	NTC 121-2014 tipo UG
Finura	Blaine, min(cm <sup>2</sup> /gr)	NTC 33	A
	Retenido Tamiz 45µm (%)	NTC 294	A
Cambio de longitud por autoclave expansión, máx. (%)		NTC 107	0.80
Tipo de fraguado, Ensayo de vicaft <sup>B</sup>	No menos de, minutos	NTC 118	45
	No más de, minutos	NTC 118	420
Contenido de aire en volumen de mortero, máx. (%)		NTC 224	12
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx. (%)		NTC 4927	0.020
<b>Resistencia mínima a la compresión (MPa)</b>			
3 días		NTC 220	8.0
7 días		NTC 220	15.0
28 días		NTC 220	24.0

Nota: Elaboración propia con datos tomados de Ficha técnica cemento ARGOS (2019)



En el caso de pavimentos de cemento hidráulico el 79% de los 19 ensayos exigibles en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías y el 21% restante, correspondiente a los ensayos de determinación del valor del 10% de finos, índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras, determinación del contenido de azufre en los agregados pétreos y valor azul de metileno en agregados finos.

#### **4.6 Emulsión asfáltica**

Son dispersiones en agua de glóbulos de asfalto de 2 a 5 micrones de diámetro, las cuales permanecen en suspensión sin aglomerarse ni sedimentarse. Se mantienen estables mediante la presencia de agentes emulsificantes que pueden ser jabones resultantes de ácidos grasos o resinas con bases fuertes, o los resultantes de la acción de los ácidos minerales sobre compuestos amínicos. Las emulsiones pueden ser aniónicas o catiónicas, dependiendo de la carga eléctrica superficial de los glóbulos de asfalto, las emulsiones aniónicas tienen afinidad con superficies iónicas positivas como en los materiales de composición calcárea. Cuando la fase acuosa se disocia con los glóbulos de asfalto y estos se aglomeran sobre un material pétreo o los unos con los otros, separándose netamente de la fase acuosa, se dice que ocurre un rompimiento de la emulsión. De acuerdo con la velocidad de rompimiento, las emulsiones pueden ser rompimiento rápido, medio o lento (Montejo Fonseca, 2002).

#### **4.7 Mezclas asfálticas**

Son combinaciones de materiales pétreos con un ligante asfáltico, son elaboradas generalmente en plantas o en el sitio de obra, dependiendo de la gradación del material pueden ser abiertas o densas, dependiendo del ligante utilizado pueden ser frías, tibias o calientes, entre otras clasificaciones. Se deben caracterizar por ser estables, resistentes a: deformaciones

permanentes, fatiga, deslizamiento, envejecimiento y a condiciones ambientales, deben ser impermeables, durables y económicas (Rondón y Reyes, 2015).

La Mezcla asfáltica densa en frío es una combinación de un ligante bituminoso con materiales pétreos bien gradados, incluyendo un alto contenido de finos, las cuales se pueden fabricar, extender y compactar a temperatura ambiente (Montejo Fonseca, 2002).

Al tener una buena gradación, después de compactada, permite reducir espacios entre partículas (vacíos) aumentando la resistencia mecánica y disminuyendo la permeabilidad, así mismo su mayor ventaja es que puede ser usada como capa de rodadura o base asfáltica debido a su rigidez, resistencia al envejecimiento y oxidación del asfalto, facilidad constructiva; son amigables con el medio ambiente, ya que son fabricadas a temperaturas inferiores a los 80°C (Rondón y Reyes, 2015).

La principal diferencia entre estas diferentes alternativas corresponde al mecanismo de dispersión, el cual evita el aglutinamiento de la mezcla, es decir, en los asfaltos emulsionados el agente dispersante corresponde a una mezcla de asfalto, agua y agentes emulsificantes, el cual, posterior al paso por un molino coloidal genera la emulsión. Los asfaltos diluidos corresponden a la unión de asfalto con agentes delusores como combustibles o fluxantes que pueden ser de origen animal o vegetal.

En el presente estudio se trabajó con una mezcla en frío elaborada con emulsión asfáltica debido a la facilidad de tener las materias primas en el entorno evaluado, así como también por la necesidad de agua para generar la reacción del cemento hidráulico adicionado, representando el objetivo del presente estudio, en caso del no uso de agua la reacción no ocurriría.

#### **4.8 Mecanismos de daño de mezclas asfálticas para el diseño.**

“Los cuatro principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio, reportado por diferentes autores y que se deben tener en cuenta en el diseño del pavimento, son el ahuellamiento, los agrietamientos por fatiga, el daño por humedad y el envejecimiento” (Reyes y Rendon, 2016, p.123).

El fenómeno de ahuellamiento es uno de los principales mecanismos de daño de las capas asfálticas en estructuras de pavimentos. Reyes y Rendon (2016) lo definen como “Deformación vertical permanente que se va acumulando en el pavimento debido al paso repetitivo de los vehículos, el cual genera la formación de delgadas depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de las llantas” (p.123).

Las fallas estructurales o funcionales en el pavimento y ocurre en cualquier capa de la estructura. Sin embargo, investigadores como Sousa y Solaimanian (1994) y Chen y Liao (2002) han demostrado y reportado que la mayor parte del ahuellamiento se genera en la capa asfáltica.

La principal causa del ahuellamiento en mezclas asfálticas se presenta debido a una deficiencia en la densificación en etapa constructiva y por la aparición de deformaciones de corte durante la vida útil del pavimento, como lo afirma Hofstra y Klomp (1972). Con base en los estudios realizados por la American Association of State Highway Officials (AASHO; 1962).

Existen diferentes factores que afectan el desempeño de las mezclas asfálticas frente al ahuellamiento, unos pueden ser controlables, pero otros son propios de las condiciones del sitio, la clasificación propuesta por Tarefder, Zaman y Hosbon (2003) en la cual plantean tres grupos, el primero corresponde a la mezcla asfáltica (gradación del agregado, forma de partículas, grado de funcionamiento PG del ligante, contenido de asfalto), el segundo grupo corresponde a las cargas impuestas por el tránsito (Presión de inflado llantas, tipo de eje, presión de contacto) y

finalmente las ambientales (temperatura, humedad, precipitación, exposición a condiciones particulares).

Zhou y Scullion (2002) mencionan que a nivel de laboratorio se experimentan tres diferentes etapas al ser evaluado el ahuellamiento, la primera etapa corresponde a una acumulación rápida debido a la densificación producto de las primeras cargas, reacomodación de las partículas y generando una disminución en los vacíos de la mezcla. En el segundo estado se presenta una disminución en la tasa de deformación alcanzando un valor constante, el material inicia con la generación de microfisuras y causando pérdida de rigidez. Durante la etapa tres vuelve a presentarse un incremento en la tasa de deformación debido a la propagación de las microfisuras que al unirse forman macrofisuras y generan un rápido incremento en la acumulación del ahuellamiento.

“El fenómeno de fatiga es uno de los principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio” (Hsu y Tseng, 1996). Como lo describe Rondón y Reyes (2016):

La fatiga ocurre en las capas ligadas del pavimento y, para el caso de las estructuras flexibles, se presentan cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica producto de las cargas impuestas por los automóviles (cargas repetidas). El paso continuo de vehículos hace que la capa asfáltica flexione, generando esfuerzos de tensión en su extremo inferior. Esta repetición de carga hace que la mezcla asfáltica pierda rigidez y origina la aparición de deformaciones plásticas a tracción, que a su vez conducen a la formación de microfisuras. así mismo conducen a la formación de microfisuras que ante la repetición carga y la disminución de rigidez produce la unión de las microfisuras trayendo consigo la aparición de macrofisuras, las cuales se evidencian con el tiempo a nivel de la rasante como grietas, lo que disminuye de forma exponencial la vida del pavimento que estará expuesto a la acción del agua y el aire que penetra la estructura” (p.165-166).

Otra manera de que ocurra el fenómeno de agrietamiento por carga es cuando se generan esfuerzos y deformaciones de tensión elevados en las zonas vecinas a las llantas de los vehículos cuando estos circulan sobre la capa asfáltica. Estas deformaciones conllevan a grietas que se propagan de arriba hacia abajo en la capa asfáltica; este fenómeno se denomina *Top Down Cracking* (TDC). También se presenta por efecto de endurecimiento del ligante asfáltico cuando las mezclas asfálticas se envejecen por acción del medio ambiente, y por dos fenómenos térmicos; agrietamiento por bajas temperaturas y fatiga térmica.

Si el fenómeno de fatiga se debe a cargas que generan flexión de la capa asfáltica, las microfisuras inician en el extremo inferior cuyo esfuerzo es mayor y ascienden hacia la superficie formando fisuras paralelas al sentido del tránsito y a medida que aumentan se propagan formando piezas angulares desarrollando un aspecto parecido a la piel de cocodrilo. Si este fenómeno ocurre por temperatura, las fisuras se generan transversalmente a la vía desde la rasante hasta la fibra inferior de la capa asfáltica. Según Khatatak y Baladi (2001) y Kim et al. (2003), un material perfectamente elástico nunca fallará por fatiga por carga.

El agrietamiento por fatiga contempla dos fases de daño: la primera se denominada fase de iniciación, es la aparición y propagación de una red de microfisuras de manera uniforme en la mezcla disminuyendo la rigidez de la misma; la segunda fase denominada fase de propagación, se presenta con la unión de microfisuras y con ello la aparición de fisuras de mayor tamaño “macro-crack” que se propagan dentro del material. Depende de la rigidez de la mezcla la aparición y la velocidad de propagación de cada una de las fases de daño, para mezclas rígidas la primera fase es tardía, sin embargo, luego de la aparición de la primera fase, la segunda avanza rápidamente. Cosa contraria con una mezcla de baja rigidez la primera fase ocurre rápidamente, sin embargo, la segunda avanza de manera muy lenta.

Según Reyes y Rondón (2015), en Colombia son escasas las investigaciones que se han llevado a cabo sobre el fenómeno de fatiga, esto se debe a la falta de equipos adecuados para medir en campo y laboratorio, adicionalmente al escaso presupuesto destinado a la investigación. Lo anterior evidencia la falta de conocimiento sobre el tema y la inexistencia de un modelo propio que caracterice el comportamiento a fatiga partir de las propiedades (mecánicas, químicas, reológicas y físicas) de los materiales, las condiciones del medio ambiente y el comportamiento del tráfico.

Con relación al daño por humedad Tarefder , Zaman y Hobson (2003), afirman que “El agua genera pérdida de resistencia en la interfase entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo. Esto hace que la tasa de acumulación de la deformación permanente aumente debido a la pérdida de cohesión de la mezcla por humedad”.

Teniendo en cuenta que el daño por humedad afecta la durabilidad de las mezclas asfálticas, estas deben ser diseñadas y construidas no solo para que resista las cargas generadas por el tránsito, sino también la acción del medio ambiente. Las causas que generan este fenómeno son complejas ya que involucran aspectos físicos, químicos, mecánicos y termodinámicos. Abo- Qudais y Al-Shweily (2007.2007a). Cuantificar la influencia del ambiente en el comportamiento de este tipo de material no es una tarea fácil. La forma como se realiza actualmente es separando cada uno de los componentes que lo conforman (agua, aire, temperatura y rayos ultravioleta) y evaluando la influencia de cada uno de ellos (desde el punto de vista mecánico y químico) de manera separada sobre el ligante y las mezclas (Shen, Amikhanian y Tnag, 2006). Se menciona adicionalmente que el fenómeno conocido como stripping es función de la tensión superficial entre el agregado pétreo y el asfalto, y que el empleo de ligantes más viscosos generan mayor resistencia a este fenómeno.

Para incrementar la resistencia al agua de mezclas en servicio, son de amplia utilización los aditivos anti-stripping o mejoradores de adherencia (Aksoy et al.,2005).

De acuerdo con las especificaciones colombianas la resistencia a tracción de mezclas de concreto asfáltico (INV. E .725-13, AASHTO T 283) en curado húmedo debe ser al menos 80% de la alcanzada bajo condición seca. Este ensayo permite evaluar la resistencia al agua de mezclas asfálticas utilizando una prueba de tracción indirecta.

Con respecto a la normatividad legal La utilización de mezclas asfálticas en frío se encuentra avalada por normas nacionales e internacionales, siendo un campo de crecimiento a nivel del conocimiento y la práctica. En Colombia, existen diferentes entidades encargadas de evaluar la calidad y cumplimiento de las especificaciones como lo son la ANI, INVIAS, IDU, entre otros. Las diferentes instituciones que avalan estas tecnologías tienen especificaciones particulares de acuerdo con la experiencia e investigaciones realizadas., si bien se presentan unos parámetros mínimos que se deben cumplir, el actual documento ayuda a complementar con investigaciones locales el uso de cemento hidráulico como agente mejorador de propiedades mecánicas y muestra limitaciones en la adición al ser evaluadas este tipo de mezclas asfálticas en frío a fatiga.

La normatividad que rige la mayor parte del territorio de Colombia para la construcción de carreteras, y en el caso específico de mezclas asfálticas en frío se encuentra consignada en el artículo 440 de las Especificaciones Generales para Construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013), en las cuales se establece que dichas mezclas deberán cumplir con una serie de características en: Agregados, emulsiones, llenantes minerales, agua, aditivos, comportamiento mecánico, entre otros.

## 4.9 Caracterización mezcla densa fría

La mayor ventaja es que las MDF tienen un mejor desempeño con respecto a la función de capa de rodadura y base asfáltica en un pavimento esto se debe a su mayor rigidez y resistencia al envejecimiento por el menor contenido de vacíos con aire. El diseño de este tipo de mezcla se ejecuta a través del ensayo de inmersión- compresión (AASHTO T 165, INV. E – 738-13).

### 4.9.1 Ventajas mezcla densa fría.

Como ventaja de este tipo de mezclas está su versatilidad, pues permite utilizar una gran variedad de agregados y tipos de emulsiones, además, pueden ser utilizadas en condiciones ambientales diversas, ya que uno de los requerimientos es cumplir con una temperatura ambiente mayor que 10 °C. Las mezclas en frío de graduación densa se utilizan típicamente para tránsitos medios y livianos, pero las de graduación abierta se han utilizado con éxito para tránsitos pesados (Jiménez, Sibaja y Zamora,2009). Otras ventajas que se destacan al utilizar este tipo de mezclas son las siguientes:

- Mayor resistencia al envejecimiento y oxidación del asfalto.
- Menores costos de fabricación
- Control de temperaturas que reduce riesgos de accidentes
- Con relación al medio ambiente cabe resaltar que las mezclas densas en frío representan una alternativa viable, pues la producción de estas mezclas implica un ahorro de consumo de energía, así como, una reducción en la generación de vapores tóxicos y partículas de polvo.



#### **4.9.2 Desventajas de la mezcla densa fría.**

- Por su baja porosidad la textura superficial no es la mejor no es la mejor para obtener buena fricción neumático- pavimento.
- Mayor ruido de rodadura en comparación con mezclas de tipo porosas.
- Generación de láminas de agua superficiales durante lluvia.
- Susceptibilidad al agua (principalmente disminución de adherencia y resistencia mecánica)

## 5. Metodología

Con el fin de mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas en frío y aprovechar los beneficios que presenta esta técnica, se planteó realizar adiciones de cemento hidráulico en una mezcla densa en frío MDF-19 para mejorar sus propiedades, así también, se debe tener en cuenta que la adición de cemento hidráulico en contenidos elevados causa rigidización y fragilidad en las mezclas asfálticas disminuyendo la vida a fatiga.

Al adicionar cemento hidráulico a las mezclas asfálticas en frío se busca mantener el criterio de comportamiento bajo la idea de pavimento flexible, por este motivo los contenidos de cemento deben ser proporcionalmente bajos para garantizar que se encuentren en la fase de flexible y alejarse de un comportamiento frágil. Investigaciones realizadas muestran evaluaciones con contenidos de cemento hasta con 6% (Oruc, Celik, & Akpinar, 2006), los contenidos se han establecido para la presente investigación con un máximo de 4% sobre el peso del agregado pétreo. La metodología usada en la presente investigación se plantea en la Figura 1 con un diagrama de flujo:

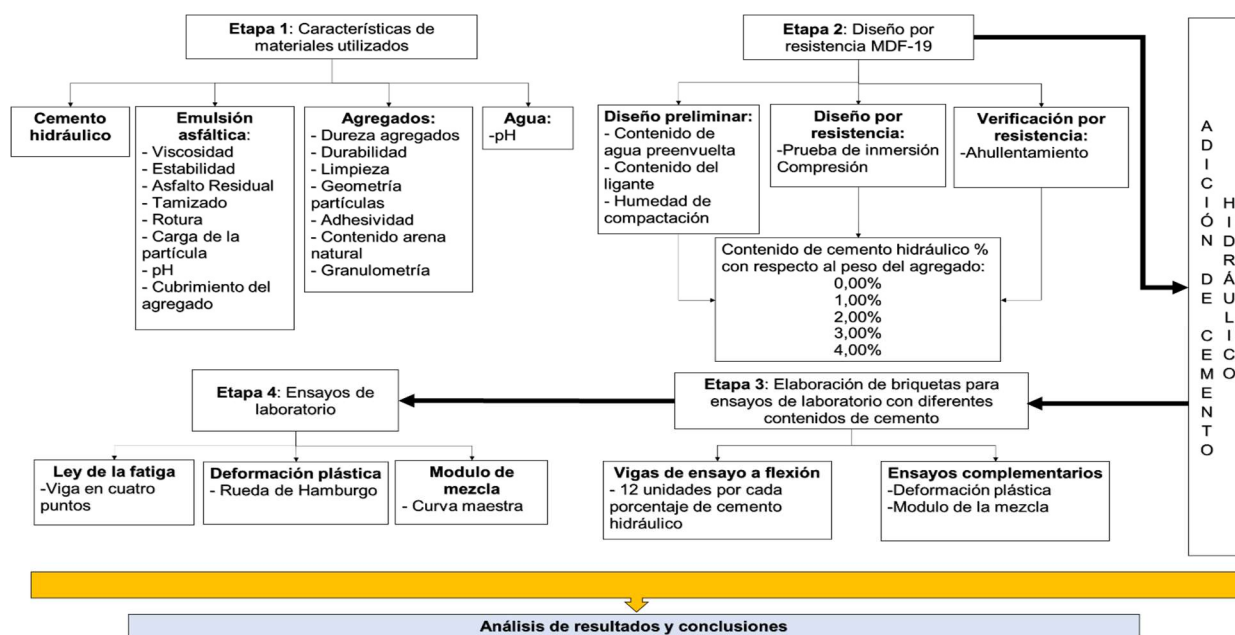


Figura 1. Metodología usada en el desarrollo de la investigación.

## 5.1 Caracterización de los materiales

La mezcla asfáltica en Frio MDF-19 presenta una interacción entre Cemento hidráulico, Emulsión asfáltica, agregados pétreos y agua.

### 5.1.1. Emulsión asfáltica.

La caracterización se extrajo de los certificados de calidad emitidos por el fabricante de la emulsión asfáltica (Empresa HQ) con asfalto proveniente de la refinería de Ecopetrol ubicada en Barrancabermeja.

ESPECIFICACIÓN INVIAS ART. 411, TABLA 411-1					
CARACTERÍSTICA	UNIDADES	NORMA ENSAYOS	CRL - 1		Resultado
			Mín.	Máx.	
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	s	E-763	20	200	23.07
Contenido de agua en volumen	%	E-761	-	43	39.75
Estabilidad en almacenamiento (24 horas), sedimentación a los 5 días.	%	E-764	-	1	0.34
				5	2.03
Destilación					
Contenido de asfalto residual	%	E-762	57	-	57.40
Contenido de disolventes			-	-	0
Tamizado. Retenido tamiz No. 20	%	E-765	-	0.10	0.0185
pH		E-768	-	6	2.34
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE DESTILACIÓN					
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1mm	E-706	60	100	65.3
Ductilidad a 25°C	cm	E-702	40	-	>100
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	97.5	-	99.99

Figura 2. Emulsión CRL-1. Fuente: Certificado de Calidad emulsión CRL-1 HQ, abril 2018

### 5.1.2 Agregados pétreos.

Estos agregados son de origen volcánico y están compuestos por diabasas y basaltos de color verde a gris oscuro, provienen de la cantera lomas del caney, localizada en Yumbo -Valle.

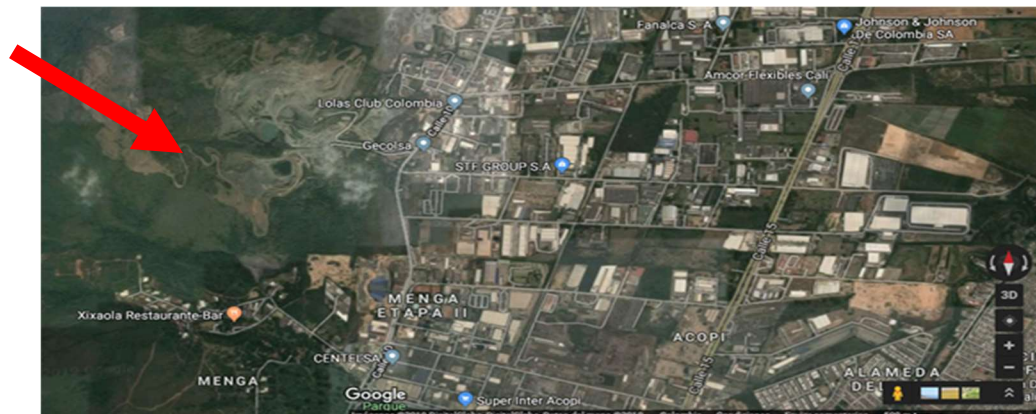


Figura 3. Ubicación cantera agregados pétreos. Google maps (2019).

En la Tabla 5 se presentan 14 ensayos exigibles en las normas INVIAS artículo 440 -13 del 2013, cabe resaltar que el 100% de los ensayos realizados en esta investigación cumple con las especificaciones de la norma.

Tabla 5  
*Agregados pétreos.*

<b>Propiedad</b>	<b>Norma INVIAS</b>	<b>"Especificación INVIAS (NT3)"</b>	<b>Resultado</b>
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%) 100 ciclos	INV. E-218	-	4,20
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%) 500 ciclos	INV. E-218	< 50	20,99
Degradación por abrasión en el aparato Micro-Deval (%)	INV. E-238	< 30	7,7
Solidez Frente a la Acción de Sulfatos (%)	INV. E-220	< 12	8,8
Impurezas en agregado grueso (%)	INV. E-237	< 0,5	0,38
Límite líquido	INV. E-125	< 25	N.P.
Índice de Plasticidad	INV. E 125/126	< 6	N.P.
Equivalente de Arena (%)	INV. E-133	> 50	65,6
Valor de Azul de Metileno	INV. E-235	< 10	2,3
Partículas Planas y Alargadas, Relación 5:1 (%)	INV. E-240	< 10	0,1%
Caras Fracturadas Agregados Gruesos (%) 1 Cara	INV. E-227	> 85	99
Caras Fracturadas Agregados Gruesos (%) 2 Caras	INV. E-227	> 70	96
Angularidad de los Agregados Finos (%)	INV. E-239	> 45	47,0
Peso Unitario Llenante en Kerosene (g/cm <sup>3</sup> )	INV. E-225	0,5 – 0,8	0,788

<b>Propiedad</b>	<b>Norma INVIAS</b>	<b>"Especificación</b>	<b>Propiedad</b>
adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (Método Riedel-Weber)	INV. E-774	> 4	7

Nota: De los resultados obtenidos, todas las propiedades cumplen con las especificaciones INVIAS artículo 440-13.

De los resultados obtenidos, todas las propiedades cumplen con las especificaciones INVIAS artículo 440-13.

Adicional a las características mostradas en la tabla 4 se realizó granulometría a nivel de laboratorio como se muestra en la tabla 6 y se lo comparo con las especificaciones de la norma de INVIAS 440-13, cabe resaltar que se obtuvo una adecuada curva granulométrica como se muestra en la Tabla 5 según lo establecido para mezcla densa en frio con tamaño máximo nominal de 19 mm (MDF-19).

Tabla 6  
*Granulometría*

<b>Tamiz</b>	<b>% Pasa</b>	<b>"Especificación INVIAS mdf-19"</b>	
		<b>MIN</b>	<b>MAX</b>
1"	100	100	100
3/4"	100	100	100
1/2"	87,8	80	95
#4	57,2	50	65
#8	42	35	50
#50	17,6	13	23
#200	5,5	3	8

Franjas granulométricas especificado en artículo INVIAS 440-13 para mezcla MDF-19.

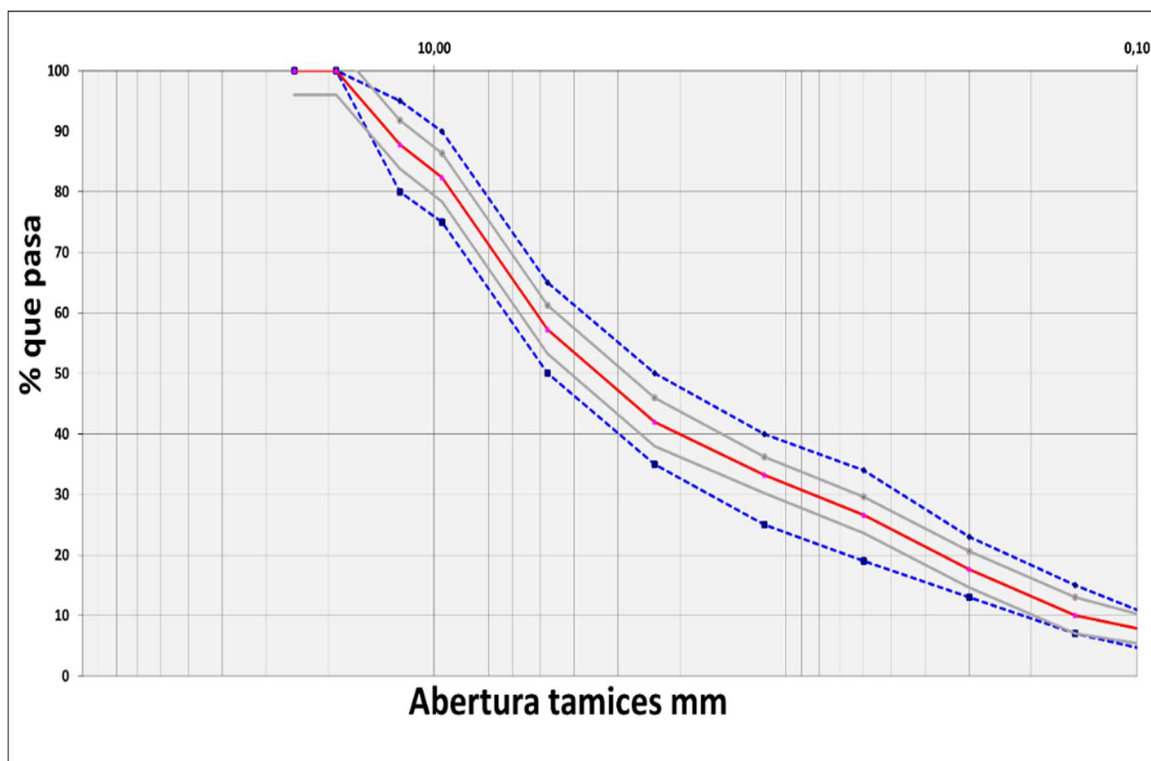


Figura 4. Granulometría MDC-19 requerida y obtenida en laboratorio.

Las líneas azules representan el huso granulométrico de las especificaciones técnicas para mezclas densas frías tipo MDF-19; la línea roja dentro de la franja, hace referencia al material de esta investigación, el cual cumple con lo requerido en la norma.

## 5.2 Diseño de mezcla densa fría MDC-19

Para el diseño de la mezcla se utilizó el método de inmersión – compresión, descrito en el artículo INV E-622 (INVIAS, 2013).

En el diseño preliminar de la MDF-19 se calcula la superficie específica del material utilizado con el objetivo de tener un aproximado en el consumo de asfalto como se muestra en la tabla 7 de superficie específica. En este diseño tampoco se tienen adiciones de cemento, por lo tanto, el cálculo de superficie específica solo se tiene en cuenta en esta etapa y no es objeto del presente trabajo evaluarlo con las adiciones de cemento.

Tabla 7  
Diseño de mezcla densa fría MDC-19

Tamiz	% Retenido	Factores		Factor de superficie específica f.s.e.	F.S.E. X %RET
3/8"	17.61	P2	42.75	0.33	
N. °4	42.75	P1	18.05	0.81	
N. °8	15.28	S3	17.29	2.72	
N. °16	8.77	S2	11.88	9.15	
N. °30	6.55	S1	3.73	21.93	
N. °50	9.02	F	6.30	125	
N. °80	7.59				
N°200	3.73	Total	100	<b>E [m<sup>2</sup>/Kg]</b>	<b>10.54</b>

En el diseño preliminar de la MDF-19 se calcula la superficie específica del material utilizado con el objetivo de tener un aproximado en el consumo de asfalto.

Tabla 8  
Porcentaje de Emulsión Asfáltica Teórica Método de DURIEZ

Porcentaje de Emulsión Asfáltica Teórica Método de DURIEZ				
% Emulsión CRL-1	% Asfalto Residual 1	% Asfalto Residual en la Emulsión CRL-1	Valor K (Módulo Riqueza según Granulometría)	Superficie Específica del Agregado (E)
14.09	8.49	60.23	5.3	10.537

De acuerdo con la superficie específica, el valor de riqueza y el asfalto residual de la emulsión se estableció el % de emulsión CRL-1 teórico.

### 5.2.1 Humedad de compactación

El porcentaje de Agua Pre-Envuelta es de 4,73%; determinado en la prueba de Relación Humedad-Peso Unitario Seco en los Suelos, ensayo modificado de compactación E-142-13 (INVIAS, 2013).

### 5.2.2. Diseño por resistencia.

Este se realiza por ensayos de inmersión compresión, para este fin se elaboraron mezclas con diferentes contenidos de ligante por encima y por debajo del óptimo teórico. Los porcentajes usados fueron:

Tabla 9  
*Diseño por resistencia*

Nro.	Contenido de emulsión (%)
1	10.5
2	12.12
3	13.73
4	15.36
5	16.97

Con el contenido de emulsión teórico se realizan variaciones para evaluar y obtener el diseño definitivo. Se realizaron 6 briquetas por cada contenido de ligante, 3 se ensayaron en seco y 3 se ensayaron húmedas, para luego determinar la resistencia conservada según el ensayo E-622 (INVIAS, 2013). Estos se dividieron en 2 grupos, el primer grupo de probetas se curan durante 14 días en el baño de aire a  $25 \pm 1^\circ \text{C}$  y con una humedad relativa del 50% y el otro grupo de tres probetas se curan durante 7 días en el baño de aire y luego 7 días en el baño de agua a  $25 \pm 1^\circ \text{C}$ .



Figura 5. Ensayos previos con briquetas



### 5.2.1 Mezcla 10.5% ligante.

Tabla 10  
Mezcla 10.5% ligante

BRIQUETA	% EMULSIÓN	% ASFALTO RESIDUAL	PESOS (gr)			VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	TEMP. DEL AGUA °C	DENSIDA D BULK (gr/cm <sup>3</sup> )	RESISTENCIA			PESOS DESPUES ENSAYO (gr)			RESISTENCIA CONSERVADA (%)
			AIRE	SSS	AGUA				CARGA (N)	Kg/F	Mpa	PESO DE FALLA	% AGUA ABSORBIDO	PESO CON HUMEDAD	
SECO	1	10,50	6,49	1862,10	1872,90	1080,50	792,40	25	2,350	19520	1990,45	2,408	1862,10	0,00	1080,50
	2			1870,90	1884,70	1088,00	796,70		2,348	19450	1983,32	2,399	1870,90	0,00	1088,00
	3			1866,45	1878,80	1084,25	794,55		2,349	19630	2001,67	2,421	1866,45	0,00	1084,25
<b>2,409</b>															
<b>79,15</b>															
HÚMEDO	4	10,50	6,49	1859,10	1870,60	1079,20	791,40	25	2,349	15470	1577,48	1,908	1921,50	3,25	62,40
	5			1855,40	1868,50	1078,90	789,60		2,350	15510	1581,55	1,913	1930,00	3,87	74,60
	6			1857,25	1869,55	1079,05	790,50		2,349	15400	1570,34	1,900	1925,75	3,56	68,50
<b>1,907</b>															

Evaluación de resistencia en seco, en húmedo y resistencia conservada para 10.5% de emulsión asfáltica CRL-1.

### 5.2.2 Mezcla 12.12% ligante.

Tabla 11  
Mezcla 12.12% ligante

BRIQUETA	% EMULSIÓN	% ASFALTO RESIDUAL	PESOS (gr)			VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	TEMP. DEL AGUA °C	DENSIDA D BULK (gr/cm <sup>3</sup> )	RESISTENCIA			PESOS DESPUES ENSAYO (gr)			RESISTENCIA CONSERVADA (%)
			AIRE	SSS	AGUA				CARGA (N)	Kg/F	Mpa	PESO DE FALLA	% AGUA ABSORBIDO	PESO CON HUMEDAD	
SECO	7	12,12	7,49	1892,30	1904,50	1105,50	799,00	25	2,368	21100	2151,57	2,603	1892,30	0,00	1105,50
	8			1896,20	1903,50	1100,10	803,40		2,360	21180	2159,72	2,613	1896,20	0,00	1100,10
	9			1894,25	1904,00	1102,80	801,20		2,364	21090	2150,55	2,601	1894,25	0,00	1102,80
<b>2,606</b>															
<b>89,16</b>															
HÚMEDO	10	12,12	7,49	1881,80	1891,40	1095,70	795,70	25	2,365	18840	1921,11	2,324	1921,50	2,07	39,70
	11			1887,20	1899,90	1100,90	799,00		2,362	18810	1918,06	2,320	1930,00	2,22	42,80
	12			1884,50	1895,65	1098,65	797,00		2,364	18850	1922,13	2,325	1925,75	2,14	41,25
<b>2,323</b>															

Evaluación de resistencia en seco, en húmedo y resistencia conservada para 12.12% de emulsión asfáltica CRL-1.

### 5.2.3 Mezcla 13.73% ligante.

Tabla 12

Mezcla 13.73% ligante

BRIQUETA	% EMULSIÓN	% ASFALTO RESIDUAL	PESOS (gr)			VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	TEMP. DEL AGUA °C	DENSIDA D BULK (gr/cm <sup>3</sup> )	RESISTENCIA			PESOS DESPUES ENSAYO (gr)			RESISTENCIA CONSERVADA (%)
			AIRE	SSS	AGUA				CARGA (N)	Kg/F	Mpa	PESO DE FALLA	% AGUA ABSORBIDO	PESO CON HUMEDAD	
SECO	13	13,73	8,49	1902,28	1907,50	1096,50	811,00	25	2,346	21050	2146,47	2,596	1902,28	0,00	1096,50
	14			1896,10	1900,80	1094,10	806,70		2,350	21000	2141,37	2,590	1896,10	0,00	1094,10
	15			1899,30	1900,80	1095,30	805,50		2,358	20930	2134,23	2,582	1899,30	0,00	1095,30
<b>2,589</b>															
<b>85,31</b>															
HÚMEDO	16	13,73	8,49	1899,60	1903,90	1100,50	803,40	25	2,364	17880	1823,22	2,205	1930,00	1,58	30,40
	17			1898,30	1900,80	1092,50	808,30		2,349	17940	1829,34	2,213	1926,10	1,44	27,80
	18			1898,95	1905,59	1096,50	809,09		2,347	17910	1826,28	2,209	1928,05	1,51	29,10
<b>2,209</b>															

Evaluación de resistencia en seco, en húmedo y resistencia conservada para 13.73% de emulsión asfáltica CRL-1.

### 5.2.4 Mezcla 15.36% ligante.

Tabla 13

Mezcla 15.36% ligante

BRIQUETA	% EMULSIÓN	% ASFALTO RESIDUAL	PESOS (gr)			VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	TEMP. DEL AGUA °C	DENSIDA D BULK (gr/cm <sup>3</sup> )	RESISTENCIA			PESOS DESPUES ENSAYO (gr)			RESISTENCIA CONSERVADA (%)
			AIRE	SSS	AGUA				CARGA (N)	Kg/F	Mpa	PESO DE FALLA	% AGUA ABSORBIDO	PESO CON HUMEDAD TOTAL	
SECO	19	15,36	9,49	1913,70	1916,20	1111,40	804,80	25	2,378	18170	1852,79	2,241	1913,70	0,00	1111,40
	20			1924,70	1930,70	1114,40	816,30		2,358	18040	1839,54	2,225	1924,70	0,00	1114,40
	21			1916,60	1920,05	1110,95	809,10		2,369	18100	1845,66	2,233	1916,60	0,00	1110,95
<b>2,233</b>															
<b>81,88</b>															
HÚMEDO	22	15,36	9,49	1914,80	1919,30	1110,30	809,00	25	2,367	14850	1514,25	1,832	1940,30	1,31	25,50
	23			1918,40	1920,80	1114,40	806,40		2,379	14820	1511,20	1,828	1942,40	1,24	24,00
	24			1919,20	1923,45	1112,90	810,55		2,368	14800	1509,16	1,826	1941,35	1,14	22,15
<b>1,828</b>															

Evaluación de resistencia en seco, en húmedo y resistencia conservada para 15.36% de emulsión asfáltica CRL-1.

### 5.2.5 Mezcla 16.97% ligante.

Tabla 14

Mezcla 16.97% ligante

BRIQUETA	% EMULSIÓN	% ASFALTO RESIDUAL	PESOS (gr)			VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	TEMP. DEL AGUA °C	DENSIDA D BULK (gr/cm <sup>3</sup> )	RESISTENCIA			PESOS DESPUES ENSAYO (gr)		RESISTENCIA CONSERVADA (%)	
			AIRE	SSS	AGUA				CARGA (N)	Kg/F	Mpa	PESO DE FALLA	% AGUA ABSORBIDO		PESO CON HUMEDAD TOTAL
SECO	19		1932,60	1934,30	1115,90	818,40	25	2,361	16380	1670,27	2,020	1932,60	0,00	1115,90	
	20	16,97	10,49	1941,60	1942,30	1115,70		826,60	2,349	16260	1658,03	2,006	1941,60	0,00	1115,70
	21			1937,10	1938,30	1113,80		824,50	2,349	16300	1662,11	2,011	1937,10	0,00	1113,80
<b>2,012</b>															
<b>72,66</b>															
HÚMEDO	22		1925,30	1944,70	1124,60	820,10	25	2,348	11870	1210,38	1,464	1943,40	0,93	18,10	
	23	16,97	10,49	1926,80	1928,90	1112,10		816,80	2,359	11910	1214,46	1,469	1944,30	0,90	17,50
	24			1926,85	1936,80	1119,85		816,95	2,359	11780	1201,21	1,453	1943,85	0,87	17,00
<b>1,462</b>															

Evaluación de resistencia en seco, en húmedo y resistencia conservada para 16.97% de emulsión asfáltica CRL-1.

### 5.2.6 Verificación del diseño por resistencia.

De los resultados obtenidos anteriormente con diferentes porcentajes de ligante asfáltico se resulta la verificación del diseño por resistencia donde se realizan una serie de gráficas para la obtención del contenido óptimo de emulsión asfáltica.

En la figura 6 se muestra la relación entre el porcentaje de emulsión asfáltica y la resistencia en seco (MPa). La resistencia en seco mínima requerida por la normatividad (INVIAS, 2013) en el artículo 440-10 corresponde a 2.5 MPa cumpliendo en el rango entre 11.50% al 14.0% respecto al contenido de emulsión asfáltica.

En el rango entre 11% y 14% de emulsión la resistencia en seco es superior a la mínima requerida por art. 440-13 INVIAS.

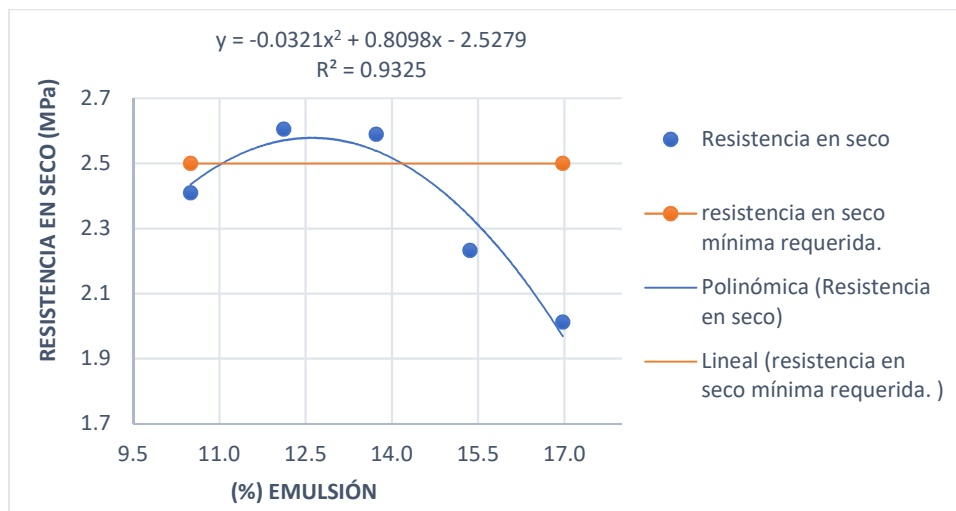


Figura 6. Resistencia en seco vs % emulsión

En la figura 7 se muestra la relación entre el porcentaje de emulsión asfáltica y la resistencia húmeda (MPa). La resistencia húmeda mínima requerida por la normatividad (INVIAS, 2013) en el artículo 440-10 corresponde a 2.0 MPa cumpliendo en el rango entre 11.00% al 15.0% respecto al contenido de emulsión asfáltica.

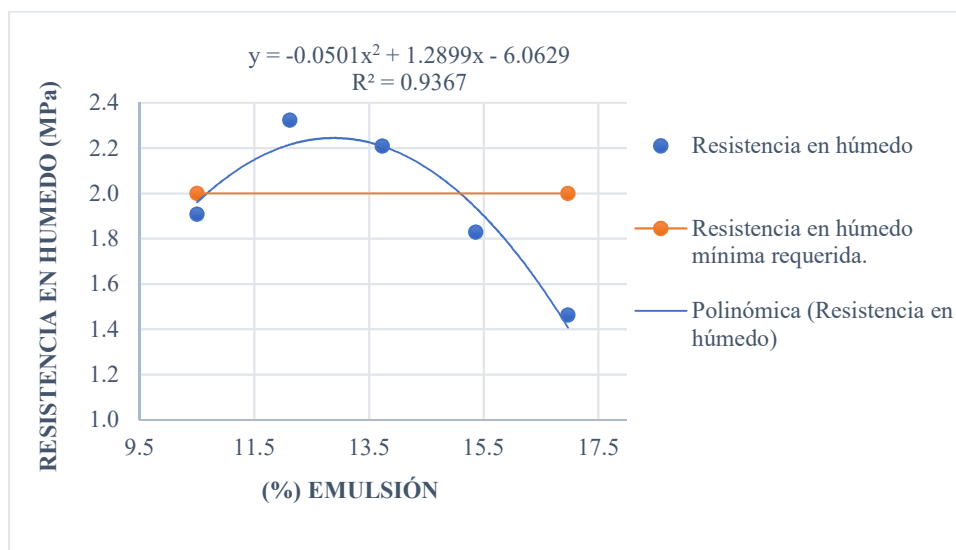


Figura 7. Resistencia en húmedo vs % emulsión

El comportamiento de la resistencia en seco y en húmedo se comporta de acuerdo a lo esperado, siendo inferior la resistencia en seco respecto a la resistencia en húmedo. En la figura 8 se muestra la relación entre el porcentaje de emulsión asfáltica contra la resistencia seca y húmeda. Se muestra

que la resistencia en seco es mayor a la resistencia húmeda, mostrando una susceptibilidad ante la aparición de agua al interior de la mezcla; lo anterior corresponde a lo esperado en la teoría.

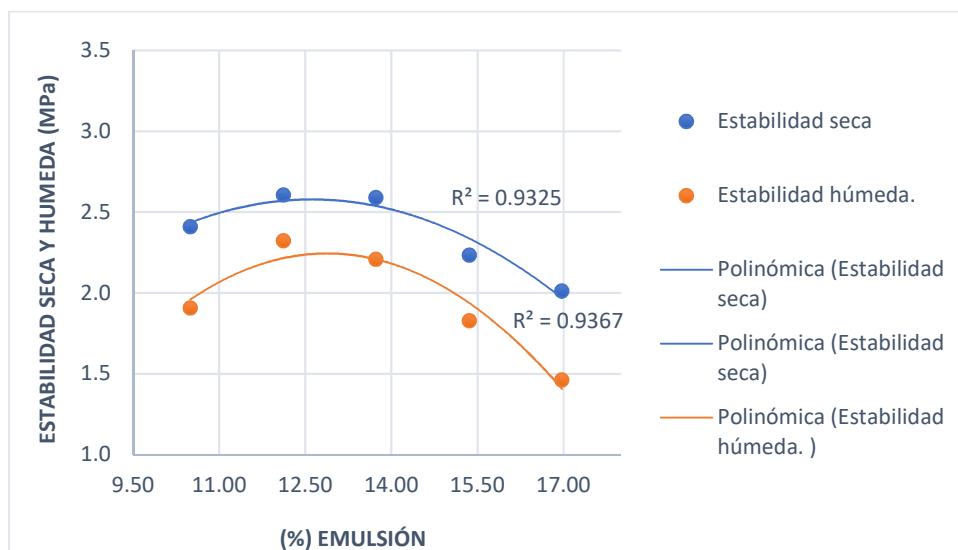


Figura 8. Resistencia en húmedo vs resistencia en seco

En la figura 9 se muestra la relación entre el porcentaje de emulsión asfáltica y la resistencia conservada (Resistencia seca / Resistencia Húmeda). La resistencia conservada mínima requerida por la normatividad (INVIAS, 2013) en el artículo 440-10 corresponde a 75% cumpliendo en el rango entre 11.50% al 14.0% respecto al contenido de emulsión asfáltica.

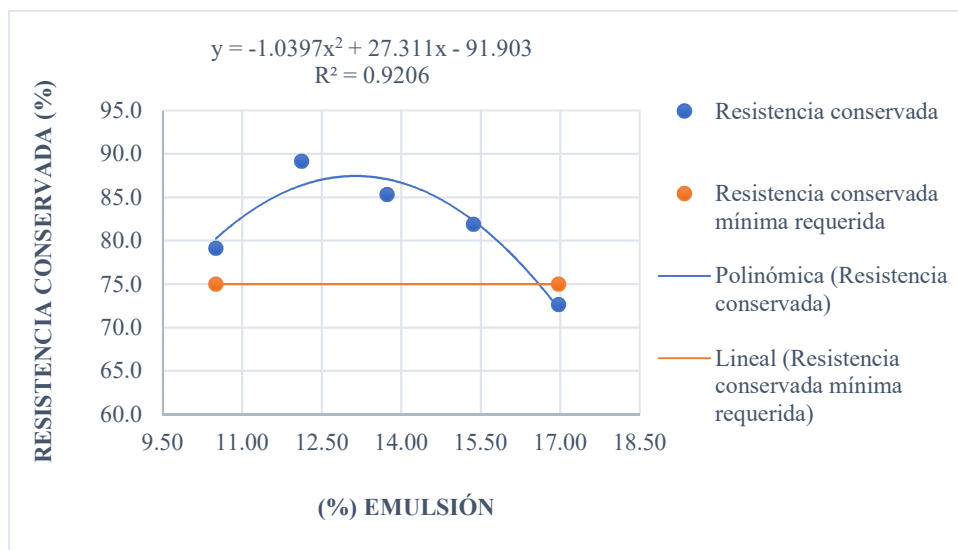


Figura 9. % resistencia conservada vs % emulsión

### 5.2.7 Determinación de la fórmula de trabajo.

En las gráficas de resistencia seca, húmeda y resistencia conservada se muestran la regresión con la cual se expresa el comportamiento de los resultados obtenidos, de acuerdo a con lo anterior se procede a tabular contenidos de emulsión con el fin de mostrar las zonas que presentan comportamiento aceptable para los requisitos establecidos en el procedimiento de comprobación por resistencia, estos datos se muestran a continuación:

Tabla 15  
*Resumen contenido óptimo de emulsión asfáltica*

<b>Óptimo de emulsión (%)</b>	<b>Resistencia seca &gt; 2.50 (MPa)</b>	<b>Resistencia húmeda &gt; 2 (MPa)</b>	<b>Resistencia conservada &gt; 75 (%)</b>
10	2.36	1.83	77.24
10.5	2.44	1.96	80.24
11	2.50	2.06	82.71
11.5	2.54	2.15	84.67
12	2.57	2.20	86.11
12.5	2.58	2.23	87.03
<b>13</b>	<b>2.57</b>	<b>2.24</b>	<b>87.43</b>
13.5	2.55	2.22	87.31
14	2.52	2.18	86.67
14.5	2.47	2.11	85.51
15	2.40	2.01	83.83
15.5	2.31	1.89	81.63
16	2.21	1.75	78.91

De la Tabla 15 se selecciona el contenido óptimo correspondiente al 13% de emulsión asfáltica CRL-1 con un contenido residual de asfalto del 61.80% o 14% con un contenido residual de asfalto del 57.4%, se resalta que En los rangos entre 11.5% y 14% de emulsión se cumple con los criterios de resistencia seca, resistencia húmeda y resistencia conservada. Se selecciona para la mezcla MFD-19 utilizada en el proyecto un óptimo de emulsión correspondiente a 13% con contenido residual del 61.80%.

## 6. Desempeño de la mezcla con adición de cemento

Con el porcentaje óptimo de emulsión obtenido en el diseño sin adición de cemento, se inició la adición de cemento hidráulico Argos de uso común, con contenidos 1, 2, 3, 4% con respecto al peso del agregado pétreo, sin realizar reemplazo del llenante mineral.

### 6.1 Matriz experimental

Tabla 16

*Matriz experimental ensayo a fatiga*

Vigas	Contenido de cemento MDF-19				
	0%	1%	2%	3%	4%
1	$\mu\epsilon 7$	$\mu\epsilon 5$	$\mu\epsilon 4$	$\mu\epsilon 2$	$\mu\epsilon 1$
2	$\mu\epsilon 5$	$\mu\epsilon 9$	$\mu\epsilon 6$	$\mu\epsilon 5$	$\mu\epsilon 4$
3	$\mu\epsilon 10$	$\mu\epsilon 10$	$\mu\epsilon 8$	$\mu\epsilon 8$	$\mu\epsilon 7$
4	$\mu\epsilon 12$	$\mu\epsilon 12$	$\mu\epsilon 10$	$\mu\epsilon 11$	$\mu\epsilon 11$
5	$\mu\epsilon 7$	$\mu\epsilon 5$	$\mu\epsilon 4$	$\mu\epsilon 2$	$\mu\epsilon 1$
6	$\mu\epsilon 5$	$\mu\epsilon 9$	$\mu\epsilon 6$	$\mu\epsilon 5$	$\mu\epsilon 4$
7	$\mu\epsilon 10$	$\mu\epsilon 10$	$\mu\epsilon 8$	$\mu\epsilon 8$	$\mu\epsilon 7$
8	$\mu\epsilon 12$	$\mu\epsilon 12$	$\mu\epsilon 10$	$\mu\epsilon 11$	$\mu\epsilon 11$
9	$\mu\epsilon 7$	$\mu\epsilon 5$	$\mu\epsilon 4$	$\mu\epsilon 2$	$\mu\epsilon 1$
10	$\mu\epsilon 5$	$\mu\epsilon 9$	$\mu\epsilon 6$	$\mu\epsilon 5$	$\mu\epsilon 4$
11	$\mu\epsilon 10$	$\mu\epsilon 10$	$\mu\epsilon 8$	$\mu\epsilon 8$	$\mu\epsilon 7$
12	$\mu\epsilon 12$	$\mu\epsilon 12$	$\mu\epsilon 10$	$\mu\epsilon 11$	$\mu\epsilon 11$

Nota: Deformación  $\mu\epsilon 1=50 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 2= 80 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 3= 105 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 4= 110 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 5= 135 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 6= 140 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 7=150 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 8= 160 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 9= 175 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 10= 200 \mu\text{m}$ ;  $\mu\epsilon 11= 225 \mu\text{m}$  y  $\mu\epsilon 12= 250 \mu\text{m}$

Para cada contenido de cemento se elaboraron 12 vigas, las cuales se ensayaron a diferentes deformaciones de acuerdo con lo enunciado en la tabla 17.

Tabla 17

*Matriz experimental ensayo deformación plástica*

Fin del ensayo		Contenido de cemento MDF-19				
Hasta	Deformación máx.	0%	1%	2%	3%	4%
20.000 pasadas	12,7 mm	M1; M2	M1; M2	M1; M2	M1; M2	M1; M2

Nota: Muestra 1= M1; Muestra 2 = M2

Para cada porcentaje de cemento adicionado se elaboraron dos muestras, las cuales fueron sometidas al ensayo de rueda de Hamburgo hasta llegar a las 20.000 pasadas de donde se obtuvieron las deformaciones máximas para cada muestra.

Tabla 18  
*Matriz experimental ensayo modulo dinámico*

Temperatura (°C)	Contenido de cemento MDF-19				
	0%	1%	2%	3%	4%
-10	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;
	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;
	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5
4,4	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;
	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;
	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5
21,1	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;
	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;
	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5
37,7	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;
	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;
	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5
54,4	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;	H <sub>z</sub> 1; H <sub>z</sub> 2;
	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;	H <sub>z</sub> 3; H <sub>z</sub> 4;
	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5	H <sub>z</sub> 5

Nota: Frecuencia H<sub>z</sub>1= 0,1; H<sub>z</sub>2= 0,5; H<sub>z</sub>3= 1; H<sub>z</sub>4=5; H<sub>z</sub>5= 10; H<sub>z</sub>6= 25

Para cada porcentaje de cemento adicionado se elaboraron tres muestras y se ensayaron con un barrido de frecuencia y temperatura como se muestra en la tabla 18.

## 6.2 Resultados ensayos a fatiga

El ensayo de vida a la Fatiga de Mezclas Asfálticas sometidas a la Viga de Flexión en cuatro puntos AASHTO T321-14, el procedimiento utilizado la determinación de la vida a fatiga se entiende como la capacidad de almacenamiento de energía antes de que presente el fallo considerado en el momento de pérdida de su capacidad a la mitad de la inicial.

Para el ensayo de fatiga se utilizó una frecuencia aplicación de cargas correspondiente a 10Hz, temperatura de acondicionamiento y ensayo de 20°C. Las deformaciones controladas se realizaron de acuerdo con el contenido de cemento para cumplir con los requisitos de 1'0000.000



de repeticiones en al menos una muestra por cada contenido de cemento. Cabe resaltar que las frecuencias de aplicación de cargas pueden presentar variaciones en el desempeño a fatiga y puede ser interesante en futuras investigaciones realizar pruebas a diferentes frecuencias. En el caso particular de la presente investigación debido a la frecuencia del equipo disponible en laboratorio se trabajó con una frecuencia de 10 Hz.

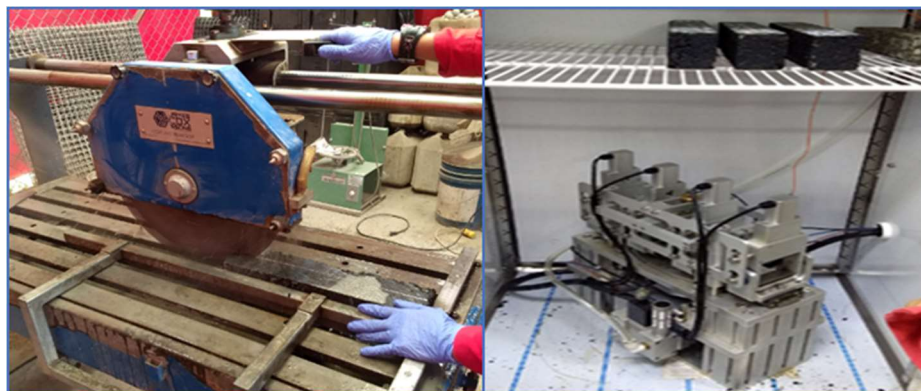


Figura 10. Equipo fatiga viga en cuatro puntos y corte de vigas para ensayo de fatiga

### 6.2.1. Ensayo de fatiga con proporción de cemento 0%.

Tabla 19

Resultados ensayo de fatiga MDF-19 adición cemento 0%

Viga	Módulo inicial (MPa)	Ciclos de falla	Microstrain	Energía disipada acumulada (J/m <sup>3</sup> )
1	3238	1,425,000	105	47053
2	4480	464,109	135	29477
3	5606	160,869	200	29053
4	2459	67,848	250	12875
5	5672	1,399,500	105	82960
6	3897	468,198	135	36721
7	3585	168,724	200	21165
8	3553	62,514	250	7068
9	3000	1,561,250	105	199684
10	2869	430,610	135	87130
11	2906	168,000	200	22052
12	2474	76,463	250	11006

Sin adición de cemento hidráulico realiza el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos con resultados de ciclos de falla de acuerdo con la deformación de 105, 135, 200 y 250  $\mu\text{m}$ .

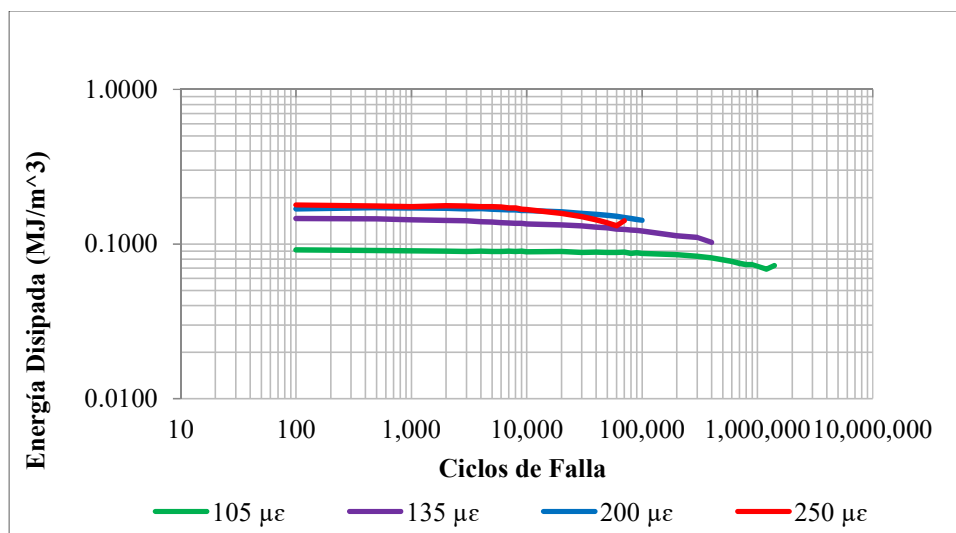


Figura 11. Energía disipada vs ciclos de carga

Energía disipada vs ciclos de carga MDF-19 + Cemento 0%. Se mantiene disipación de energía hasta la falla.

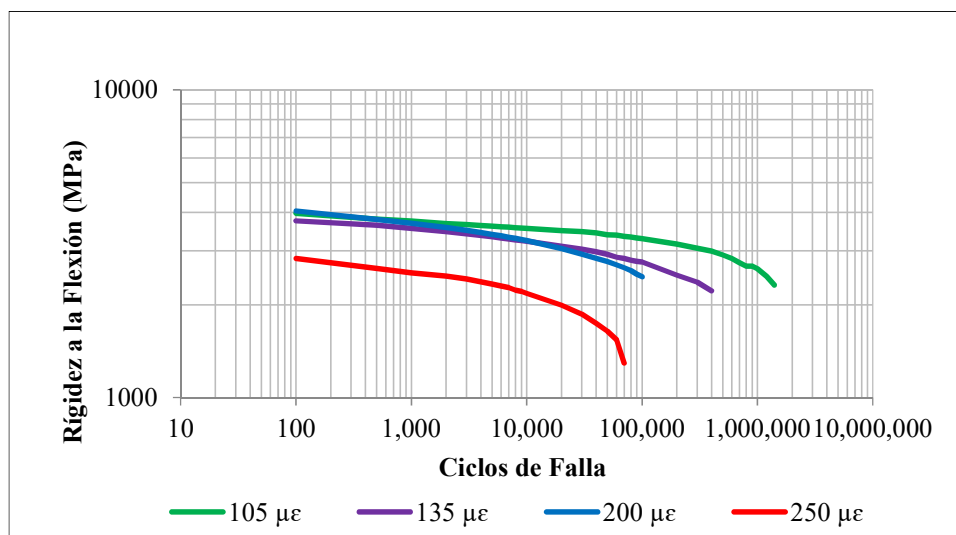


Figura 12. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga

MDF-19 + Cemento 0%. La rigidez disminuye al aumentar los ciclos de carga, en la deformación de 250  $\mu\text{m}$  la falla se presentó antes de las 80.000 repeticiones.

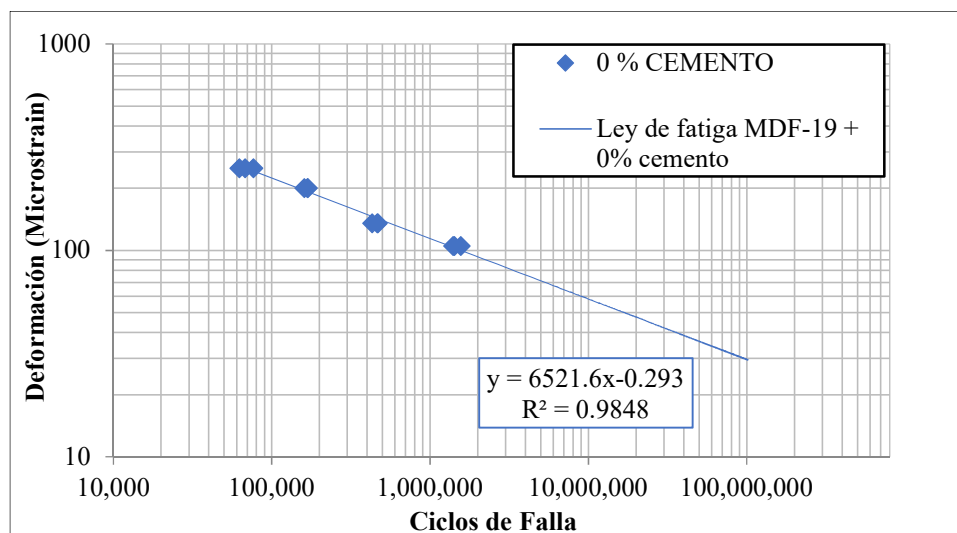


Figura 13. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 0%

Los resultados obtenidos se grafica la ley de fatiga y sirven como control al estado sin adiciones.

### 6.2.2 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 1%.

Tabla 20

Resultados ensayo de fatiga MDF-19 adición cemento 1%

Viga	Módulo inicial (MPa)	Ciclos de falla	Microstrain	Energía disipada acumulada (J/m <sup>3</sup> )
1	3288	1,110,785	135	92710
2	4025	360,302	175	47940
3	2946	140,243	200	11471
4	3581	55,500	250	4116
5	3594	1,144,978	135	69503
6	686	335,928	175	2576
7	2835	140,567	200	15249
8	5058	57,839	250	28895
9	2907	1,135,500	135	207175
10	4335	342,241	175	26040
11	3764	140,144	200	22565
12	2637	58,969	250	11498

Con adición de cemento hidráulico del 1% realiza el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos con resultados de ciclos de falla de acuerdo con la deformación de 135, 175, 200 y 250  $\mu\text{m}$ .

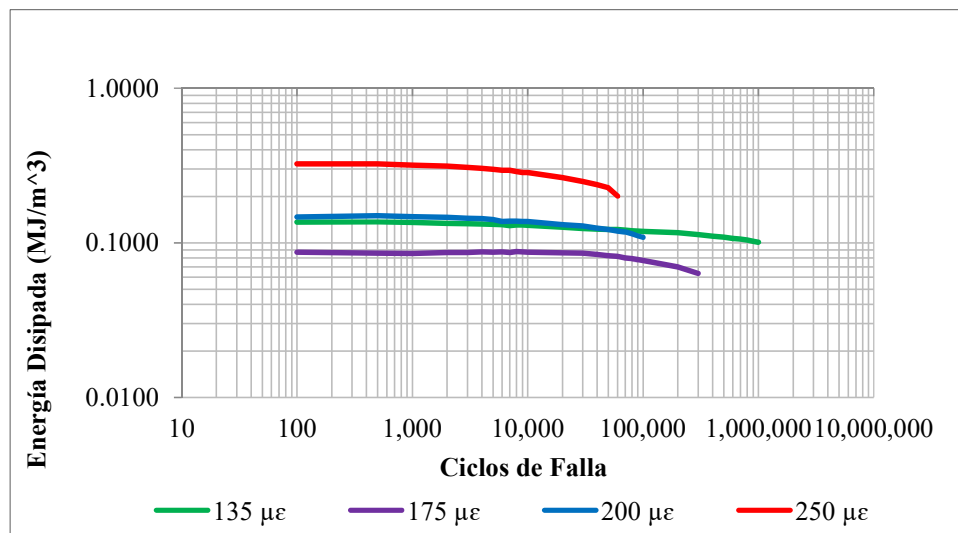


Figura 14. Energía disipada vs ciclos de carga

MDF-19 + Cemento 1%. Se mantiene disipación de energía hasta la falla.

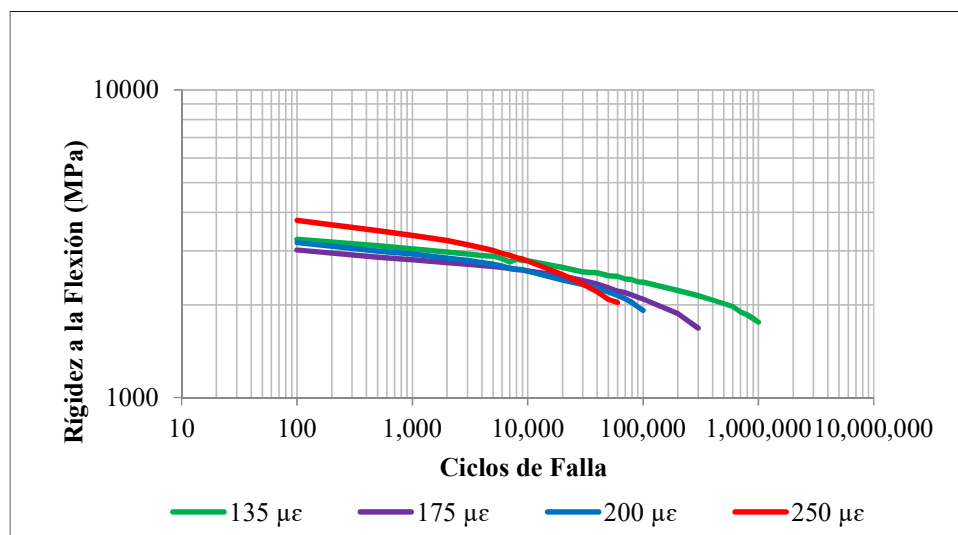


Figura 15. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga

MDF-19 + Cemento 1%. La rigidez disminuye al aumentar los ciclos de carga con comportamientos cercanos para diferentes deformaciones en bajos ciclos.

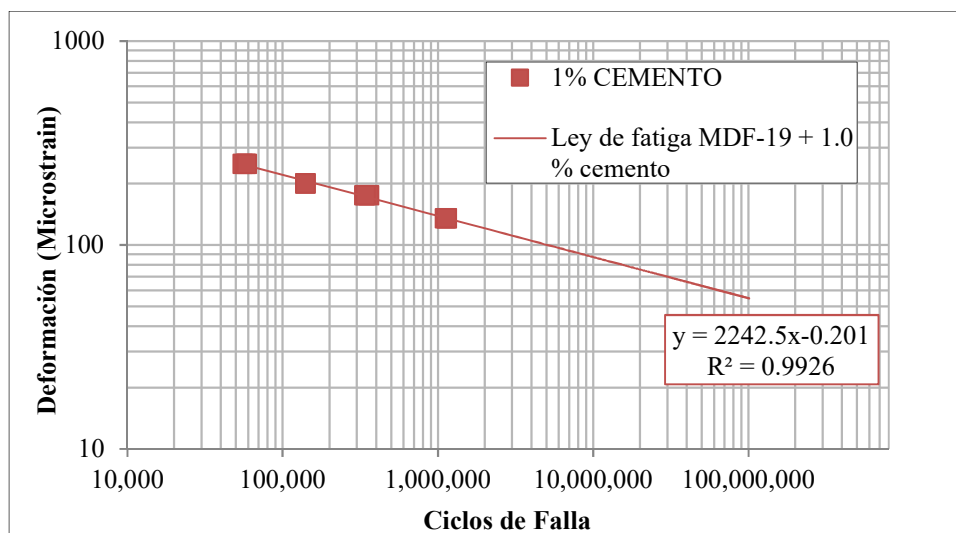


Figura 16. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 1%.

Los resultados obtenidos se grafica la ley de fatiga, se observa una tendencia lineal en escala logarítmica con una pendiente suave.

### 6.2.3 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 2%.

Tabla 21

Ensayo de fatiga con proporción de cemento 2%

Viga	Módulo inicial (MPa)	Ciclos de falla	Microstrain	Energía disipada acumulada (J/m <sup>3</sup> )
1	4159	1,113,000	110	53813
2	3117	343,500	140	88956
3	5687	146,500	160	15047
4	4982	56,235	200	19320
5	4466	1,147,522	110	70524
6	2940	316,703	140	15194
7	2850	141,495	160	12181
8	4456	54,693	200	13730
9	4567	1,170,272	110	53613
10	3676	321,000	140	17925
11	683	136,007	160	1681
12	3303	50,742	200	2848

Con adición de cemento hidráulico del 2% realiza el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos con resultados de ciclos de falla de acuerdo a la deformación de 110, 140, 160 y 200  $\mu\text{m}$

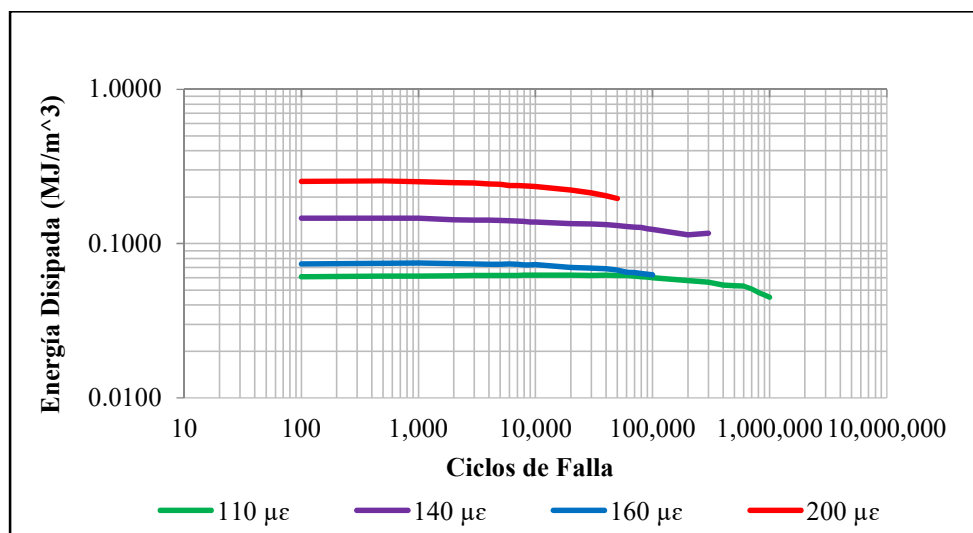


Figura 17. Energía disipada vs ciclos de carga

MDF-19 + Cemento 2% Se mantiene disipación de energía hasta la falla

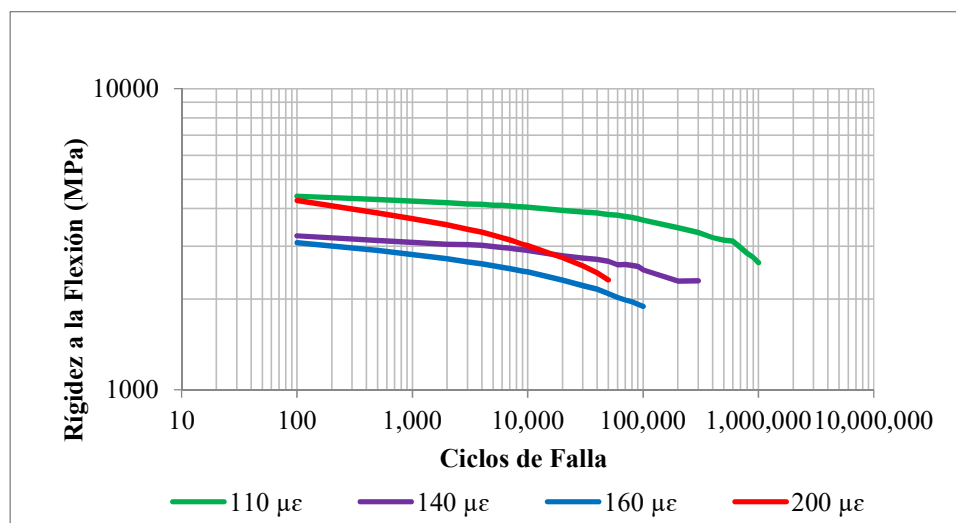


Figura 18. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga

MDF-19 + Cemento 2%. La rigidez disminuye al aumentar los ciclos de carga, es necesario disminuir la deformación aplicada para obtener las muestras que requieren el millón de ciclos

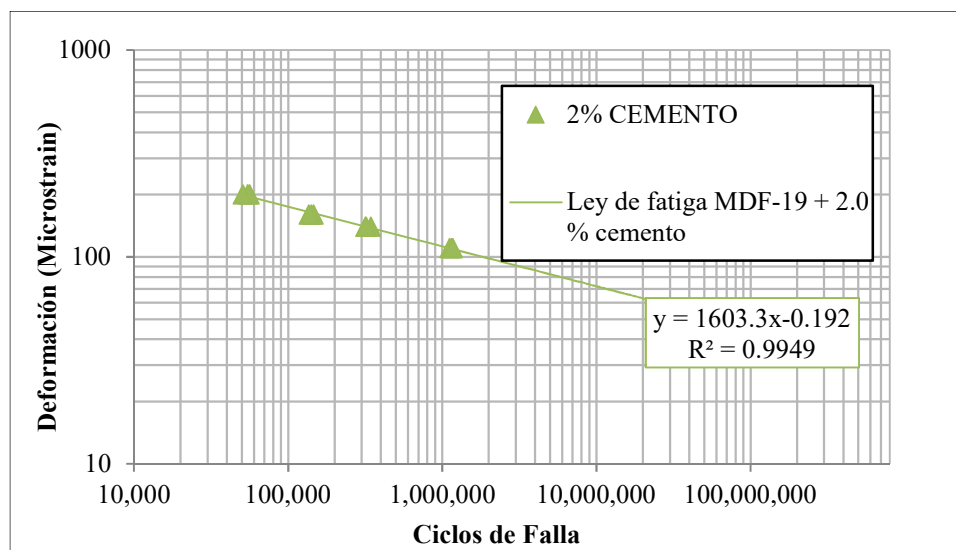


Figura 19. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 2%

Los resultados obtenidos se grafica la ley de fatiga, se observa una tendencia lineal en escala logarítmica con una pendiente suave.

#### 6.2.4 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 3%.

Tabla 22 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 3%

Viga	Módulo inicial (MPa)	Ciclos de falla	Microstrain	Energía disipada acumulada (J/m <sup>3</sup> )
1	3151	1,048,688	80	149251
2	2878	251,159	135	24384
3	2966	114,783	160	24196
4	3194	48,840	225	6985
5	3002	1,068,500	80	70844
6	2878	251,159	135	24384
7	3042	106,500	160	33529
8	3819	40,557	225	7775
9	3562	1,055,000	80	63984
10	3593	291,363	135	24142
11	5117	116,539	160	11879
12	1558	49,469	225	1230

Con adición de cemento hidráulico del 3% realiza el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos con resultados de ciclos de falla de acuerdo a con la deformación de 80, 135, 160 y 225  $\mu\text{m}$ .

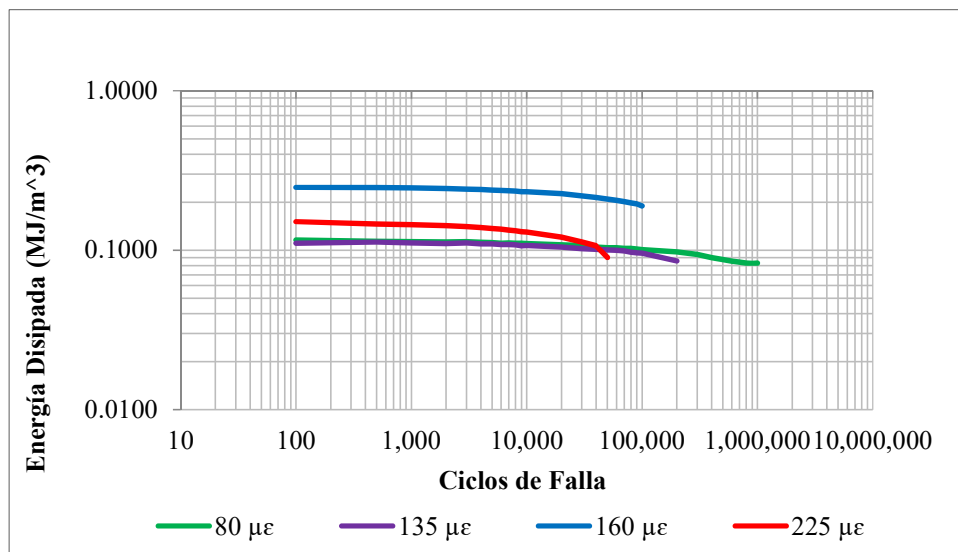


Figura 20. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 2%

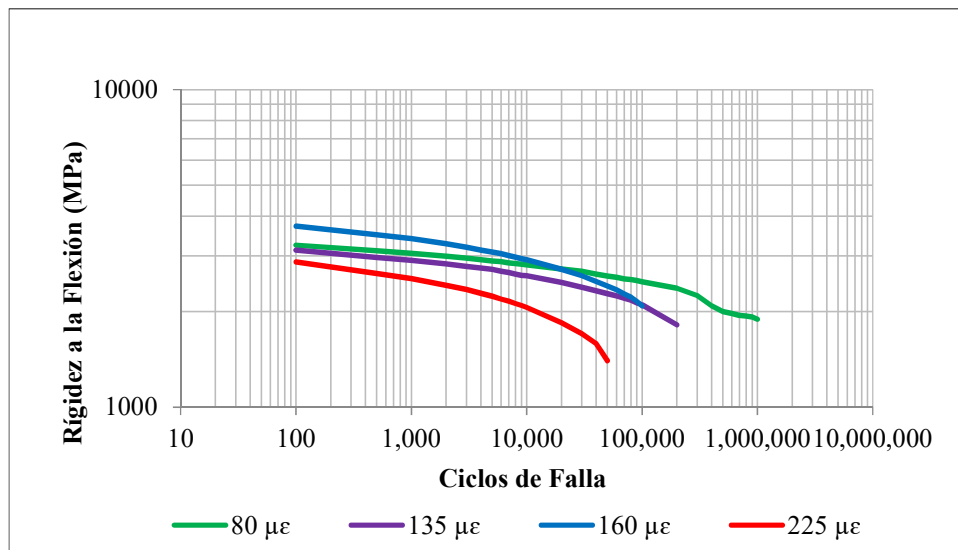


Figura 21. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga

MDF-19 + Cemento 3%. La rigidez disminuye al aumentar los ciclos de carga valores mayores de deformación presentan ruptura con menor cantidad de ciclos.



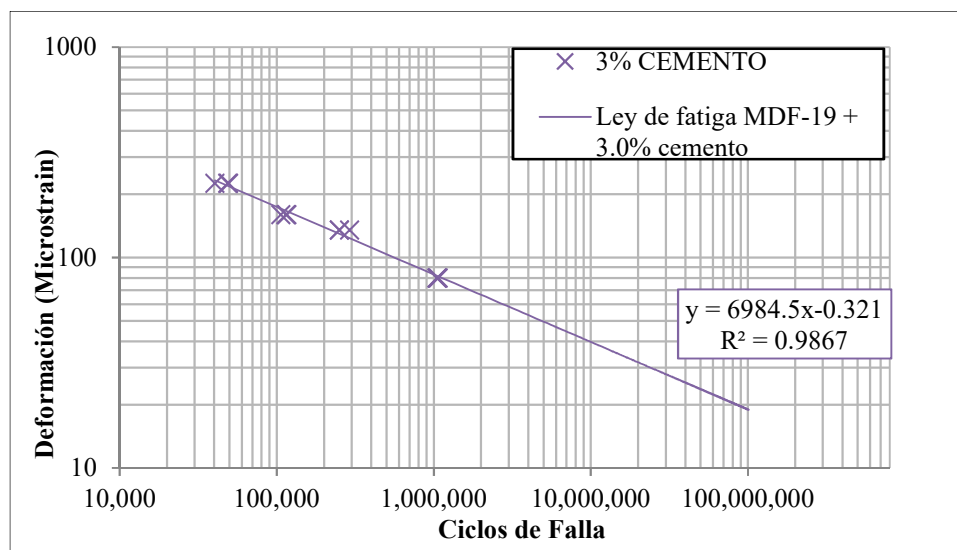


Figura 22. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 3%

Los resultados obtenidos se grafica la ley de fatiga, se observa una tendencia lineal en escala logarítmica con una pendiente pronunciada.

### 6.2.5 Ensayo de fatiga con proporción de cemento 4%.

Tabla 23

Ensayo de fatiga con proporción de cemento 4%

Viga	Módulo inicial (MPa)	Ciclos de falla	Microstrain	Energía disipada acumulada (J/m <sup>3</sup> )
1	3180	1,003,000	50	55575
2	3700	241,363	110	13942
3	2838	103,846	150	20361
4	3329	33,311	225	5382
5	5850	1,006,000	50	111019
6	3304	241,170	110	8476
7	2827	91,869	150	20532
8	217	34,107	225	185
9	3733	1,021,578	50	155702
10	3117	245,604	110	33723
11	2534	96,338	150	15425
12	2757	29,820	225	9000

Con adición de cemento hidráulico del 4% realiza el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos con resultados de ciclos de falla de acuerdo con la deformación de 50, 110, 150 y 225  $\mu\text{m}$ .

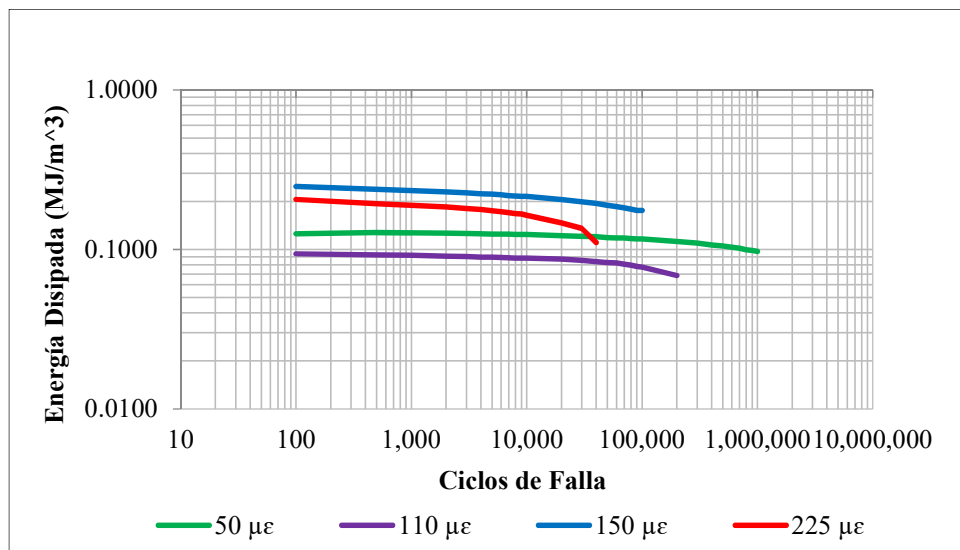


Figura 23. Energía disipada vs ciclos de carga

Energía disipada vs ciclos de carga MDF-19 + Cemento 4%. Se mantiene disipación de energía hasta la falla

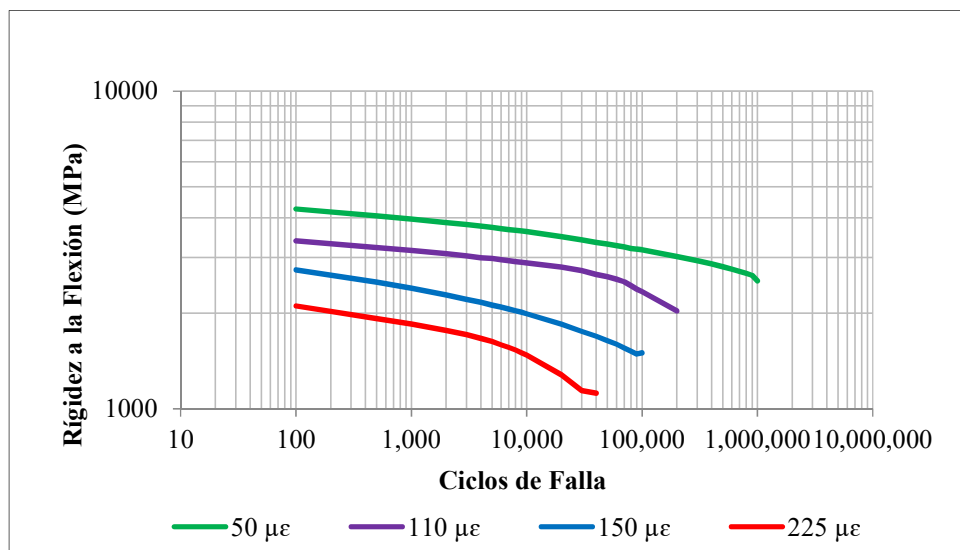


Figura 24. Rigidez a la flexión vs ciclos de carga MDF-19 + Cemento 4%.

La rigidez disminuye al aumentar los ciclos de carga, no se tiene intersección de rigidez y ciclos de carga marcando una característica de un material con características rígidas

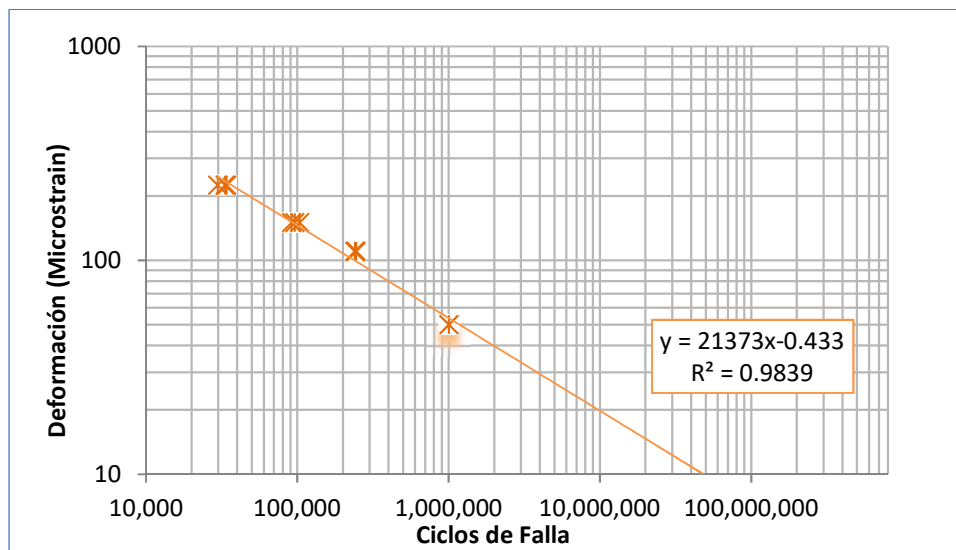


Figura 25. Ley de fatiga MDF-19 + Cemento 4%

Con los resultados obtenidos se grafica la ley de fatiga, se observa una tendencia lineal en escala logarítmica con una pendiente pronunciada.

### 6.2.6 Análisis resultados ensayo a fatiga.

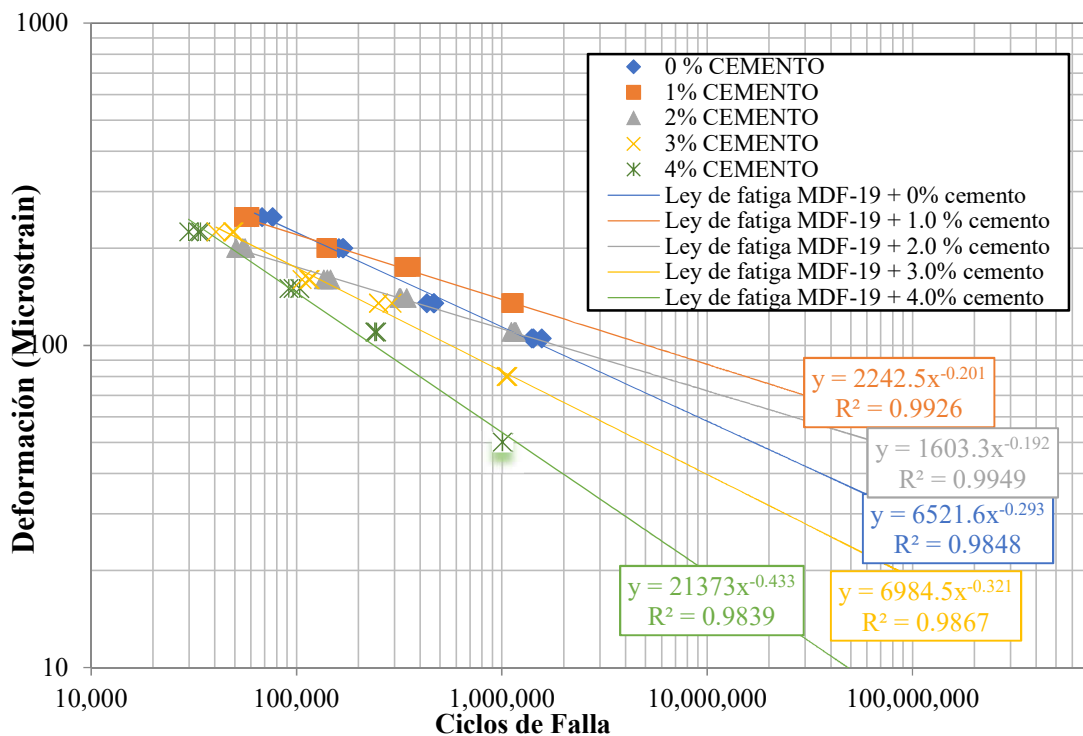


Figura 26. Ley de fatiga MDF-19 con diferentes contenidos de cemento.

Las ecuaciones relacionadas a las leyes de fatiga de la mezcla adicionada con diferentes contenidos de cemento muestran mejor comportamiento en adiciones entre el 0% y el 2%, mayores adiciones afectan el comportamiento a fatiga y es mostrado al presentar mayor pendiente. En la gráfica anterior se muestran las diferentes leyes de fatiga para la mezcla MDF-19 con adición de cemento hidráulico iniciando con 0% y variando cada 1% hasta 4%.

La mezcla MDF-19 sin adición de cemento identificada con color azul presenta el comportamiento de referencia y las otras dosificaciones muestran la modificación debido a la adición de cemento hidráulico en sus diferentes dosificaciones.

En el análisis del efecto en fatiga para la MDF-19 con adición de cemento hidráulico se buscó identificar la zona en la cual el efecto aglomerante del cemento causa rigidización de la mezcla generando una pérdida en la capacidad de la mezcla para soportar efectos de fatiga.

La adición en cemento entre 0% y 1% corresponden a zonas de ganancia para la resistencia a la fatiga, entre 1% y 2% zonas de fluctuación, en las cuales de acuerdo con la deformación requerida en el diseño de pavimento puede mejorar o perjudicar la resistencia a fatiga y finalmente zonas con contenidos superiores al 3% en donde la adición rigidiza la mezcla disminuyendo la capacidad a soportar el desempeño a fatiga.

Con el objetivo de mostrar gráficamente los resultados obtenidos en las curvas de tendencia se realizó la Figura 27, en la que se muestra la relación entre el contenido de cemento hidráulico con los ciclos de falla en la fatiga obtenidos en laboratorio.

Las deformaciones bajas muestran con mayor claridad el efecto producido por la adición de cemento hidráulico. Como se muestra en la Figura 27 se observa un mejor comportamiento en contenido de cemento del 1% en adición de cemento hidráulico para las diferentes deformaciones tabuladas a partir de la regresión exponencial de los datos obtenidos.

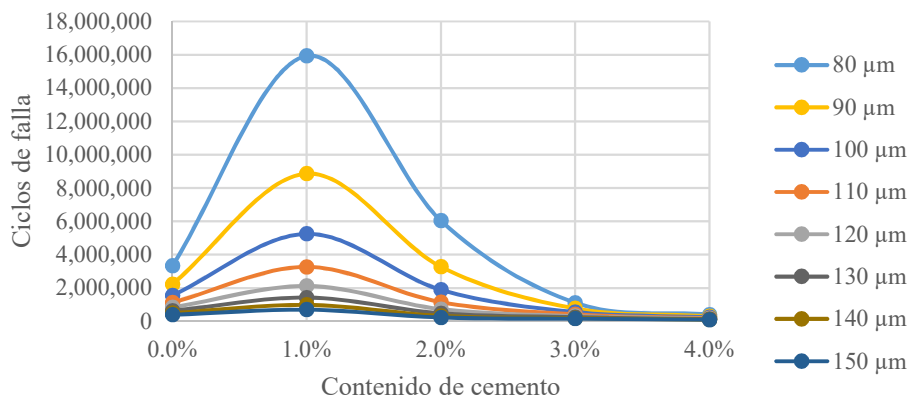


Figura 27. Contenido de cemento vs ciclos de falla

### 6.3 Ensayos deformación plástica

Método estándar ensayo de pista para rueda de Hamburgo en inmersión para mezclas asfálticas compactadas (AASHTO T324-17), para el caso particular se usó una variación respecto a la ausencia de inmersión de la muestra y temperatura del ensayo, la cual fue realizada a una temperatura de 22°C.

#### 6.3.1. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 0%.

En la figura 28 se observa desplazamiento de las partículas y acumulación en la deformación de forma gradual y afectando las zonas laterales de donde pasa la carga causando desprendimiento.



Figura 28. Muestras antes y después del ensayo deformación plástica Cemento 0%

La terminación del ensayo fue dada por el paso de 20000 pasadas al finalizar se encontró con una deformación acumulada de 4.59 y 3.89 mm, las velocidades promedio de acumulación entre los 105 minutos (5628 pasadas) y 120 minutos (6432 pasadas) corresponde a 13.17  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

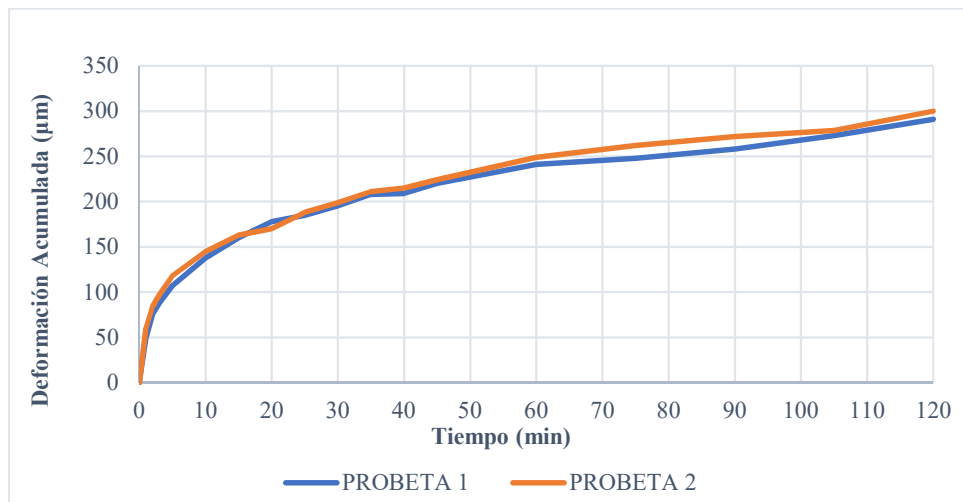


Figura 29. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 0%,

### 6.3.2. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 1%.

Con el contenido correspondiente al 1% de cemento se observa un perfil similar en el recorrido de la carga y las zonas laterales no presentan afectaciones fuertes como se muestra en la Figura 30.

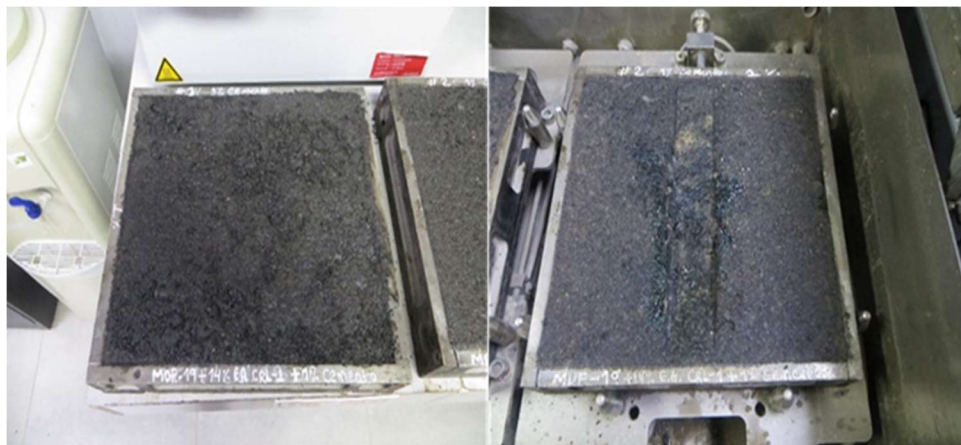


Figura 30. Muestras antes y después del ensayo deformación plástica Cemento 1%

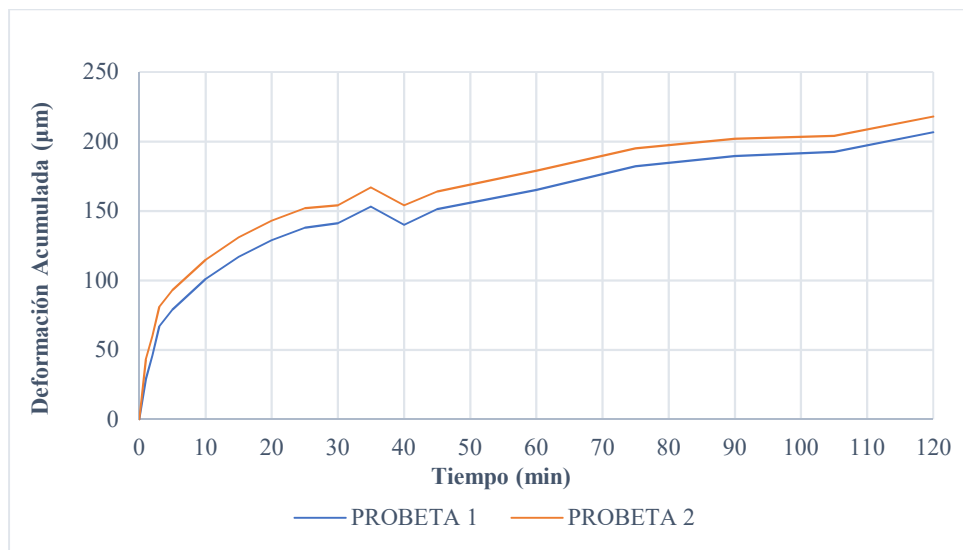


Figura 31. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 1%,

La terminación del ensayo fue dada por el paso de 20000 pasos al finalizar se encontró con una deformación acumulada de 2.76 y 2.90 mm, las velocidades promedio de acumulación entre los 105 minutos (5628 pasadas) y 120 minutos (6432 pasadas) corresponde a  $9.40 \mu\text{m}/\text{min}$ .

### 6.3.3. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 2%.

Las muestras fabricadas con la adición del 2% de cemento presentaron en la superficie una coloración marrón en la superficie, pero al ser puestas bajo cargas se observó la aparición del color negro característico del asfalto.



Figura 32. Muestras antes y después del ensayo deformación plástica Cemento 2%

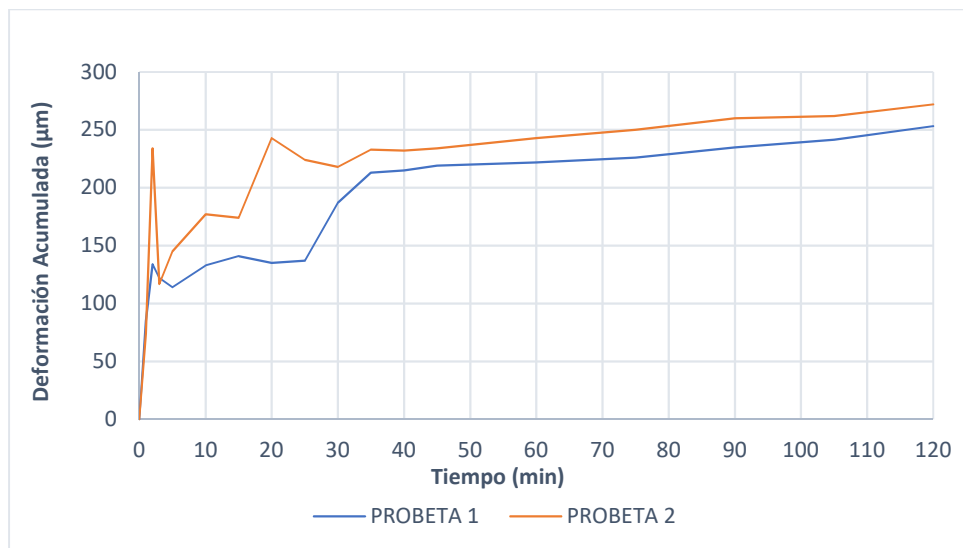


Figura 33. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 2%,

Se observan en los primeros 35 minutos (1876 pasadas) del ensayo se presentaron diferencias significativas entre las muestras ensayadas con picos que no concuerdan con la idealidad del ensayo, posterior a este tiempo el comportamiento presentado se asemeja a una tendencia lineal con velocidad de deformación promedio entre los 105 minutos (5628 pasadas) y 120 minutos (6432 pasadas) corresponde a  $7.24 \mu\text{m}/\text{min}$  y una deformación máxima a los 20000 ciclos de 2.80 y 2.84 mm.

#### 6.3.4. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 3%.

Las muestras elaboradas con adición del 3% de cemento presentaron características similares entre ellas, la huella dejada por la rueda de carga muestra tonalidades grises y negras.

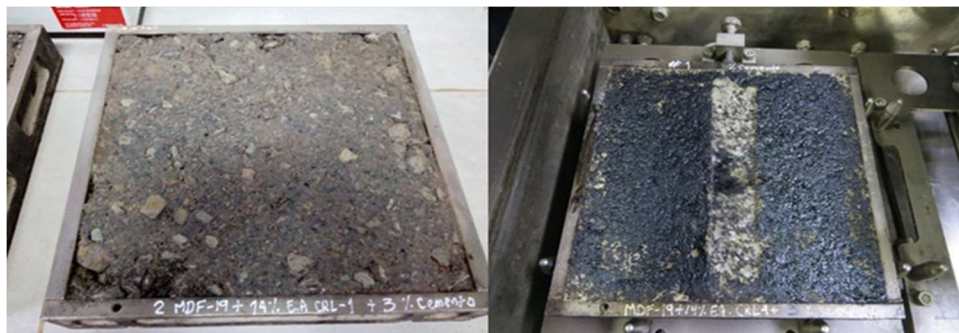


Figura 34. Muestras antes y después del ensayo deformación plástica Cemento 3%



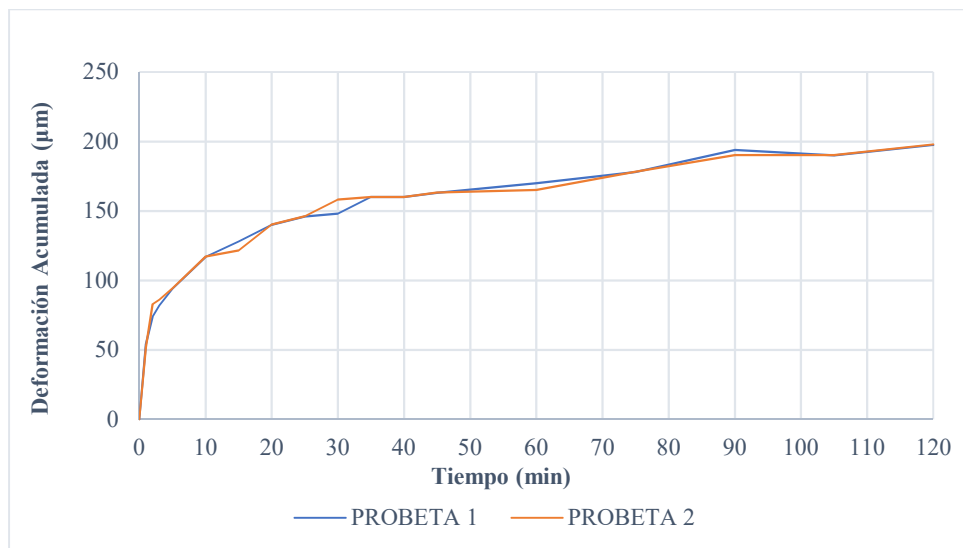


Figura 35. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 3%.

Las muestras ensayadas presentan poca variación entre ellas, el final del ensayo fue dado por el paso de 20000 ciclos con una deformación acumulada de 2.22 y 2.25 mm, las velocidades promedio de acumulación entre los 105 minutos (5628 pasadas) y 120 minutos (6432 pasadas) corresponde a 5.06  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

### 6.3.5. Ensayo deformación plástica MDF-19 + EA CRL-1 + cemento 4%.

En las muestras elaboradas y ensayadas con adición de cemento correspondientes al 4% de cemento se observaron en la zona de carga manchas color gris, posiblemente provenientes del rompimiento de los agregados.



Figura 36. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 4%.

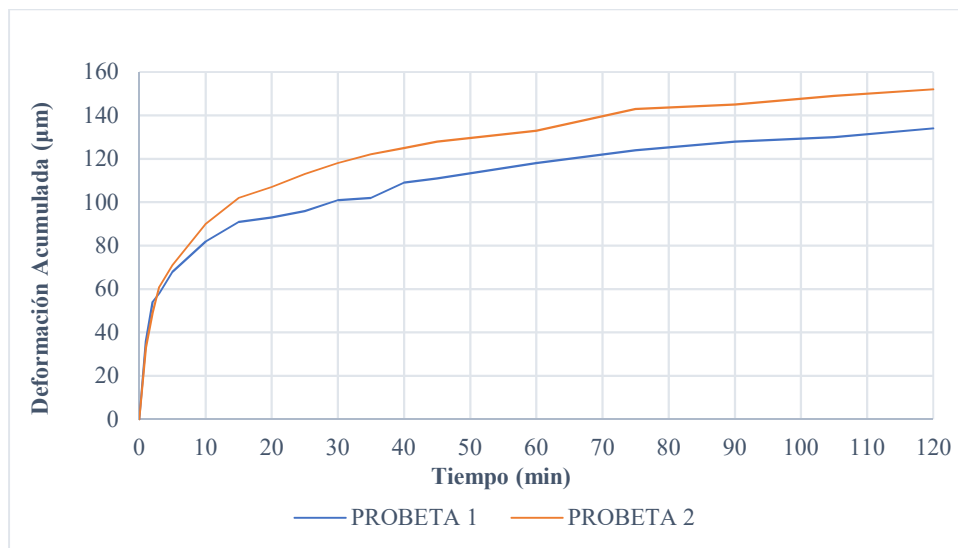


Figura 37. Gráfica deformación plástica MDF-19 + Cemento 4%.

La terminación del ensayo fue dada por 20000 pasadas; al finalizar se encontró con una deformación acumulada de 1.84 y 2.16 mm, las velocidades promedio de acumulación entre los 105 minutos (5628 pasadas) y 120 minutos (6432 pasadas) corresponde a 2.33 µm/min, ver Figura 37. Deformación plástica. En los primeros minutos del ensayo (etapa de acomodación de las partículas) se presentó una variación entre las lecturas de deformación, pero al avanzar el ensayo las velocidades presentan tendencia similar.

### 6.3.6 Análisis resultados deformación plástica.

En el ensayo de deformación plástica se realizaron una serie de modificaciones a las condiciones establecidas en la AASHTO T324-17, estas modificaciones corresponden a la variación del acondicionamiento de 60°C a 22°C.

En la gráfica 38 se puede evidenciar que el contenido de cemento hidráulico presenta una mejor resistencia frente a la deformación plástica y la muestra que presenta menor resistencia corresponde a la que no se le adiciona cemento hidráulico.

El incremento en el contenido de cemento hidráulico en contenidos altos aumenta considerablemente el desempeño de la MDF-19 con adición de cemento debido al efecto de rigidización.

Las muestras con contenido de cemento correspondiente al 2% presentaron deformaciones superiores a las esperadas teóricamente, también se observaron registros de dispersiones elevadas en el inicio del ensayo siendo probablemente la causa de presentar los valores registrados.

Al analizar los valores totales de deformación llevados a los 20.000 ciclos se presentaron promediando las muestras 4.24mm, 2.83mm, 2.82mm, 2.24mm y 2.0mm correspondientes a 0%, 1%, 2%, 3% y 4% respectivamente. De lo anterior se muestra incluyendo la variación de datos que se presentaron con el 2% de adición una tendencia a disminuir la susceptibilidad a la deformación plástica al realizar mayores adiciones de cemento hidráulico.

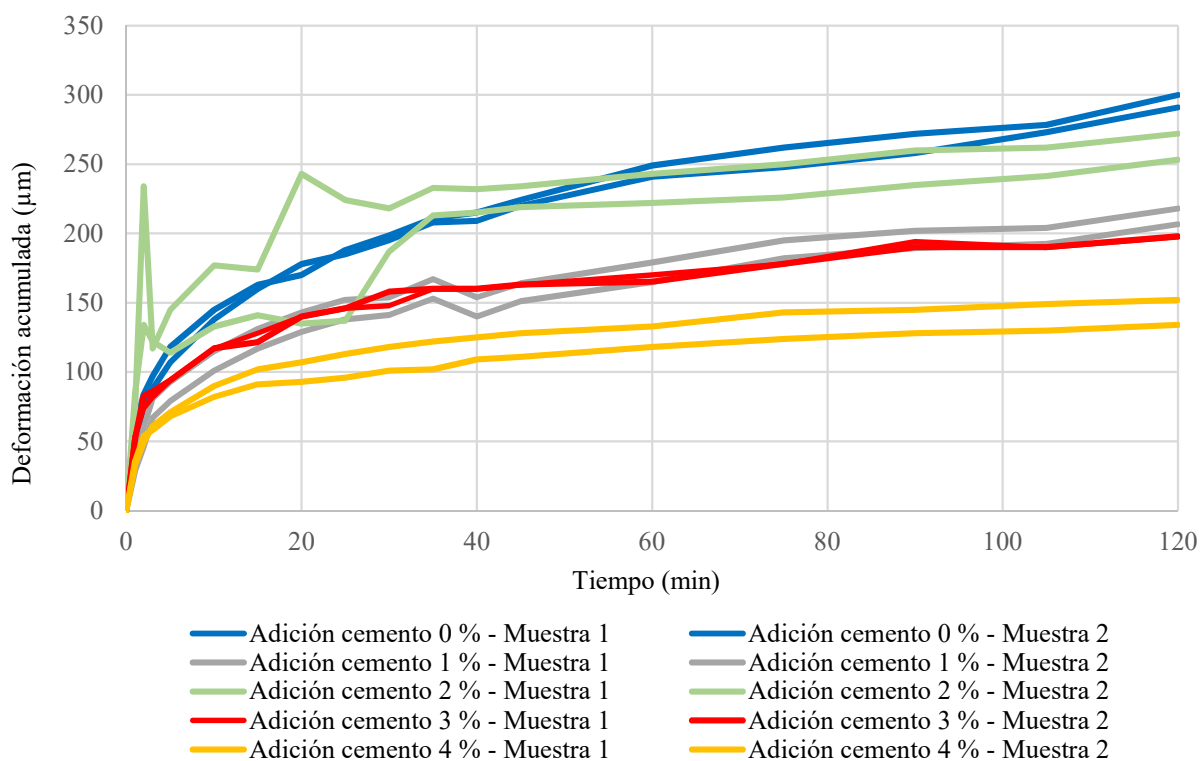


Figura 38. Gráfica deformación plástica MDF-19 + adición de cemento vs Tiempo (min)

## 6.4 Resultados ensayos modulo dinámico

Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas AASHTO T342-11, El método de prueba mencionado anteriormente sirve para construir las curvas maestras utilizadas en la determinación del módulo de diseño de acuerdo con las variaciones de temperatura y aplicación de cargas.

### 6.4.1 Ensayo modulo dinámico con proporción de cemento 0%.

Se puede apreciar que todas las temperaturas ensayadas se presentan un crecimiento del módulo a medida que disminuye la temperatura. También ocurre un crecimiento en el módulo a medida que aumenta la frecuencia.

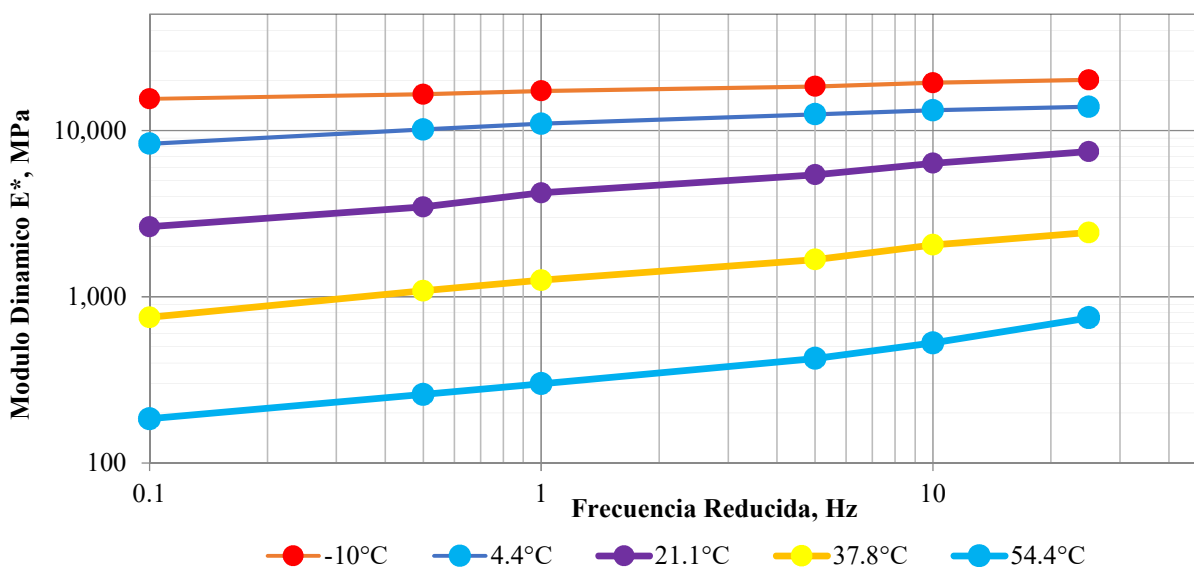


Figura 39. Módulo dinámico sin adición de Cemento 0%, a temperaturas del ensayo, -10, 4.4, 21.1, 37.8 y 54.4°C.

### 6.4.2 Ensayo modulo dinámico con proporción de cemento 1%.

De acuerdo con la gráfica 40 se observa un comportamiento similar al presentado en la mezcla sin adición respecto al incremento del módulo a medida que disminuye la temperatura y aumenta la frecuencia. Se puede apreciar la adición del 1% de cemento que a temperaturas de 4.4°C e inferiores el módulo disminuye levemente respecto al caso sin adición.

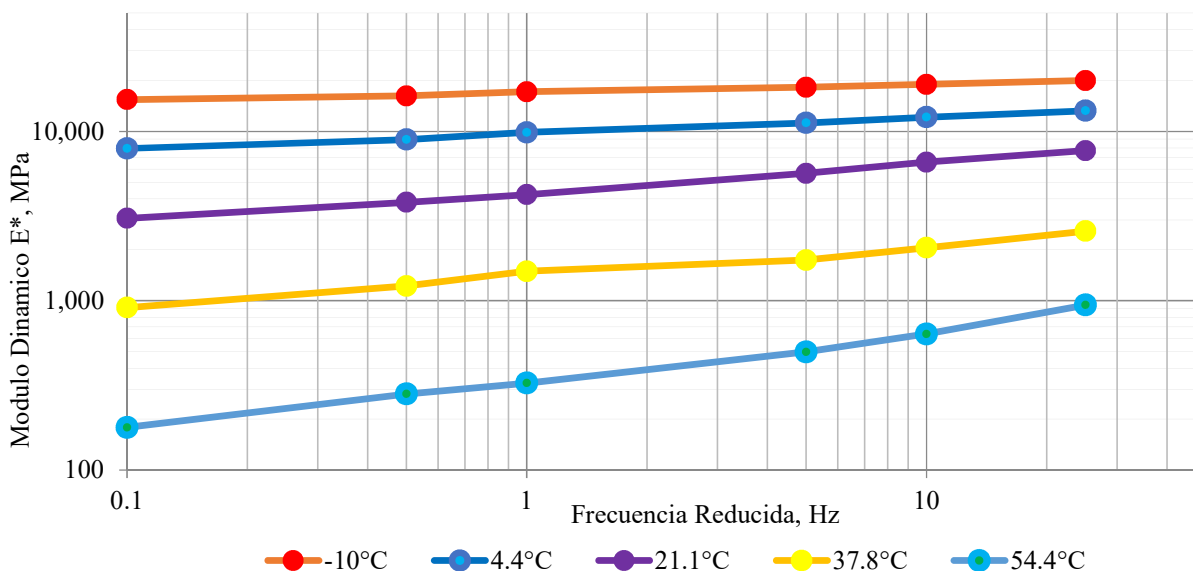


Figura 40. Módulo dinámico con adición de Cemento 1%, a temperaturas del ensayo, -10, 4.4, 21.1, 37.8 y 54.4°C.

#### 6.4.3 Ensayo módulo dinámico con proporción de cemento 2%.

En la adición del 2% de cemento se continúa obteniendo incremento del módulo a medida que disminuye la temperatura y aumenta la frecuencia. La afectación en la caída del módulo se sigue presentando para temperaturas menores a 4.4°C, pero con menor efecto respecto a la adición del 1%.

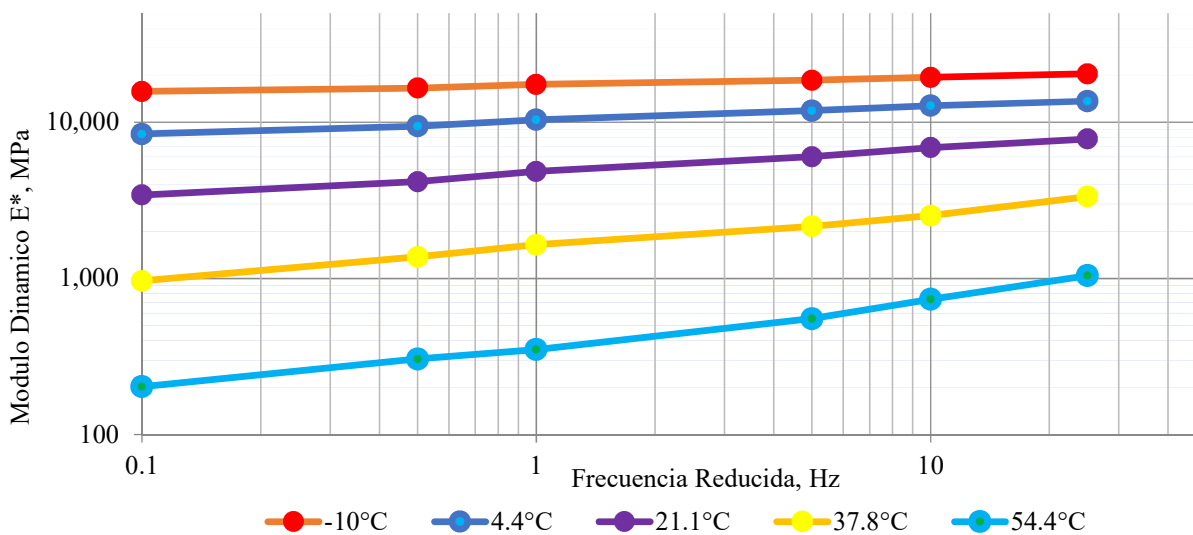


Figura 41. Módulo dinámico con adición de Cemento 2%, a temperaturas del ensayo, -10, 4.4, 21.1, 37.8 y 54.4°C.

#### 6.4.4 Ensayo módulo dinámico con proporción de cemento 3 %.

En la adición del 3% de cemento se continúa obteniendo incremento del módulo a medida que disminuye la temperatura y aumenta la frecuencia. En todas las temperaturas que se registraron muestreos se muestra un incremento en el módulo, los mejores incrementos porcentuales se encontraron en temperatura de 54.4°C.

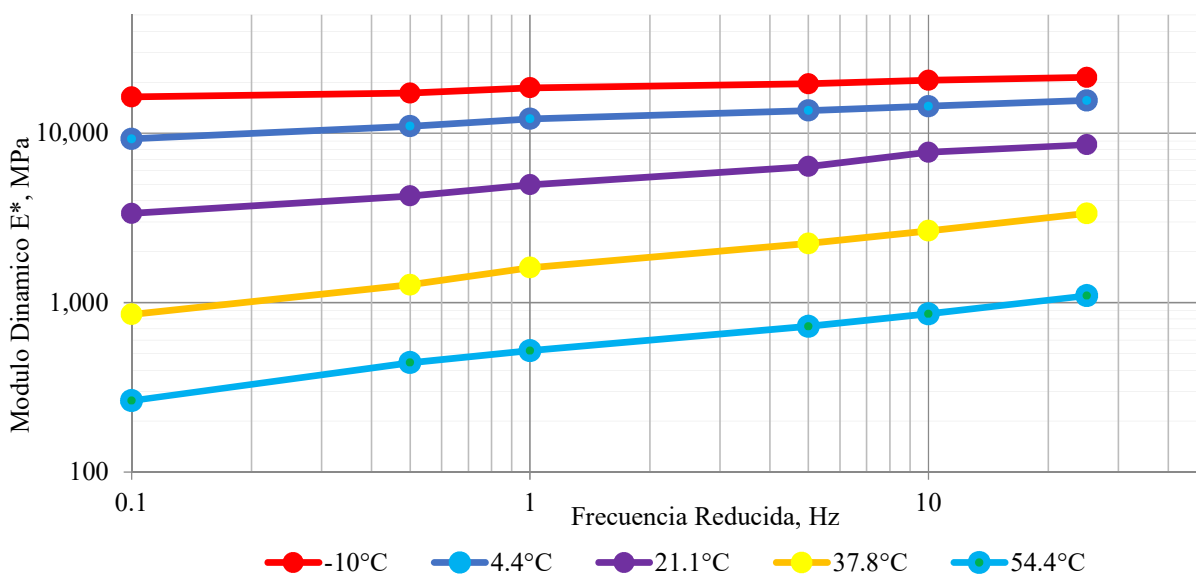


Figura 42. Módulo dinámico con adición de Cemento 3%, a temperaturas del ensayo, -10, 4.4, 21.1, 37.8 y 54.4°C.

#### 6.4.5 Ensayo módulo dinámico con proporción de cemento 4 %.

En la adición de cemento del 4% obteniendo incremento del módulo a medida que disminuye la temperatura y aumenta la frecuencia.

Para las temperaturas ensayadas se presentaron incrementos porcentuales respecto a la muestra sin adición, teniendo menor impacto en temperaturas bajas y mejor beneficio en temperaturas altas.

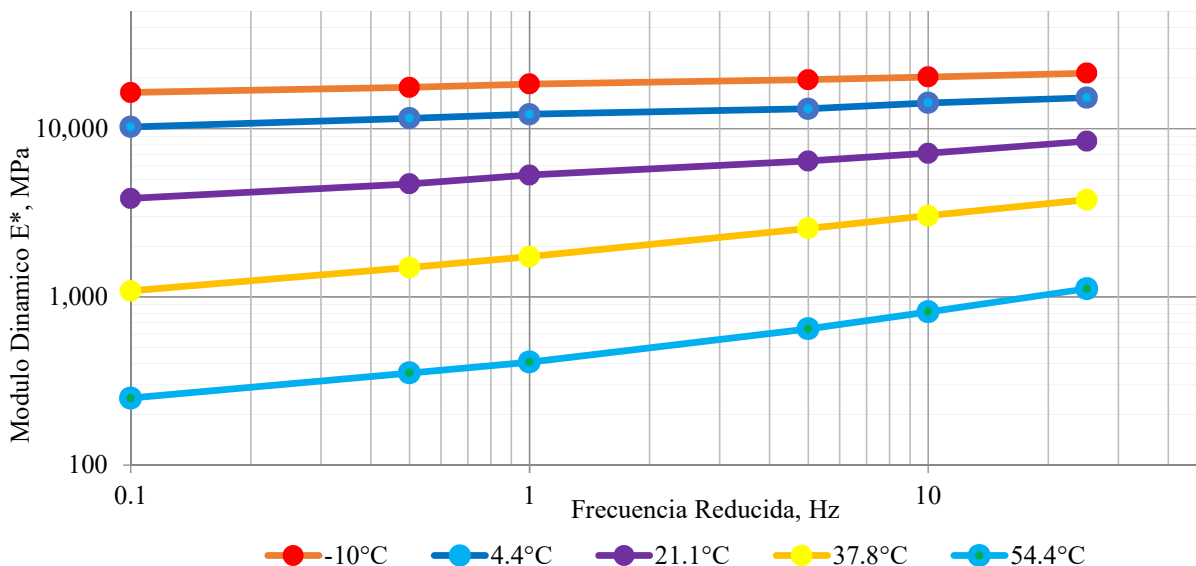


Figura 43. Módulo dinámico con adición de Cemento 4%, a temperaturas del ensayo, -10, 4.4, 21.1, 37.8 y 54.4°C.

#### 6.4.6 Análisis resultados ensayo módulo dinámico.

En la tabla 24 se muestra las diferentes temperaturas de ensayo y frecuencias ensayas para lo cual se obtuvieron los diferentes módulos en las mezclas, esta información se encuentra acompañada con una escala de colores y la variación porcentual de las mezclas adicionadas con cemento respecto a la muestra sin adición.

En la tabla 24 se muestra como en contenidos de 1 y 2% de adición en cemento las temperaturas de 4.4°C o inferiores presentan una ligera pérdida en su módulo dinámico, pero en temperaturas mayores se presenta una mejora, teniendo un mayor impacto porcentual en temperaturas mayores.

Se puede apreciar que todas las temperaturas ensayadas se presentan un crecimiento del módulo a medida que disminuye la temperatura. Adicionalmente ocurre un crecimiento en el módulo a medida que aumenta la frecuencia.

Tabla 24  
Resumen variación módulo dinámico.

T °C	Hz	0%	1%		2%		3%		4%	
		MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
-10	25	20,137	19,977	-1	20,433	1	21,366	6	21,369	6
-10	10	19,321	18,955	-2	19,410	0	20,535	6	20,267	5
-10	5	18,374	18,222	-1	18,577	1	19,615	7	19,530	6
-10	1	17,257	17,143	-1	17,498	1	18,539	7	18,415	7
-10	0.5	16,504	16,208	-2	16,563	0	17,259	5	17,580	7
-10	0.1	15,480	15,429	0	15,784	2	16,398	6	16,401	6
4.4	25	13,882	13,240	-5	13,670	-2	15,640	13	15,273	10
4.4	10	13,203	12,131	-8	12,787	-3	14,448	9	14,230	8
4.4	5	12,506	11,229	-10	11,891	-5	13,628	9	13,121	5
4.4	1	10,977	9,879	-10	10,374	-5	12,162	11	12,181	11
4.4	0.5	10,124	8,944	-12	9,439	-7	11,004	9	11,522	14
4.4	0.1	8,316	7,930	-5	8,425	1	9,263	11	10,242	23
21.1	25	7,465	7,697	3	7,826	5	8,564	15	8,418	13
21.1	10	6,342	6,579	4	6,885	9	7,727	22	7,134	12
21.1	5	5,416	5,659	4	6,015	11	6,362	17	6,420	19
21.1	1	4,216	4,237	1	4,843	15	4,967	18	5,292	26
21.1	0.5	3,469	3,813	10	4,168	20	4,264	23	4,694	35
21.1	0.1	2,635	3,067	16	3,423	30	3,367	28	3,848	46
37.7	25	2,433	2,576	6	3,346	38	3,367	38	3,780	55
37.7	10	2,052	2,056	0	2,527	23	2,654	29	3,034	48
37.7	5	1,675	1,738	4	2,159	29	2,235	33	2,556	53
37.7	1	1,258	1,491	19	1,645	31	1,610	28	1,732	38
37.7	0.5	1,086	1,222	13	1,375	27	1,276	17	1,492	37
37.7	0.1	753	911	21	964	28	852	13	1,085	44
54.4	25	747	943	26	1,042	39	1,098	47	1,117	50
54.4	10	528	636	20	735	39	857	62	814	54
54.4	5	425	499	17	553	30	725	70	645	52
54.4	1	300	326	9	350	17	520	73	409	36
54.4	0.5	258	281	9	305	18	442	71	352	36
54.4	0.1	185	179	-3	203	10	263	43	250	35

Con el objetivo de tener una escala visual de los módulos obtenidos se genera la figura 44 en la que se muestra con un mismo color las temperaturas de ensayo, la variación de frecuencia y los resultados obtenidos en la medición de módulos.



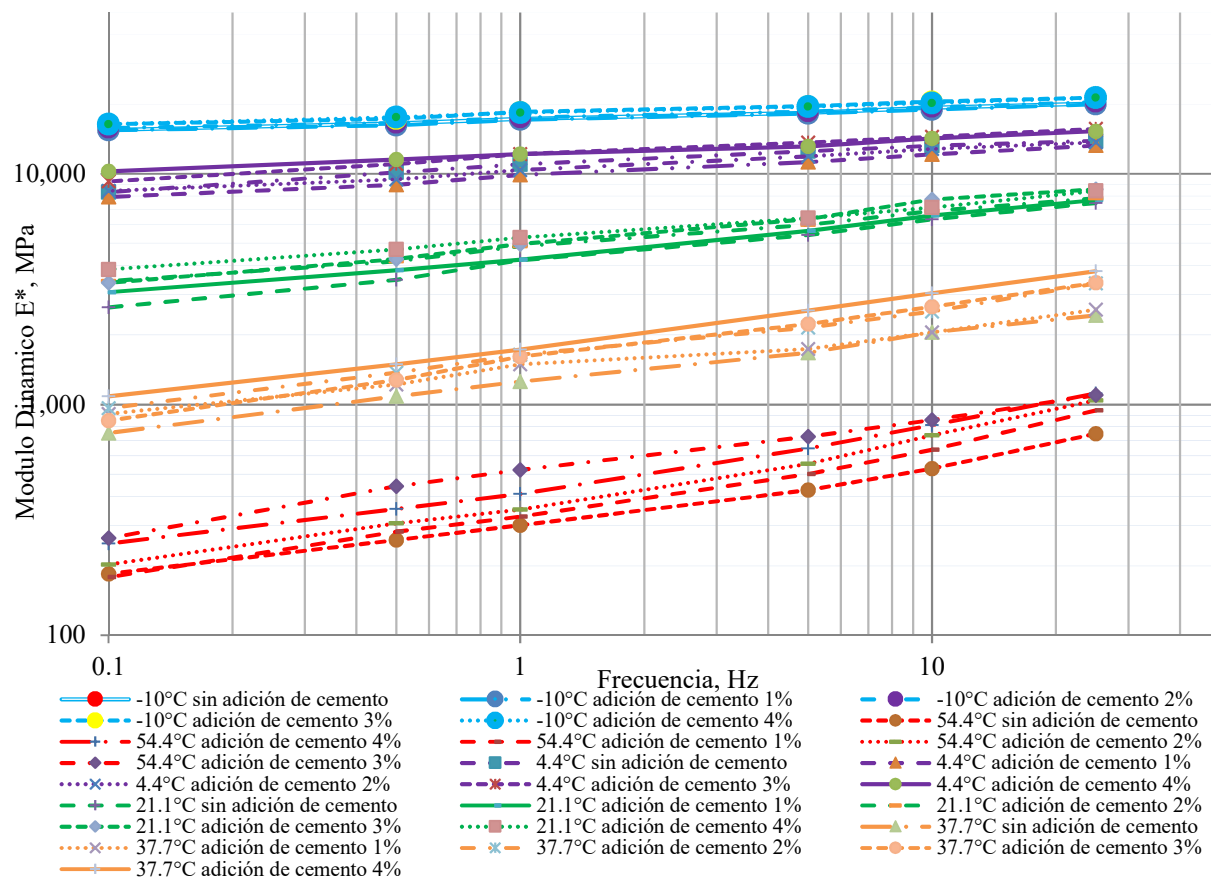


Figura 44. Resumen módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias

En la figura 44 se puede observar en escalas logarítmicas la evaluación del módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias. Las mayores ganancias porcentuales debido al aumento en la cantidad de cemento adicionado se obtienen en las mayores temperaturas de ensayo en las mezclas examinadas. El módulo dinámico es afectado por diferentes condiciones en la mezcla, una de las principales corresponde a la variabilidad térmica en la cual va a tener funcionamiento, debido a esto en laboratorio fueron evaluadas en diversas condiciones de temperatura y frecuencia para así ser evaluadas en el diseño de pavimento.

## 7. Recomendaciones

- Realizar ensayos de resistencia conservada de la mezcla MDF-19 con adiciones de cemento hidráulico entre 1 y 3 % de cemento para identificar el comportamiento en estos rangos.
- Debido a la limitación que se presenta en el uso de equipos se incrementaron las adiciones de cemento hidráulico cada 1%, en futuras investigaciones incluir dosificaciones intermedias entre 0% y 3% brindando mayores puntos de análisis y mejorando la regresión lineal que identifica las leyes de fatiga.
- En las deformaciones plásticas ensayadas se utilizó 22°C como acondicionamiento de las muestras, para futuras investigaciones se recomienda variar las temperaturas para identificar los efectos frente al desempeño de la mezcla adicionada con cemento hidráulico.
- Ensayar en campo este tipo de mezcla para determinar la correlación entre la fatiga hallada en laboratorio vs la hallada en el tramo de prueba.
- Realizar este mismo trabajo con diferentes agregados del país, para determinar su comportamiento por regiones.
- Para futuras investigaciones se recomienda evaluar el desempeño a fatiga a diferentes frecuencias.
- Con el fin de conocer los cambios del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica, se sugiere evaluar en otras investigaciones la variación de la superficie específica de los agregados al adicionar cemento hidráulico

## 8. Conclusiones

Los resultados para la MDF-19 con materiales pétreos de la región y con diferentes porcentajes de adición de cemento arrojaron las siguientes conclusiones:

- Para el caso particular de la mezcla densa fría con gradación de tamaño máximo de 19mm tipo MDF-19, utilizada en este proyecto, cuando se trabaja con adición de cemento entre 1 y 2% se encontró que el comportamiento a fatiga mejora y soporta mayores cantidades de ciclos de carga con respecto a una mezcla MDF-19 sin adición, sin embargo, cuando los porcentajes de dicha adición de cemento hidráulico se incrementan entre 2 y 4%, la mezcla se rigidiza al punto de que ya no se considera una ventaja para este tipo de material.
- Lo anterior fue planteado por diferentes autores entre los que se destacan Reyes y Rondón (2015), Rodríguez (2010) y Pérez (2008), consultados en el presente documento, sin embargo, la bibliografía no es suficiente como para tener estudios avanzados para mezclas densas frías, por lo tanto, se considera necesario llevar a cabo mayores estudios para la obtención de aportes a la ingeniería de pavimentos que analicen las mezclas densas frías y su desempeño a fatiga variando los tipos de agregados en su procedencia y gradación.
- De acuerdo con el procedimiento de diseño por resistencia descrito en el artículo 440-13 (INVIAS, 2013), se logró obtener una mezcla densa fría cumpliendo con las especificaciones, como se describen en el capítulo 5, sección 5.2. Así mismo, se documentaron los hallazgos de la evaluación del comportamiento a fatiga evaluada por el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos para una MDF-19 al adicionar cemento hidráulico en los diferentes porcentajes evaluados. Capítulo 6, sección 6.2.

- Así mismo, se confirmó que al adicionar cemento hidráulico en una mezcla tipo MDF-19 se mejora la resistencia a la deformación plástica, obteniendo disminuciones en las deformaciones acumuladas con cada aumento en el porcentaje de cemento adicionado, esto debido a la rigidización que se le produce a la mezcla, condición útil para pavimentos afectados por fenómenos de ahuellamiento.
- Como porcentajes óptimos de adición de cemento hidráulico se obtuvo entre 1% y 2%, los cuales mejoraron 3 características de las mezclas evaluadas, como son la deformación plástica, el módulo dinámico y la resistencia a fatiga, la cual es la característica principal del presente trabajo y es de mucha relevancia en el diseño de un pavimento.
- Debido a las mejoras para la vida a fatiga, módulo dinámico y deformaciones plásticas, se considera una ventaja en el desempeño de pavimentos diseñados por el método de consumos, en cuanto a los espesores proyectados, teniendo en cuenta de no sobre pasar la adición de cemento del 2%, para mezclas con características similares a las del presente proyecto.
- Con los porcentajes óptimos de adición de cemento es posible recomendar este tipo de mezclas en zonas de difícil acceso, ya que la mezcla se puede elaborar en campo, extender y compactar sin necesidad de tener controles de temperatura que se requieren con mezclas densas calientes, esta es una ventaja para vías terciarias donde las plantas de concreto asfáltico son muy lejanas, también se considera una ventaja en la durabilidad de estos pavimentos por el aumento de la resistencia a la fatiga con respecto a una mezcla asfáltica densa en frío sin adición de cemento.
- Como se menciona anteriormente, al ser mezclas densas frías, no se necesita controles de temperatura en obra, ventaja para el medio ambiente, ya que al utilizar estas mezclas

mejoradas no hay emisiones atmosféricas que afectan, por lo tanto, es posible llamar a estas mezclas amigables con el ambiente, tema de suma importancia en este momento donde Colombia se ha comprometido con la disminución de gases de efecto invernadero, como reto mencionado por la ONU para el año 2050 (Cumbre 2019. Acción climática ONU).

- De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se evidenció como en contenidos de 1 y 2% de adición en cemento y temperaturas de 4.4°C o inferiores presentan una ligera pérdida en su módulo dinámico, pero en temperaturas mayores se presenta una mejora, teniendo un mayor impacto porcentual.
- De acuerdo a la presente experiencia se encontró gran importancia en el curado de la mezcla, puesto que las muestras sin el tiempo necesario para su endurecimiento se deterioraron prematuramente. Esto se traduce en limitaciones de apertura al tránsito cuando se utilizan estas mezclas en capas de rodadura.

## 9. Referencias

- (AASHTO), A. A. (2014). *Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending*.
- Acuña, M. J., Sibaja, D., & Molina, D. (2009). Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones. *Revista Infraestructura Vial*, vol. 11 y No. 21, 18-29.
- ANIF. (2016). *Índice de Competitividad Vial y Logística (ICVL) en Colombia*.
- Arenas Lozano, H. L. (1992). *Tecnología del Cemento Asfáltico*. Popayán: FA Editores.
- Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., & Graziani, A. (2011). A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials. *Construction and building materials*, 773-778.
- Doré G. y Zubeck, H. (2009). *Cold regions pavement engineering*. Reston USA: ASCE Press – McGraw Hill.
- Doré, G., & Zubeck, H. (2009). *Cold regions pavement engineering*. Reston, USA: ASCE Press – McGraw Hill.
- Goma, F. (1979). *El cemento Portland y otros aglomerantes*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S. A.
- IDU. (2011). *Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público en Bogotá D.C.* Bogota.
- INVIAS. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras*. Bogota: Instituto Nacional de Vías.
- Kavussi, A., & Modarres, A. (2010). Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement. *Construction and building materials*, 1920-1927.

- Martinez Diaz, M., Pérez, I., & Sa, L. f. (2012). Revisión de las nuevas tecnologías de fabricación de mezclas bituminosas a baja temperatura. *Ingeniería y Tecnología del Medio Ambiente*.
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos Para Carreteras*. Bogotá D.C.: Agora Editores.
- Niazi, Y., & Jalili, M. (2009). Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, vol. 23.
- Oruc, S., Celic, M., & Akpınar, M. (2007). Effect of cement on emulsified asphalt mixtures. *Journal of materials engineering and performance*, 578-583.
- Oruc, S., Celik, F., & Akpınar, M. (2006). Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures. *ASM International*, 578–583.
- Perez, L. M. (2008). *Comportamiento de las “mezclas templadas” en obra comparativa frente a una mezcla convencional*. Valladolid, España: Congreso Nacional FIRMES. Asociación Nacional de la Carretera.
- Revista Dinero, I. (noviembre de 2016). Vías Terciarias Toman Mayor Nivel. *Dinero*, 36-37.
- Reyes Ortíz, O. J. (2013). Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados con ceras. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 161-178.
- Reyes, O. J. (2014,). Evaluación Mecánica de Mezclas Asfálticas Frías Fabricadas con Reemplazo de Llenante Mineral . *Información Tecnológica*, Vol. 25 Issue 2, p93-102.  
10p.

Reyes-Ortiz, O., Álvarez, A., & Valdés-Vidal, G. (2014). Evaluación Mecánica de Mezclas Asfálticas Frías Fabricadas con Reemplazo de Llenante Mineral. *Información tecnológica*, Vol 25 N°2.

Rivera López, G. A. (1992). *Concreto Simple*. Popayán: Universidad Del Cauca.

Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos materiales, construcción y diseño*. Bogotá, Colombia: ECOE Ediciones.



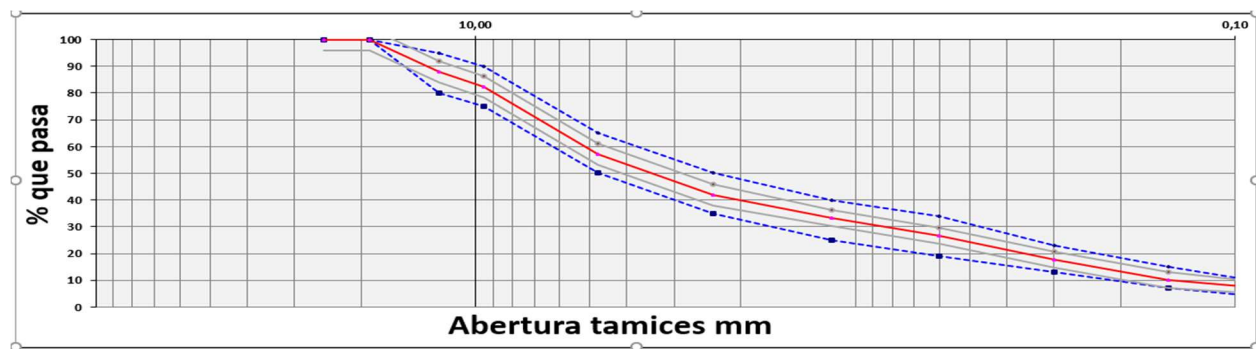
## Apéndices

### Lista Apéndices

Apéndice A. Gradación.....	90
Apéndice B. Angularidad.....	91
Apéndice C. Caras fracturadas (%).....	92
Apéndice D. Contenido de Impurezas .....	93
Apéndice E. Equivalente de Arena .....	94
Apéndice F. Densidad aparente de la llenante mineral en kerosene .....	95
Apéndice G. Ensayo Maquina de los Ángeles.....	96
Apéndice H. resistencia al desgaste por abrasión utilizando el aparato micro-deval .....	97
Apéndice I. Proporción de partículas planas y alargadas .....	98
Apéndice J. Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos.....	99
Apéndice K. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio .....	100
Apéndice L. Valor de Azul de Metileno en Agregados Finos.....	101
Apéndice M. Ley de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente (0%) .....	102
Apéndice N. Ley de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente (1%).....	103
Apéndice O. Ley de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente (2%).....	104
Apéndice P. Ley de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente (3%).....	105
Apéndice Q. Practica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (0%).....	106
Apéndice R. Practica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (1%).....	108
Apéndice S. Practica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (2%).....	110
Apéndice T. Practica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (3%).....	112
Apéndice U. Practica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (4%).....	114
Apéndice V. Resistencia a la deformación plástica (0%).....	116
Apéndice W. Resistencia a la deformación plástica (1%).....	117
Apéndice X. Resistencia a la deformación plástica (2%).....	118
Apéndice Y. Resistencia a la deformación plástica (3%).....	119
Apéndice Z. Resistencia a la deformación plástica (4%) .....	120

### Apéndice A. Gradación

COMBINACIÓN TEÓRICA DE AGREGADOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS																														
Tipo de Mezcla															MDF-19		Fórmula de trabajo N°		Definición fórmula de	Muestra		%		Descripción Muestra						
															1		M1	75,0		ARENA DE TRITURACION MDF-19										
																	M2	25,0		GRAVA 3/4"										
																	M3													
																	M4													
																	M5													
															MDF-19		100,0													
Tamiz		ARENA DE		GRAVA 3/4"		%pas a		%retenido		%pas a		%retenido		%pas a		%retenido		Especificación		Cantidades de mezcla					Combinación		Desviación		Tolerancias Norma	
pul	mm	%pasa	%retenido	%pas a	%retenido	%pas a	%retenido	%pas a	%retenido	%pas a	%retenido	Superior	Inferior	M1	M2	M3	M4	M5	%pasa	%retenido	%pasa	%retenido	%pasa	%retenido	%pasa	%retenido	%pasa	%retenido		
1"	25,00	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100	100	75,0	25,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	96,0	104,0		
3/4"	19,00	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100	100	75,0	25,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	96,0	104,0		
1/2"	12,5	100,0	0,0	51,2	48,8	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	95	90	75,0	12,8	0,0	0,0	0,0	87,6	12,2	87,5	12,5	0,3	-0,3	83,8	91,8				
3/8"	9,50	100,0	0,0	29,6	70,4	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	90	75	75,0	7,4	0,0	0,0	0,0	82,4	17,6	82,5	17,5	-0,1	0,1	78,4	86,4				
Nº4	4,75	74,7	25,3	4,9	95,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	65	50	56,0	1,2	0,0	0,0	0,0	57,2	42,8	57,5	42,5	-0,3	0,3	53,2	61,2				
Nº8	2,36	55,4	44,6	1,7	98,3	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	50	35	41,5	0,4	0,0	0,0	0,0	42,0	58,0	42,5	57,5	-0,5	0,3	38,0	46,0				
Nº16	1,18	43,8	56,2	1,3	98,7	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	40	25	32,9	0,3	0,0	0,0	0,0	33,2	66,8	32,5	67,5	0,7	-1,2	30,2	36,2				
Nº30	0,60	35,2	64,8	1,1	98,9	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	34	19	26,4	0,3	0,0	0,0	0,0	26,6	73,4	26,5	73,5	0,1	0,6	23,6	29,6				
Nº50	0,30	23,1	76,9	0,9	99,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	23	13	17,4	0,2	0,0	0,0	0,0	17,6	82,4	18,0	82,0	-0,4	0,5	14,6	20,6				
Nº100	0,15	13,1	86,9	0,7	99,3	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	15	7	9,8	0,2	0,0	0,0	0,0	10,0	90,0	11,0	89,0	-1,0	0,6	7,0	13,0				
Nº200	0,075	8,2	91,8	0,4	99,6	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	8	3	6,2	0,1	0,0	0,0	0,0	6,30	93,7	5,5	94,5	0,8	-8,8	4,3	8,3				



### Apéndice B. Angularidad

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍO EN AGREGADO FINO NO COMPACTADO INV E-239-13						
MÉTODO SELECCIONADO A <u>X</u> B ___ C ___						
TAMICES		MÉTODO A	MÉTODO B	MÉTODO C		
PASA	RETENIDO	MASA (g)	MASA (g)	MASA (g)		
N°8	N°16	44	Se toma 190 g de cualquiera de los tamaños	Según gradación original del material		
N°16	N°30	57				
N°30	N°50	72				
N°50	N°100	17				
<b>Peso total muestra (g)</b>		<b>190</b>	<b>190</b>	<b>190</b>		
<b>Peso Específico del agregado fino</b>						
Peso Material seco (g)	W Matraz + arena + H <sub>2</sub> O (g)	W Matraz + H <sub>2</sub> O (g)	Peso SSS (g)	G <sub>sb</sub>	G <sub>s</sub> nominal	Absorción (%)
495,5	992,94	680,1	500,18	2,644	2,712	<b>0,9</b>
Volumen del Cilindro (cm <sup>3</sup> ) =		100				
Peso del cilindro (g) =		264,4				
<b>Angularidad del agregado fino</b>						
N°	1	2	3	PROMEDIO		
Peso de arena + cilindro (g)	404,07	404,15	405,19	<b>404,5</b>		
Peso de arena (g)	139,72	139,8	140,84	<b>140,1</b>		
Volumen de agregado (cm <sup>3</sup> )	52,837	52,867	53,261	<b>53,0</b>		
Vacíos U%	47,16	47,13	46,74	<b>47,0</b>		
<b>PORCENTAJE DE VACÍOS DEL AGREGADO FINO U % =</b>				<b>47,0</b>		

**Apéndice C. Caras fracturadas (%)**

	<b>CARAS FRACTURADAS DE AGREGADOS GRUESOS INV E-227-13</b>
--	--

<b>TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL MENOR O IGUAL A 1/2"</b>
---

TAMAÑO AGREGADO	PESO AGREGADO (g)	PESO DE LAS PARTÍCULAS CON DOS O MAS CARAS FRACTURADAS (g)	PESO DE LAS PARTÍCULAS NO FRACTURADAS (g)	% CARAS FRACTURADAS
RETIENE No. 4				

<b>TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL MAYOR O IGUAL A 3/4"</b>
---

TAMAÑO AGREGADO	PESO AGREGADO (g)	PESO DE LAS PARTÍCULAS CON DOS O MAS CARAS FRACTURADAS (g)	PESO DE LAS PARTÍCULAS NO FRACTURADAS (g)	% CARAS FRACTURADAS
RETIENE No. 3/8"	286,8	283,3	3,6	<b>99%</b>
RETIENE No. 4	211,5	211,5	9,7	<b>96%</b>

<b>% PROMEDIO DE CARAS FRACTURADAS</b>	<b>97%</b>
--	------------

## Apéndice D. Contenido de Impurezas

<b>DETERMINACIÓN DE LA LIMPIEZA SUPERFICIAL DE LAS PARTÍCULAS DE AGREGADO GRUESO INV E-237-13</b>
---

<b>CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA</b>	
PESO INICIAL DE LA MUESTRA:	1006,3
PESO DE LA MUESTRA SECA:	1005,5
% HUMEDAD=	<b>0,1</b>
<b>CONTENIDO DE IMPUREZAS DE LA MUESTRA</b>	
PESO INICIAL DE LA MUESTRA:	1002,1
PESO MUESTRA RET. TAMIZ No35:	997,5
<b>% IMPUREZAS=</b>	<b>0,38</b>

**Apéndice E. Equivalente de Arena**

<b>EQUIVALENTE DE ARENA INV E -133-13</b>			
<b>ENSAYO No</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>PROBETA No:</b>	1	2	3
<b>LECTURA DE ARENA cm:</b>	7,1	7,2	7,6
<b>LECTURA DE ARCILLA cm:</b>	11,2	11,1	11,1
<b>EQUIVALENTE DE ARENA:</b>	63,4	64,9	68,5
<b>PROMEDIO EQUIVALENTE DE ARENA:</b>	<b>65,6</b>		

**Apéndice F. Densidad aparente de la llenante mineral en kerosene**

**DENSIDAD APARENTE DEL LLENANTE MINERAL EN KEROSENE  
INV E - 225-13**

<b>ENSAYO No</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>PESO MUESTRA (g)</b>	10,01	10,12	10,13
<b>VOLUMEN APARENTE (mL)</b>	12,6	12,8	13,0
<b>DENSIDAD APARENTE (g/mL)</b>	0,794	0,791	0,779
<b>DENSIDAD APARENTE PROMEDIO (g/mL)</b>	<b>0,788</b>		

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{Peso Muestra}}{\text{Volumen Aparente}}$$

## Apéndice G. Ensayo Máquina de los Ángeles

ENSAYO MAQUINA DE LOS ÁNGELES INV. E-218/219-13
---

CONDICIÓN	SECA			HÚMEDA
GRADACIÓN USADA	B			
NÚMERO DE ESFERAS	11			
NÚMERO DE VUELTAS	100	500		
PESO INICIAL P1 (gr)	5007,22	5006		
PESO FINAL P2 (gr)	4796,77	3955,11		
PÉRDIDA= (P1-P2) (gr)	210,45	1050,89		
% DE DESGASTE	<b>4,20</b>	<b>20,99</b>		
RELACIÓN HÚMEDO/SECO (%)				

DATOS SOBRE LA GRADACIÓN, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES								
TAMIZ		GRADACIÓN						
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500 ± 50		
2 1/2"	2"					2500 ± 50		
2"	1 1/2"					5000 ± 50	5000 ± 50	
1 1/2"	1"	1250 ± 25					5000 ± 25	5000 ± 25
1"	3/4"	1250 ± 25						5000 ± 25
3/4"	1/2"	1250 ± 10	2500 ± 10					
1/2"	3/8"	1250 ± 10	2500 ± 10					
3/8"	1/2"							
1/2"	3/8"							
3/8"	1/4"			2500 ± 10				
1/4"	No 4			2500 ± 10				
No 4	No 8				5000 ± 10			
NÚMERO DE ESFERAS		12	11	8	6	12	12	12
NÚMERO DE VUELTAS		500	500	500	500	1000	1000	1000



**Apéndice H. resistencia al desgaste por abrasión utilizando el aparato micro-deval**

**RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN UTILIZANDO EL  
APARATO MICRO DEVAL INV E - 238-13**

<b>ENSAYO</b>	<b>1</b>
<b>GRADACIÓN USADA</b>	<b>C</b>
<b>PESO DE ESFERAS (g)</b>	5000
<b>TIEMPO DE ENSAYO (min.)</b>	120
<b>MASA SECA ANTES DEL ENSAYO m (g)</b>	1501,2
<b>MASA SECA DESPUÉS DE LAVAR SOBRE TAMIZ 1,18 mm (N°16) (g)</b>	1385,78
<b>% DESGASTE</b>	<b>7,7</b>

<b>TAMIZ</b>		<b>GRADACIÓN</b>		
<b>PASA</b>	<b>RETENIDO</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
19.1	16.0	375		
16.0	12.5	375		
12.5	9.5	750	750	
9.5	6.3		375	750
6.3	4.75		375	750
<b>PESO MATERIAL (gr.)</b>		1500	1500	1500
<b>TIEMPO DE ENSAYO (min)</b>		120	105	95

**Apéndice I. Proporción de partículas planas y alargadas**

<b>PROPORCIÓN DE PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS INV E-240-13</b>						
<b>RELACIÓN USADA:</b> <u>          5:1          </u>						
<b>PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS</b>						
<b>TAMAÑO DE LA MUESTRA</b>	<b>PESO MUESTRA (g)</b>	<b>% RETENIDO GRANULOMETRÍA</b>	<b>PESO PART. PLANAS (g)</b>	<b>% PART. PLANAS</b>	<b>PESO PART. ALARGADAS (g)</b>	<b>% PART. ALARGADAS</b>
3/4" - 1/2"	196,74	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2" - 3/8"	286,82	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/8" - No4	211,52	20,0	0,1	0,1	0,9	0,4
<b>PORCENTAJE PROMEDIO DE PARTÍCULAS PLANAS =</b>					<b>0,0 %</b>	
<b>PORCENTAJE PROMEDIO DE PARTÍCULAS ALARGADAS =</b>					<b>0,1 %</b>	

**Apéndice J. Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos**

**ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS A  
LOS AGREGADOS FINOS (MÉTODO RIEDEL WEBER) INV E-774-13**

**TIPO DE LIGANTE:** CEMENTO ASFÁLTICO 60/70 NORMALIZADO

SOLUCIÓN DE ENSAYO	ÍNDICE DE ADHESIVIDAD	DESPRENDIMIENTO =		
		NP: No presenta	P: Parcial	T: Total
Agua Destilada	0		NP	
M/256	1		NP	
M/128	2		NP	
M/64	3		NP	
M/32	4		NP	
M/16	5		NP	
M/8	6		NP	
M/4	7		P	
M/2	8		P	
M/1	9		T	
No hay desprendimiento total con la solución M/1		10		

ÍNDICE ADHESIVIDAD PARCIAL	7	Corresponde a la menor concentración que produce desprendimiento parcial
ÍNDICE ADHESIVIDAD TOTAL	9	Corresponde a la menor concentración que produce desprendimiento total
ÍNDICE ADHESIVIDAD (Riedel Weber)	7	9

**Apéndice K. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio**

**SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE  
SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO INV  
E- 220-07**

TIPO DE SOLUCIÓN:                      **SULFATO DE SODIO:**     X                          **SULFATO DE MAGNESIO:**                     

NÚMERO DE CICLOS:                          5    

Tamaño de Fracción	% Retenido de Granulometría original	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Tamiz de Retención	% Pérdida por Tamiz	% Pérdida de la Muestra
1 1/2" - 3/4"				5/8"		
3/4" - 3/8"	21,0	1002,9	984,8	5/16"	1,8	0,4
3/8" - No 4	19,7	301,5	297,1	No 5	1,5	0,3
No 4 - No 8	12,9	101,5	98,9	No 8	2,6	0,3
No 8 - No 16	7,1	101,8	91,9	No 16	9,8	0,7
No 16 - No 30	8,5	101,5	72,7	No 30	28,4	2,4
No 30 - No 50	15,8	101,5	71,2	No 50	29,9	4,7
<b>PÉRDIDA TOTAL (%)</b>						<b>8,8</b>

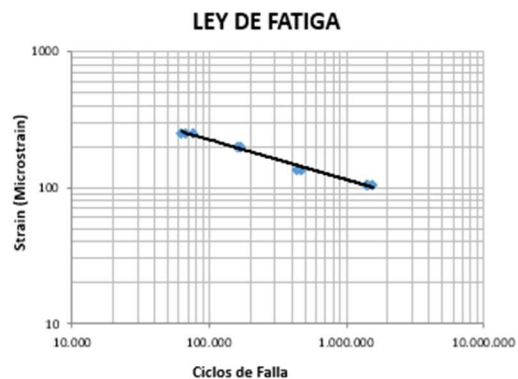
**Apéndice L. Valor de Azul de Metileno en Agregados Finos****VALOR DE AZUL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS  
INV E-235-13**

<b>CONCENTRACIÓN DE SOLUCIÓN COLORANTE</b>	10
<b>VOLUMEN ABSORBIDO SOLUCIÓN COLORANTE (mL)</b>	45
<b>CANTIDAD MUESTRA (gr)</b>	200
<b>VALOR DE AZUL DE METILENO (Vaf)</b>	<b>2,3</b>

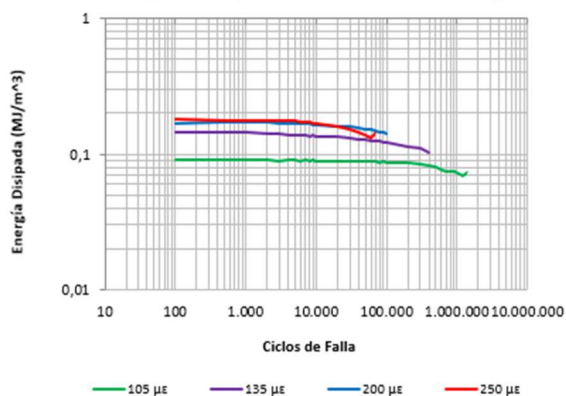
## Apéndice M. Ley de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente (0%)

LEY DE FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE SOMETIDAS A LA VIGA DE FLEXIÓN REPETIDA AASHTO T321-07 / UNE-EN 12697-24			
Tipo de Mezcla:		Condiciones de Ensayo:	
MDF-19 + 14% EMULSIÓN + 0.0% DE CEMENTO		Frecuencia = 10.0 Hz	Temperatura = 20.0 °C

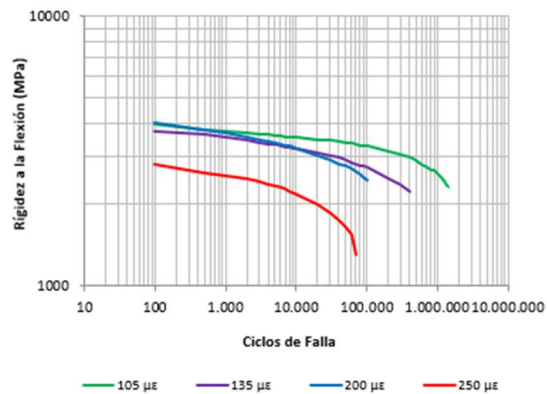
VIGA	Módulo Inicial (Mpa)	Ciclos de Falla	Microstrain	Energía Disipada Acumulada (J/m <sup>3</sup> )
1	3238	1.425.000	105	47053
2	4480	464.109	135	29477
3	5606	160.869	200	29053
4	2459	67.848	250	12875
5	5672	1.399.500	105	82960
6	3897	468.198	135	36721
7	3585	168.724	200	21165
8	3553	62.514	250	7068
9	3000	1.561.250	105	199684
10	2869	430.610	135	87130
11	2906	168.000	200	22052
12	2474	76.463	250	11006



**Energía Disipada vs. Ciclos de Carga**



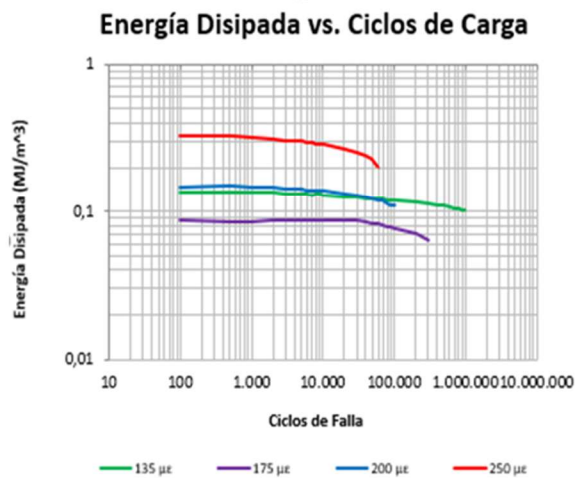
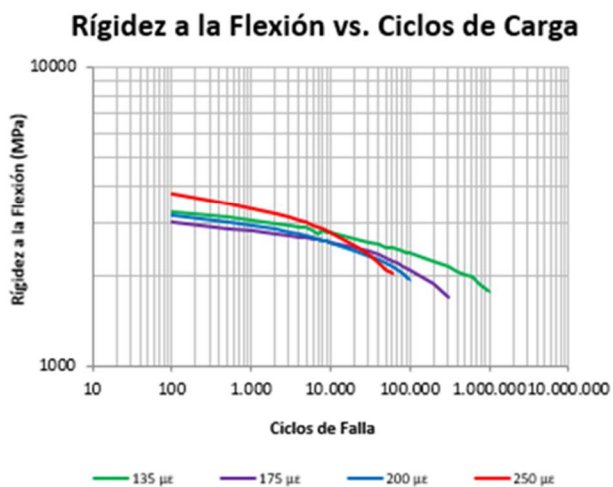
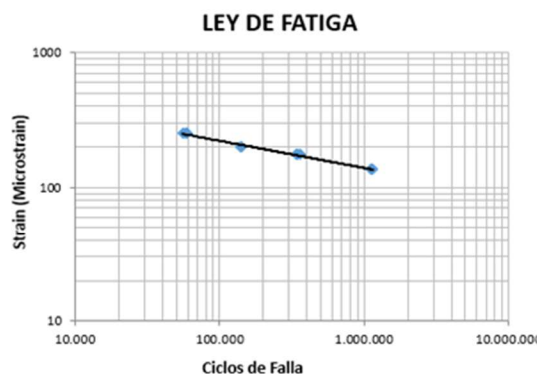
**Rígidez a la Flexión vs. Ciclos de Carga**



## Apéndice N. Ley de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente (1%)

LEY DE FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE SOMETIDAS A LA VIGA DE FLEXIÓN REPETID AASHTO T321-07 / UNE-EN 12697-24			
Tipo de Mezcla:		Condiciones de Ensayo:	
MDF-19 + 14% EMULSIÓN + 1.0% DE CEMENTO		Frecuencia = 10.0 Hz	Temperatura = 20.0 °C

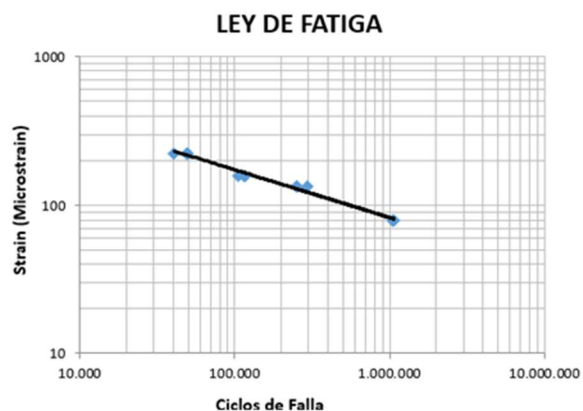
VIGA	Módulo Inicial (Mpa)	Ciclos de Falla	Microstrain	Energía Disipada Acumulada (J/m <sup>3</sup> )
1	3288	1.110.785	135	92710
2	4025	360.302	175	47940
3	2946	140.243	200	11471
4	3581	55.500	250	4116
5	3594	1.144.978	135	69503
6	686	335.928	175	2576
7	2835	140.567	200	15249
8	5058	57.839	250	28895
9	2907	1.135.500	135	207175
10	4335	342.241	175	26040
11	3764	140.144	200	22565
12	2637	58.969	250	11498



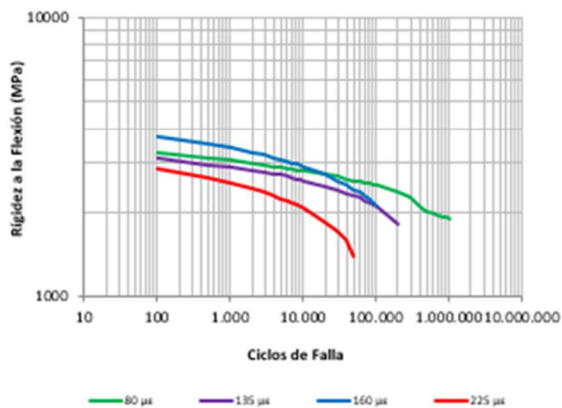
**Apéndice O. Ley de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente (2%)**

<b>LEY DE FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE SOMETIDAS A LA VIGA DE FLEXIÓN REPETIDA AASHTO T321-07 / UNE-EN 12697-24</b>			
<b>Tipo de Mezcla:</b>		<b>Condiciones de Ensayo:</b>	
MDF-19 + 14% EMULSIÓN + 3.0% DE CEMENTO		Frecuencia = 10.0 Hz	Temperatura = 20.0 °C

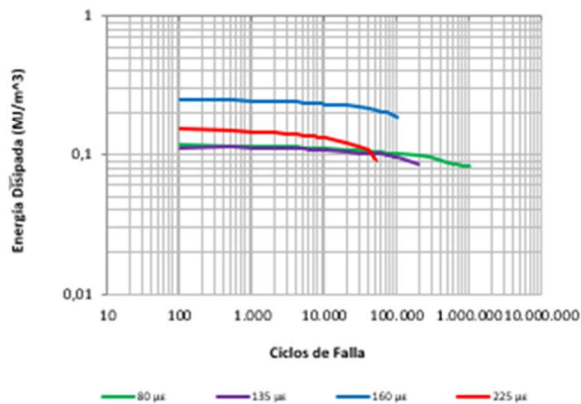
VIGA	Módulo Inicial (Mpa)	Ciclos de Falla	Microstrain	Energía Disipada Acumulada (J/m <sup>3</sup> )
1	4159	1.113.000	110	53813
2	3117	343.500	140	88956
3	5687	146.500	160	15047
4	4982	56.235	200	19320
5	4466	1.147.522	110	70524
6	2940	316.703	140	15194
7	2850	141.495	160	12181
8	4456	54.693	200	13730
9	4567	1.170.272	110	53613
10	3676	321.000	140	17925
11	683	136.007	160	1681
12	3303	50.742	200	2848



**Rígidez a la Flexión vs. Ciclos de Carga**



**Energía Disipada vs. Ciclos de Carga**

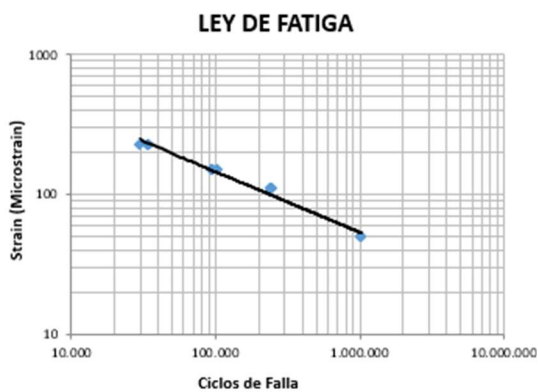




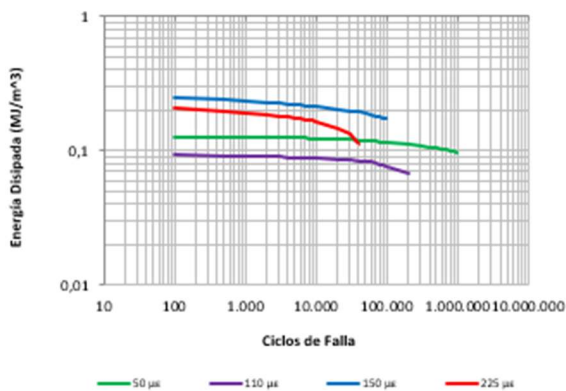
## Apéndice P. Ley de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente (3%)

LEY DE FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE SOMETIDAS A LA VIGA DE FLEXIÓN REPETIDA AASHTO T321-07 / UNE-EN 12697-24			
Tipo de Mezcla:		Condiciones de Ensayo:	
MDF-19 + 14% EMULSIÓN + 4.0% DE CEMENTO		Frecuencia = 10.0 Hz	Temperatura = 20.0 °C

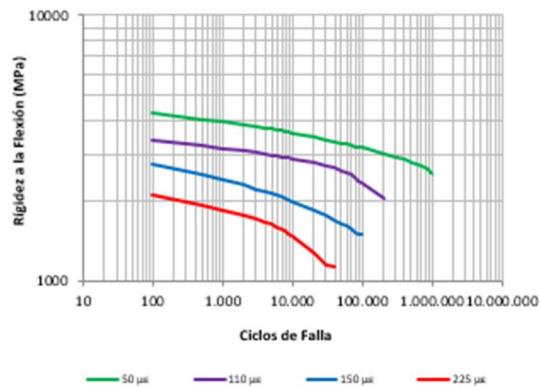
VIGA	Módulo Inicial (Mpa)	Ciclos de Falla	Microstrain	Energía Disipada Acumulada (J/m <sup>3</sup> )
1	3151	1.048.688	80	149251
2	2878	251.159	135	24384
3	2966	114.783	160	24196
4	3194	48.840	225	6985
5	3002	1.068.500	80	70844
6	2878	251.159	135	24384
7	3042	106.500	160	33529
8	3819	40.557	225	7775
9	3562	1.055.000	80	63984
10	3593	291.363	135	24142
11	5117	116.539	160	11879
12	1558	49.469	225	1230



**Energía Disipada vs. Ciclos de Carga**



**Rígidez a la Flexión vs. Ciclos de Carga**

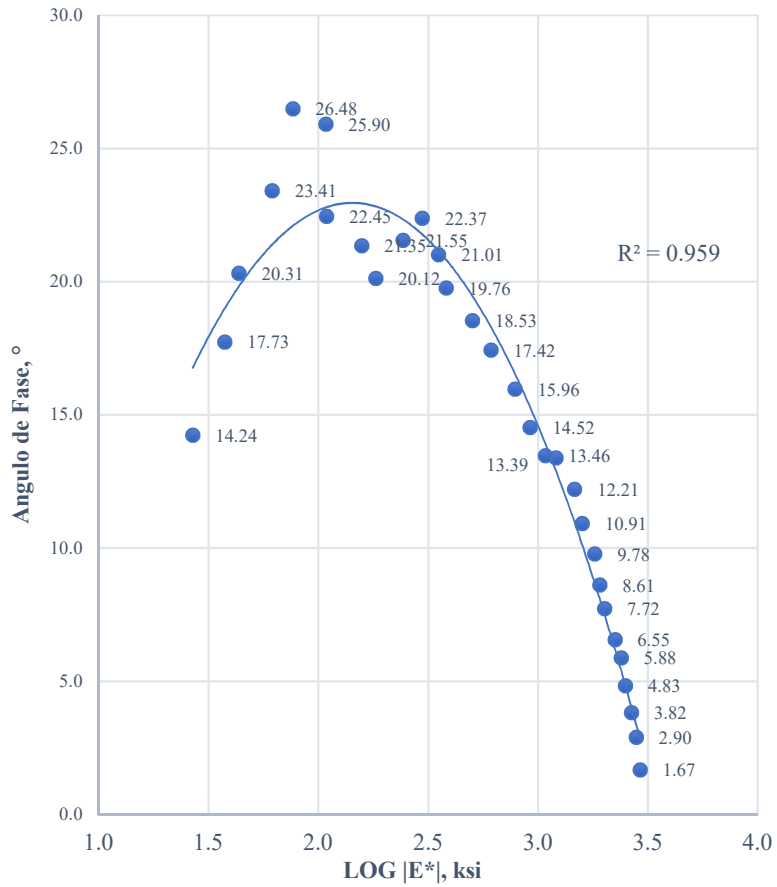


ANÁLISIS DE LA VIDA A FATIGA MEZCLA DENSA FRÍA

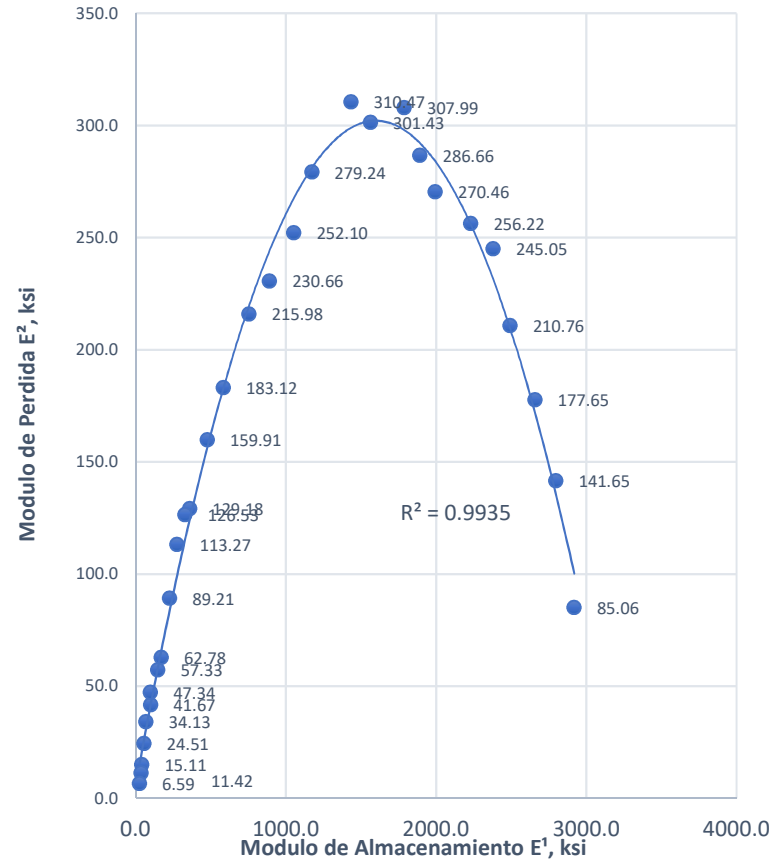
Apéndice Q. Practica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (0%)

PRACTICA ESTÁNDAR PARA EL DESARROLLO DE LA CURVA MAESTRA DEL MÓDULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS																	
DESIGNACION: AASHTO R 62-13																	
MEZCLA: MDF-19 + 0% Cemento (CLIENTE: IGC-1017-48)																	
Metodo Estandar de Prueba para la Determinacion del Modulo Dinamico de Mezclas de Concreto Asfaltico en Caliente																	
Condiciones			Especimen 1		Especimen 2		Especimen 3		Modulo Dinamico  E'						Angulo de Fase δ		
Temperatura, °C	Temperatura, °F	Frecuencia, Hz	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Promedio, Mpa	Promedio, ksi	Promedio, psi	Coefficiente de Variacion, %	LOG  E' , ksi	Modulo de Almacenamiento E', ksi	Modulo de Perdida E'', ksi	Promedio	Desviacion Estandar, °
-10	14	25	20081,1	1,7	20298,8	1,8	20031,6	1,5	20137,1	2920,6	2920645,5	0,7	3,5	2919,4	85,1	1,7	0,15
-10	14	10	19290,0	2,9	19396,0	3,5	19277,1	2,4	19321,0	2802,3	2802279,3	0,3	3,4	2798,7	141,7	2,9	0,56
-10	14	5	18304,7	3,7	18521,5	4,2	18296,7	3,5	18374,3	2665,0	2664962,3	0,7	3,4	2659,0	177,6	3,8	0,39
-10	14	1	17203,1	4,5	17328,1	5,5	17240,2	4,4	17257,1	2502,9	2502935,9	0,4	3,4	2494,0	210,8	4,8	0,59
-10	14	0,5	16588,3	5,4	16461,6	6,4	16461,4	5,9	16503,8	2393,7	2393669,9	0,4	3,4	2381,1	245,1	5,9	0,49
-10	14	0,1	15317,2	6,1	15678,5	7,5	15443,5	6,1	15479,7	2245,1	2245143,7	1,2	3,4	2230,5	256,2	6,6	0,82
4,4	40	25	13919,8	7,4	13946,7	8,4	13778,3	7,4	13881,6	2013,4	2013357,3	0,7	3,3	1995,1	270,5	7,7	0,58
4,4	40	10	13243,0	8,3	13131,8	9,2	13233,0	8,3	13202,6	1914,9	1914876,1	0,5	3,3	1893,3	286,7	8,6	0,53
4,4	40	5	12478,4	9,3	12508,0	10,7	12530,9	9,3	12505,8	1813,8	1813805,8	0,2	3,3	1787,5	308,0	9,8	0,81
4,4	40	1	11011,5	10,2	10915,0	11,4	11003,4	11,1	10976,6	1592,0	1592023,1	0,5	3,2	1563,2	301,4	10,9	0,61
4,4	40	0,5	10068,4	11,4	10186,9	12,7	10117,7	12,5	10124,4	1468,4	1468412,5	0,6	3,2	1435,2	310,5	12,2	0,69
4,4	40	0,1	8114,9	13,1	8481,7	13,5	8351,1	13,6	8315,9	1206,1	1206116,0	2,2	3,1	1173,3	279,2	13,4	0,29
21,1	70	25	7474,6	13,5	7437,4	13,6	7484,0	13,3	7465,3	1082,8	1082755,7	0,3	3,0	1053,0	252,1	13,5	0,18
21,1	70	10	6414,3	15,0	6251,0	14,5	6359,6	14,0	6341,6	919,8	919775,7	1,3	3,0	890,4	230,7	14,5	0,48
21,1	70	5	5517,5	16,3	5302,5	16,0	5427,6	15,6	5415,9	785,5	785507,6	2,0	2,9	755,2	216,0	16,0	0,38
21,1	70	1	4142,2	17,8	4260,3	17,3	4246,3	17,2	4216,2	611,5	611514,6	1,5	2,8	583,5	183,1	17,4	0,36
21,1	70	0,5	3446,1	18,7	3445,7	18,4	3514,3	18,5	3468,7	503,1	503092,2	1,1	2,7	477,0	159,9	18,5	0,17
21,1	70	0,1	2641,6	19,2	2594,2	19,8	2668,4	20,2	2634,7	382,1	382134,6	1,4	2,6	359,6	129,2	19,8	0,50
37,7	100	25	2459,6	20,9	2424,4	20,9	2416,4	21,2	2433,5	352,9	352943,0	0,9	2,5	329,5	126,5	21,0	0,15
37,7	100	10	2056,6	22,4	2055,3	22,3	2043,2	22,5	2051,7	297,6	297574,0	0,4	2,5	275,2	113,3	22,4	0,11
37,7	100	5	1660,0	21,7	1694,1	21,5	1669,9	21,5	1674,7	242,9	242895,1	1,0	2,4	225,9	89,2	21,5	0,10
37,7	100	1	1276,9	20,9	1256,1	20,3	1241,9	19,1	1258,3	182,5	182497,0	1,4	2,3	171,4	62,8	20,1	0,90
37,7	100	0,5	1076,5	21,4	1087,8	21,2	1092,7	21,5	1085,7	157,5	157466,9	0,8	2,2	146,7	57,3	21,3	0,15
37,7	100	0,1	758,8	22,2	746,2	22,9	752,6	22,2	752,5	109,1	109143,4	0,8	2,0	100,9	41,7	22,4	0,39
54,4	130	25	739,2	22,4	750,0	22,6	752,1	32,7	747,1	108,4	108354,8	0,9	2,0	97,5	47,3	25,9	5,89
54,4	130	10	527,5	20,9	526,4	20,4	529,5	38,1	527,8	76,5	76549,2	0,3	1,9	68,5	34,1	26,5	10,10
54,4	130	5	443,1	18,8	408,5	18,5	424,3	32,9	425,3	61,7	61686,9	4,1	1,8	56,6	24,5	23,4	8,24
54,4	130	1	308,2	16,6	305,2	16,9	287,0	27,5	300,1	43,5	43529,0	3,8	1,6	40,8	15,1	20,3	6,20
54,4	130	0,5	261,7	14,1	260,1	14,8	253,6	24,3	258,5	37,5	37485,7	1,7	1,6	35,7	11,4	17,7	5,72
54,4	130	0,1	175,8	12,4	187,1	13,9	191,1	16,4	184,7	26,8	26783,5	4,3	1,4	26,0	6,6	14,2	2,00

**BLACK SPACE**

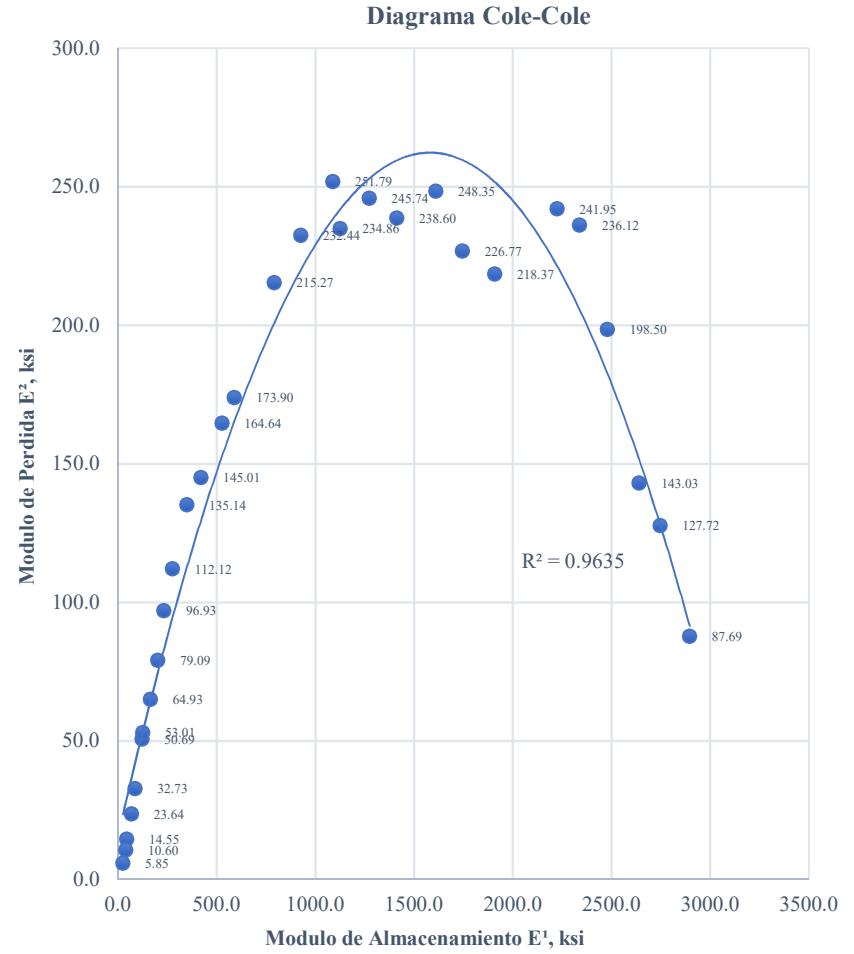
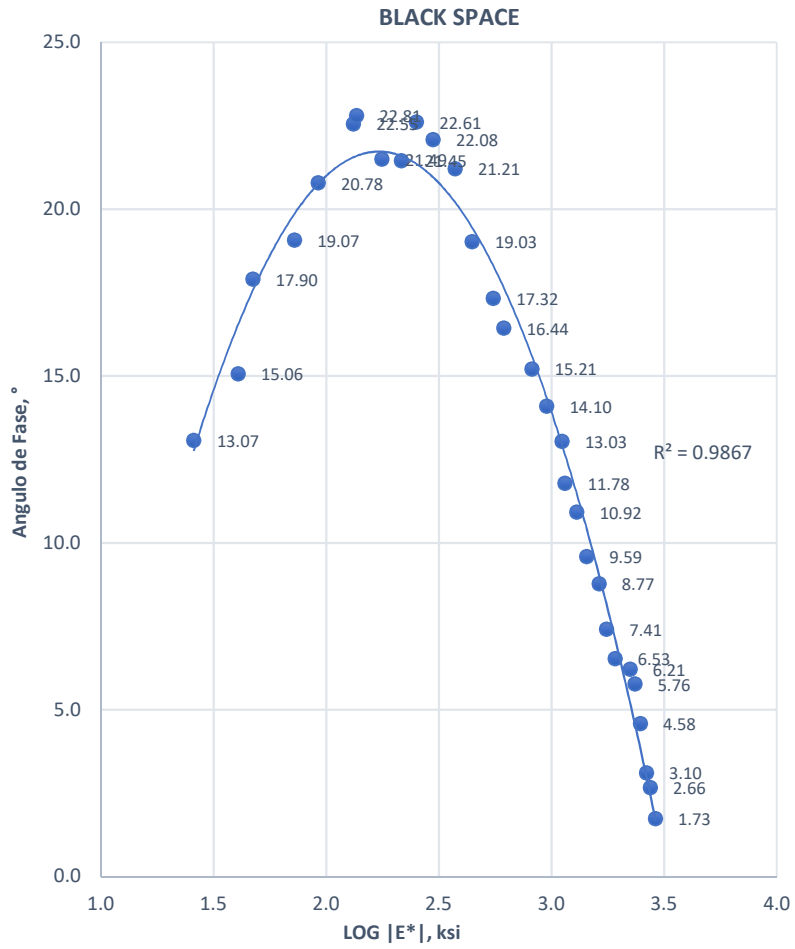


**Diagrama Cole-Cole**



**Apéndice R. Práctica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (1%)**

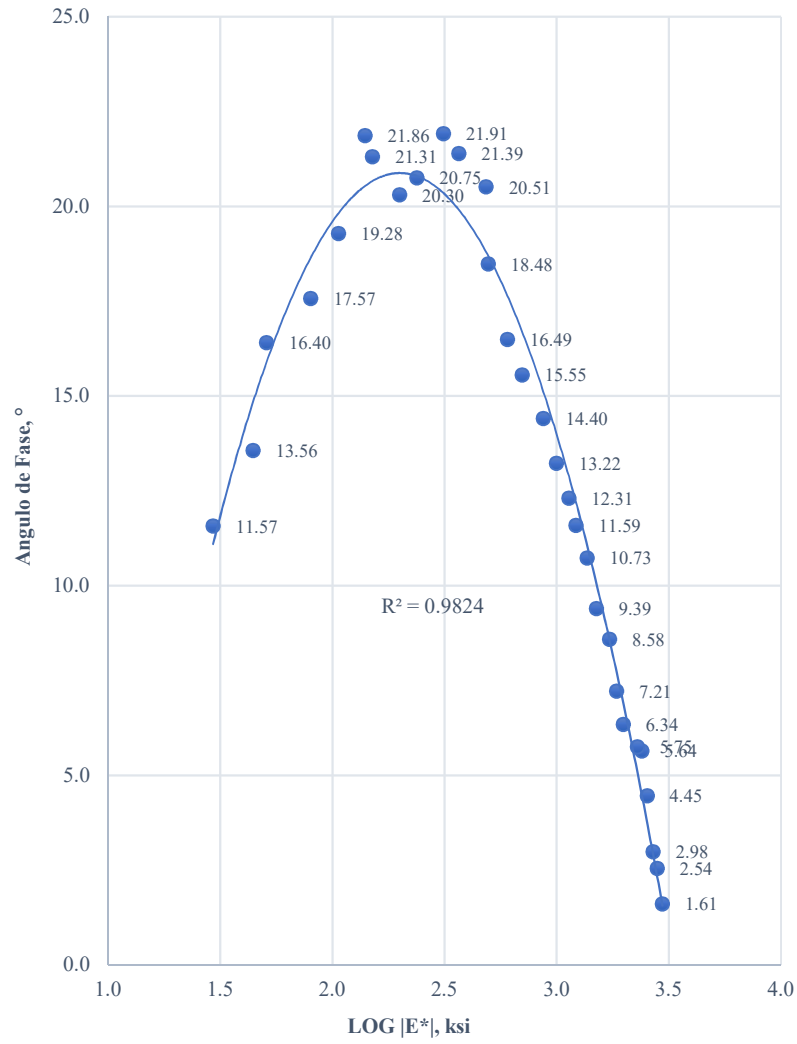
PRACTICA ESTÁNDAR PARA EL DESARROLLO DE LA CURVA MAESTRA DEL MODULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS																	
DESIGNACION: AASHTO R 62-13																	
MEZCLA: MDF-19 + 1.0% Cemento (CLIENTE: IGC-1017-48)																	
Metodo Estandar de Prueba para la Determinacion del Modulo Dinamico de Mezclas de Concreto Asfaltico en Caliente AASHTO T 342-11																	
Condiciones			Especimen 1		Especimen 2		Especimen 3		Modulo Dinamico [E*]						Angulo de Fase δ		
Temperatura, °C	Temperatura, °F	Frecuencia, Hz	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Promedio, Mpa	Promedio, ksi	Promedio, psi	Coeficiente de Variación	LOG [E*], ksi	Modulo de Almacenamiento E', ksi	Modulo de Perdida E'', ksi	Promedio	Desviacion Estandar, °
-10	14	25	20195,6	1,3	19797,7	2,4	19938,8	1,5	19977,4	2897,5	2897474,0	1,0	3,5	2896,1	87,7	1,7	0,59
-10	14	10	18859,6	2,3	19021,9	3,6	18984,5	2,0	18955,3	2749,2	2749239,8	0,4	3,4	2746,3	127,7	2,7	0,85
-10	14	5	18287,0	3,2	18147,7	3,0	18230,8	3,1	18221,9	2642,9	2642858,0	0,4	3,4	2639,0	143,0	3,1	0,07
-10	14	1	17150,9	4,3	17070,3	4,9	17207,8	4,5	17143,0	2486,4	2486378,7	0,4	3,4	2478,4	198,5	4,6	0,32
-10	14	0,5	16313,7	5,2	16188,0	6,1	16122,9	6,0	16208,2	2350,8	2350799,9	0,6	3,4	2338,9	236,1	5,8	0,49
-10	14	0,1	15387,8	6,8	15384,7	5,5	15515,4	6,3	15429,3	2237,8	2237832,0	0,5	3,3	2224,7	241,9	6,2	0,62
4,4	40	25	13074,4	6,7	13631,4	6,3	13014,0	6,6	13239,9	1920,3	1920285,8	2,6	3,3	1907,8	218,4	6,5	0,21
4,4	40	10	12116,5	7,5	12146,2	7,6	12128,9	7,1	12130,5	1759,4	1759383,8	0,1	3,2	1744,7	226,8	7,4	0,26
4,4	40	5	11087,2	8,6	11393,3	8,8	11207,1	8,8	11229,2	1628,7	1628656,7	1,4	3,2	1609,6	248,4	8,8	0,12
4,4	40	1	9928,5	9,3	9849,0	9,6	9859,5	9,8	9879,0	1432,8	1432827,2	0,4	3,2	1412,8	238,6	9,6	0,24
4,4	40	0,5	9017,9	10,6	8880,6	10,9	8932,9	11,2	8943,8	1297,2	1297185,7	0,8	3,1	1273,7	245,7	10,9	0,29
4,4	40	0,1	7975,2	11,8	7945,2	11,8	7869,7	11,7	7930,0	1150,2	1150151,0	0,7	3,1	1125,9	234,9	11,8	0,06
21,1	70	25	7714,7	12,9	7660,2	13,0	7717,2	13,2	7697,4	1116,4	1116409,4	0,4	3,0	1087,6	251,8	13,0	0,16
21,1	70	10	6531,3	14,2	6524,3	14,0	6682,6	14,2	6579,4	954,3	954258,8	1,4	3,0	925,5	232,4	14,1	0,13
21,1	70	5	5650,6	15,5	5628,4	15,0	5698,0	15,2	5659,0	820,8	820763,8	0,6	2,9	792,0	215,3	15,2	0,27
21,1	70	1	4269,6	16,4	4245,4	16,3	4197,4	16,6	4237,5	614,6	614594,5	0,9	2,8	589,5	173,9	16,4	0,12
21,1	70	0,5	3865,4	17,3	3804,2	17,2	3768,3	17,4	3812,6	553,0	552975,5	1,3	2,7	527,9	164,6	17,3	0,12
21,1	70	0,1	3090,7	19,4	3074,1	18,7	3036,0	19,0	3066,9	444,8	444821,3	0,9	2,6	420,5	145,0	19,0	0,30
37,7	100	25	2622,7	20,9	2593,5	21,1	2511,1	21,6	2575,8	373,6	373586,5	2,2	2,6	348,3	135,1	21,2	0,36
37,7	100	10	2033,2	22,3	2085,7	22,3	2050,5	21,6	2056,5	298,3	298263,3	1,3	2,5	276,4	112,1	22,1	0,39
37,7	100	5	1745,8	22,7	1725,8	22,8	1743,8	22,3	1738,5	252,1	252146,2	0,6	2,4	232,8	96,9	22,6	0,26
37,7	100	1	1498,3	21,1	1475,1	22,1	1501,0	21,2	1491,5	216,3	216321,6	1,0	2,3	201,3	79,1	21,4	0,54
37,7	100	0,5	1241,2	22,4	1233,8	21,2	1190,2	20,9	1221,7	177,2	177196,5	2,3	2,2	164,9	64,9	21,5	0,83
37,7	100	0,1	910,1	23,3	914,3	22,5	909,3	21,9	911,2	132,2	132162,4	0,3	2,1	122,1	50,7	22,6	0,75
54,4	130	25	962,9	22,9	943,1	22,7	923,1	22,8	943,0	136,8	136774,1	2,1	2,1	126,1	53,0	22,8	0,11
54,4	130	10	629,1	20,5	639,8	20,9	639,1	20,9	636,0	92,2	92240,8	0,9	2,0	86,2	32,7	20,8	0,23
54,4	130	5	503,0	19,1	512,4	19,0	481,1	19,1	498,8	72,4	72352,0	3,2	1,9	68,4	23,6	19,1	0,09
54,4	130	1	332,4	17,3	330,3	19,7	316,1	16,7	326,3	47,3	47318,8	2,7	1,7	45,0	14,5	17,9	1,58
54,4	130	0,5	273,8	15,2	278,8	15,1	290,6	14,9	281,1	40,8	40767,0	3,1	1,6	39,4	10,6	15,1	0,11
54,4	130	0,1	167,2	13,2	185,3	13,2	183,2	12,8	178,6	25,9	25896,6	5,6	1,4	25,2	5,9	13,1	0,21



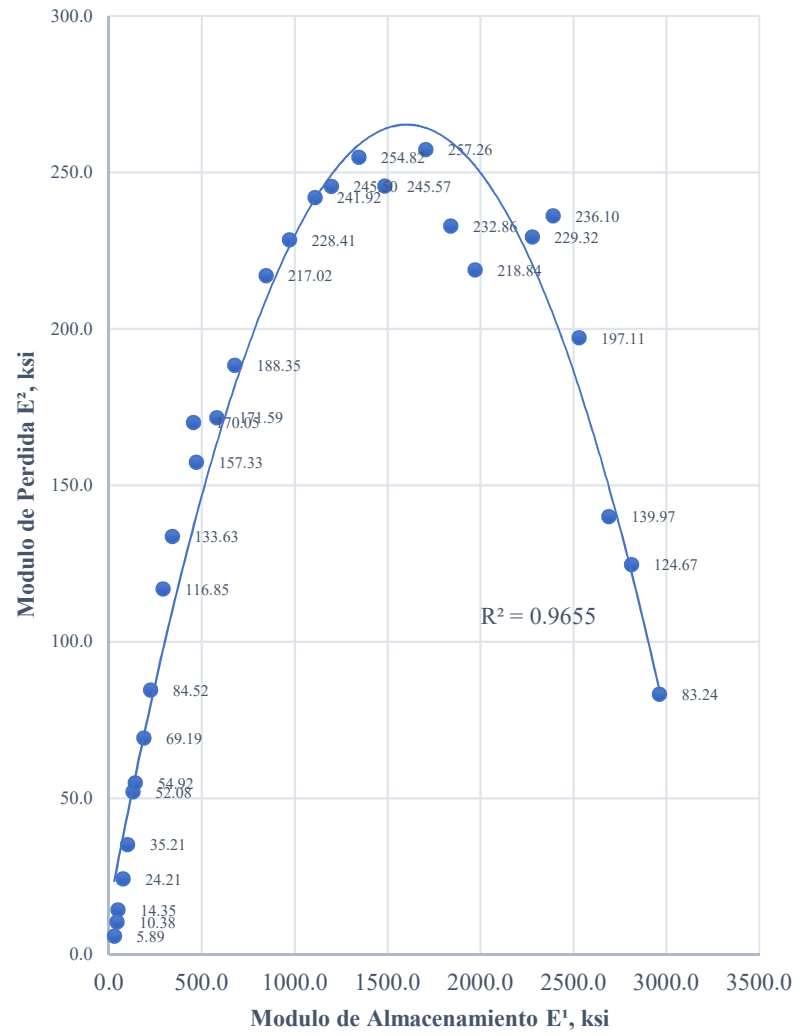
**Apéndice S. Practica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (2%).**

PRACTICA ESTÁNDAR PARA EL DESARROLLO DE LA CURVA MAESTRA DEL MODULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS																	
DESIGNACION: AASHTO R 62-13																	
MEZCLA: MDF-19 + 2.0% Cemento (CLIENTE: IGC-1017-48)																	
Metodo Estandar de Prueba para la Determinacion del Modulo Dinamico de Mezclas de Concreto Asfaltico en Caliente																	
Condiciones			Especimen 1		Especimen 2		Especimen 3		Modulo Dinamico  E'							Angulo de Fase δ	
Temperatura, °C	Temperatura, °F	Frecuencia, Hz	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Promedio, Mpa	Promedio, ksi	Promedio, psi	Coefficiente de Variacion, %	LOG  E' , ksi	Modulo de Almacenamiento E', ksi	Modulo de Perdida E'', ksi	Promedio	Desviacion Estandar
-10	14	25	20650,7	1,2	20252,9	2,3	20393,9	1,4	20432,5	2963,5	2963484,2	1,0	3,5	2962,3	83,2	1,6	0,59
-10	14	10	19314,7	2,2	19477,1	3,5	19439,6	1,9	19410,5	2815,3	2815250,0	0,4	3,4	2812,5	124,7	2,5	0,85
-10	14	5	18642,1	3,1	18502,9	2,9	18586,0	3,0	18577,0	2694,4	2694364,4	0,4	3,4	2690,7	140,0	3,0	0,07
-10	14	1	17506,0	4,2	17425,4	4,8	17562,9	4,4	17498,1	2537,9	2537885,2	0,4	3,4	2530,2	197,1	4,5	0,32
-10	14	0,5	16668,8	5,1	16543,1	6,0	16478,0	5,9	16563,3	2402,3	2402306,4	0,6	3,4	2390,7	236,1	5,6	0,49
-10	14	0,1	15742,9	6,6	15739,9	5,4	15870,5	5,2	15784,4	2289,3	2289338,4	0,5	3,4	2277,8	229,3	5,7	0,78
4,4	40	25	13774,5	6,5	13726,5	6,1	13509,1	6,5	13670,0	1982,7	1982670,5	1,0	3,3	1970,6	218,8	6,3	0,21
4,4	40	10	12611,7	7,3	13135,1	7,4	12614,0	6,9	12786,9	1854,6	1854584,9	2,4	3,3	1839,9	232,9	7,2	0,26
4,4	40	5	11582,3	8,4	12088,4	8,6	12002,3	8,7	11891,0	1724,6	1724641,8	2,3	3,2	1705,3	257,3	8,6	0,12
4,4	40	1	10423,7	9,1	10344,1	9,4	10354,6	9,6	10374,1	1504,6	1504639,4	0,4	3,2	1484,5	245,6	9,4	0,24
4,4	40	0,5	9513,0	10,5	9375,7	10,7	9428,0	11,0	9438,9	1369,0	1368997,8	0,7	3,1	1345,1	254,8	10,7	0,29
4,4	40	0,1	8470,3	11,6	8440,3	11,6	8364,8	11,5	8425,1	1222,0	1221963,1	0,6	3,1	1197,0	245,5	11,6	0,06
21,1	70	25	7770,4	12,1	7716,0	12,2	7993,0	12,6	7826,5	1135,1	1135136,3	1,9	3,1	1109,1	241,9	12,3	0,25
21,1	70	10	6837,1	13,4	6830,0	13,2	6988,3	13,1	6885,2	998,6	998609,1	1,3	3,0	972,1	228,4	13,2	0,14
21,1	70	5	6006,4	14,7	5984,1	14,2	6053,8	14,3	6014,8	872,4	872365,9	0,6	2,9	844,9	217,0	14,4	0,27
21,1	70	1	4875,4	15,6	4851,1	15,6	4803,2	15,5	4843,3	702,5	702456,0	0,8	2,8	676,7	188,3	15,6	0,06
21,1	70	0,5	4221,2	16,5	4160,0	16,4	4124,1	16,5	4168,4	604,6	604577,6	1,2	2,8	579,7	171,6	16,5	0,05
21,1	70	0,1	3446,5	18,6	3429,9	18,0	3391,8	18,9	3422,7	496,4	496423,4	0,8	2,7	470,8	157,3	18,5	0,48
37,7	100	25	3393,0	20,2	3363,8	20,4	3281,4	20,9	3346,1	485,3	485304,7	1,7	2,7	454,5	170,0	20,5	0,36
37,7	100	10	2503,4	21,6	2556,0	21,6	2520,8	20,9	2526,7	366,5	366470,1	1,1	2,6	341,2	133,6	21,4	0,39
37,7	100	5	2166,1	22,0	2146,1	22,1	2164,1	21,6	2158,8	313,1	313101,2	0,5	2,5	290,5	116,8	21,9	0,26
37,7	100	1	1651,6	20,4	1628,4	21,4	1654,3	20,5	1644,8	238,6	238551,5	0,9	2,4	223,1	84,5	20,8	0,54
37,7	100	0,5	1394,4	21,2	1387,1	20,0	1343,5	19,7	1375,0	199,4	199426,4	2,0	2,3	187,0	69,2	20,3	0,83
37,7	100	0,1	963,4	22,6	967,5	21,8	962,6	21,2	964,5	139,9	139888,6	0,3	2,1	129,8	52,1	21,9	0,75
54,4	130	25	1062,0	21,4	1042,2	21,2	1022,2	21,3	1042,1	151,1	151147,7	1,9	2,2	140,8	54,9	21,3	0,11
54,4	130	10	728,2	19,0	738,9	19,4	738,2	19,4	735,1	106,6	106614,4	0,8	2,0	100,6	35,2	19,3	0,23
54,4	130	5	557,1	17,6	566,5	17,5	555,2	17,6	553,0	80,2	80198,9	2,9	1,9	76,5	24,2	17,6	0,09
54,4	130	1	356,5	15,8	354,4	18,2	340,2	15,2	350,4	50,8	50814,6	2,5	1,7	48,7	14,3	16,4	1,58
54,4	130	0,5	297,9	13,7	302,9	13,6	314,7	13,4	305,2	44,3	44262,8	2,8	1,6	43,0	10,4	13,6	0,11
54,4	130	0,1	191,3	11,7	209,4	11,7	207,3	11,3	202,7	29,4	29392,5	4,9	1,5	28,8	5,9	11,6	0,21

**BLACK SPACE**



**Diagrama Cole-Cole**

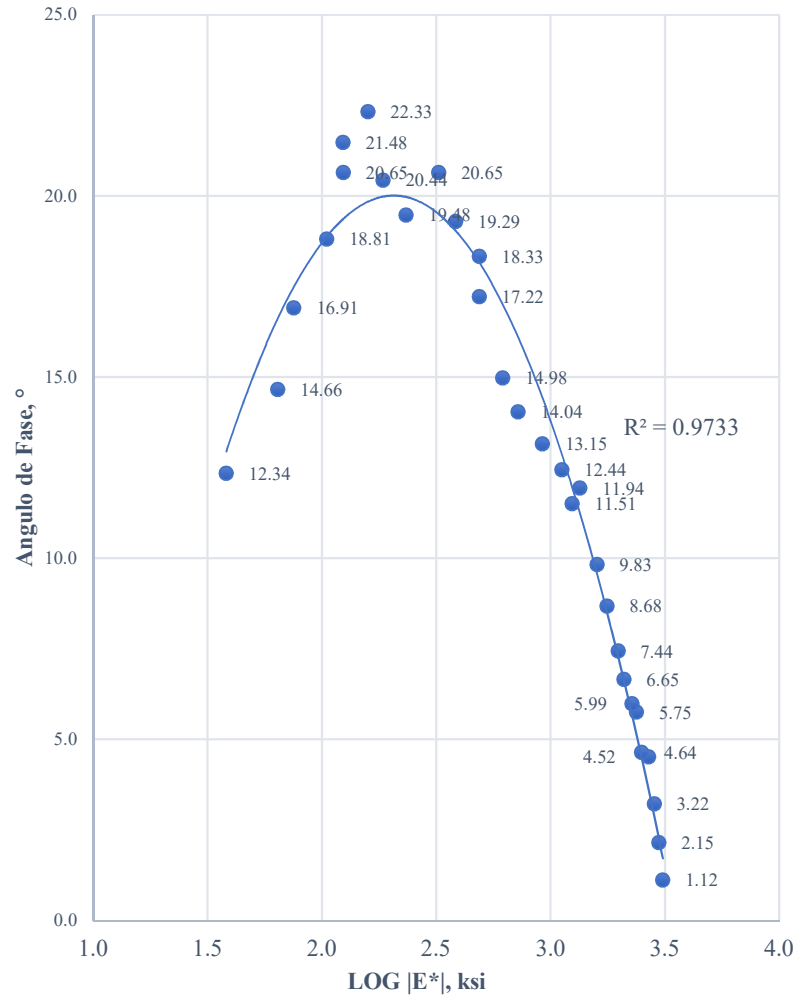


**Apéndice T. Practica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (3%).**

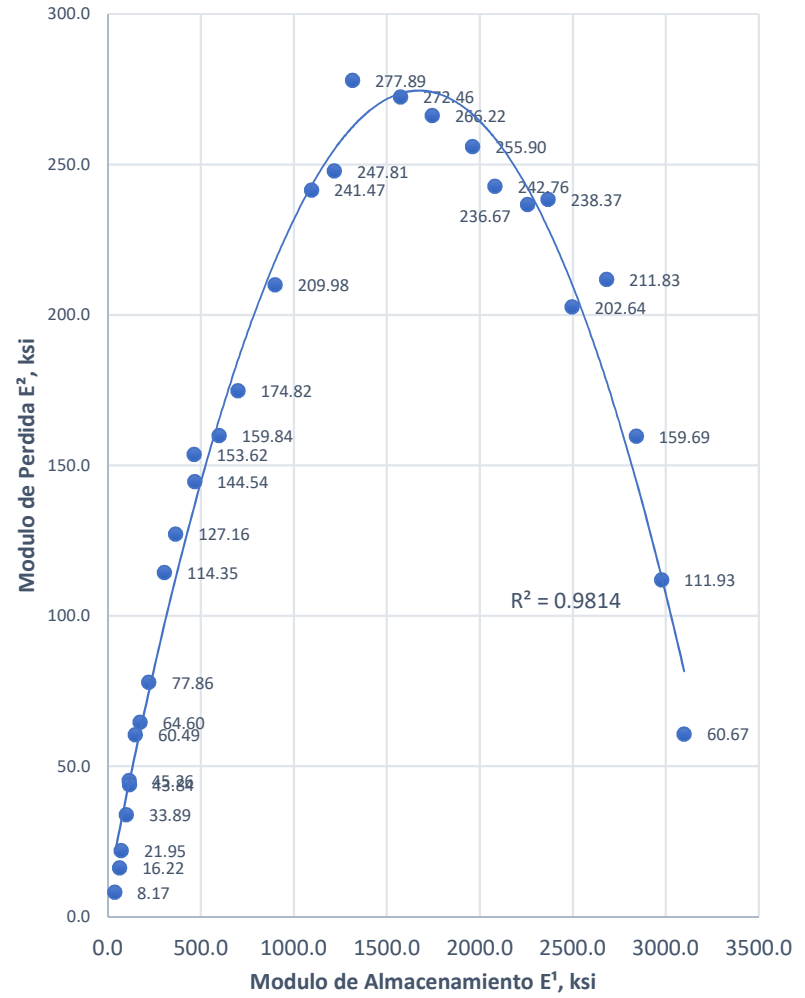
PRACTICA ESTÁNDAR PARA EL DESARROLLO DE LA CURVA MAESTRA DEL MODULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS																	
DESIGNACION: AASHTO R 62-13																	
MEZCLA: MDF-19 + 3.0% Cemento (CLIENTE: IGC-1017-48)																	
Metodo Estandar de Prueba para la Determinacion del Modulo Dinamico de Mezclas de Concreto Asfaltico en Caliente																	
Condiciones			Especimen 1		Especimen 2		Especimen 3		Modulo Dinamico  E'					Angulo de Fase δ			
Temperatura, °C	Temperatura, °F	Frecuencia, Hz	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Promedio, Mpa	Promedio, ksi	Promedio, psi	Coefficiente de Variacion	LOG  E' , ksi	Modulo de Almacenamiento E', ksi	Modulo de Perdida	Promedio	Desviacion Estandar
-10	14	25	21524,2	1,0	21105,4	1,1	21469,0	1,2	21366,2	3098,9	3098902,1	1,1	3,5	3098,3	60,7	1,1	0,13
-10	14	10	20846,1	2,0	20389,2	2,6	20369,4	1,9	20534,9	2978,3	2978337,3	1,3	3,5	2976,2	111,9	2,2	0,35
-10	14	5	19657,2	3,3	19693,1	3,3	19495,0	3,1	19615,1	2844,9	2844930,6	0,5	3,5	2840,4	159,7	3,2	0,15
-10	14	1	18369,3	4,2	18866,0	4,9	18380,7	4,4	18538,7	2688,8	2688806,1	1,5	3,4	2680,4	211,8	4,5	0,34
-10	14	0,5	17096,5	4,9	17068,4	4,5	17613,4	4,5	17259,4	2503,3	2503265,6	1,8	3,4	2495,1	202,6	4,6	0,24
-10	14	0,1	16134,9	6,3	16460,9	5,5	16597,6	5,5	16397,8	2378,3	2378300,6	1,4	3,4	2366,3	238,4	5,8	0,52
4,4	40	25	15917,5	6,5	15440,8	5,9	15563,1	5,6	15640,5	2268,5	2268460,3	1,6	3,4	2256,1	236,7	6,0	0,43
4,4	40	10	14429,2	7,4	14402,8	6,4	14513,2	6,1	14448,4	2095,6	2095562,8	0,4	3,3	2081,5	242,8	6,7	0,64
4,4	40	5	13542,9	7,9	13743,7	7,1	13598,2	7,4	13628,3	1976,6	1976616,6	0,8	3,3	1960,0	255,9	7,4	0,41
4,4	40	1	12082,2	9,9	12194,3	8,0	12209,9	8,2	12162,1	1764,0	1763968,4	0,6	3,2	1743,8	266,2	8,7	1,02
4,4	40	0,5	10975,7	10,2	11020,9	9,6	11015,7	9,7	11004,1	1596,0	1596008,5	0,2	3,2	1572,6	272,5	9,8	0,30
4,4	40	0,1	9255,8	11,9	9195,4	12,0	9338,7	11,9	9263,3	1343,5	1343526,2	0,8	3,1	1314,5	277,9	11,9	0,06
21,1	70	25	8546,5	11,7	8605,7	11,0	8538,9	11,7	8563,7	1242,1	1242058,0	0,4	3,1	1217,1	247,8	11,5	0,41
21,1	70	10	7723,1	12,7	7758,8	12,1	7699,5	12,5	7727,1	1120,7	1120724,1	0,4	3,0	1094,4	241,5	12,4	0,26
21,1	70	5	6408,9	13,0	6296,0	13,2	6380,6	13,2	6361,9	922,7	922711,2	0,9	3,0	898,5	210,0	13,2	0,10
21,1	70	1	4954,7	14,1	4986,1	14,0	4961,4	14,1	4967,4	720,5	720462,8	0,3	2,9	698,9	174,8	14,0	0,04
21,1	70	0,5	4238,2	15,0	4289,3	14,7	4265,1	15,3	4264,2	618,5	618473,0	0,6	2,8	597,5	159,8	15,0	0,30
21,1	70	0,1	3355,7	17,8	3386,3	17,0	3358,0	16,9	3366,7	488,3	488295,2	0,5	2,7	466,4	144,5	17,2	0,52
37,7	100	25	3353,6	18,3	3393,3	18,4	3353,6	18,3	3367,5	488,4	488413,9	0,7	2,7	463,6	153,6	18,3	0,06
37,7	100	10	2676,3	19,5	2663,6	19,0	2621,3	19,3	2653,7	384,9	384893,5	1,1	2,6	363,3	127,2	19,3	0,25
37,7	100	5	2208,8	20,9	2241,6	20,6	2255,9	20,4	2255,4	324,2	324219,3	1,1	2,5	303,4	114,3	20,7	0,22
37,7	100	1	1600,9	20,1	1687,2	19,2	1542,4	19,1	1610,2	233,5	233533,2	4,5	2,4	220,2	77,9	19,5	0,55
37,7	100	0,5	1285,3	21,1	1288,6	20,0	1252,9	20,1	1275,6	185,0	185013,0	1,5	2,3	173,4	64,6	20,4	0,61
37,7	100	0,1	856,3	22,1	850,7	21,2	850,0	21,2	852,3	123,6	123619,7	0,4	2,1	115,0	45,3	21,5	0,52
54,4	130	25	1083,4	22,4	1099,0	22,1	1110,9	22,5	1097,8	159,2	159215,9	1,3	2,2	147,3	60,5	22,3	0,23
54,4	130	10	825,6	21,0	873,7	21,1	872,2	19,8	857,2	124,3	124320,5	3,2	2,1	116,3	43,8	20,6	0,77
54,4	130	5	717,0	19,7	721,1	19,4	735,9	17,3	724,7	105,1	105102,8	1,4	2,0	99,5	33,9	18,8	1,31
54,4	130	1	520,0	17,5	516,2	18,0	524,9	15,3	520,4	75,5	75473,2	0,8	1,9	72,2	22,0	16,9	1,41
54,4	130	0,5	443,5	15,6	440,1	14,9	442,4	13,5	442,0	64,1	64106,5	0,4	1,8	62,0	16,2	14,7	1,04
54,4	130	0,1	260,9	12,7	266,7	11,9	262,9	12,5	263,5	38,2	38214,6	1,1	1,6	37,3	8,2	12,3	0,42



**BLACK SPACE**



**Diagrama Cole-Cole**



**Apéndice U. Práctica estándar para el desarrollo de la curva maestra del módulo dinámico de mezclas asfálticas (4%).**

PRACTICA ESTÁNDAR PARA EL DESARROLLO DE LA CURVA MAESTRA DEL MODULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS																	
DESIGNACION: AASHTO R 62-13																	
MEZCLA: MDF-19 + 4.0% Cemento (CLIENTE: IGC-1017-48)																	
Metodo Estandar de Prueba para la Determinacion del Modulo Dinamico de Mezclas de Concreto Asfaltico en Caliente																	
Condiciones			Especimen 1		Especimen 2		Especimen 3		Modulo Dinamico  E'							Angulo de Fase δ	
Temperatura, °C	Temperatura, °F	Frecuencia, Hz	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Modulos, Mpa	Angulo de Fase, °	Promedio, Mpa	Promedio, ksi	Promedio, psi	Coefficiente de Variacion, %	LOG  E' , ksi	Modulo de Almacenamiento E', ksi	Modulo de Perdida	Promedio	Desviacion Estandar
-10	14	25	21360,9	1,8	21303,0	1,4	21444,1	1,3	21369,3	3099,4	3099358,7	0,3	3,5	3098,3	80,6	1,5	0,28
-10	14	10	20604,9	2,3	20007,2	2,6	20189,8	2,0	20267,3	2939,5	2939521,5	1,5	3,5	2937,1	118,2	2,3	0,30
-10	14	5	19552,3	3,0	19403,0	3,0	19636,1	3,1	19530,5	2832,7	2832656,2	0,6	3,5	2828,7	148,8	3,0	0,05
-10	14	1	18256,2	4,3	18375,5	4,9	18613,1	4,5	18414,9	2670,9	2670858,9	1,0	3,4	2662,4	212,1	4,6	0,32
-10	14	0,5	17619,0	4,0	17493,3	4,9	17628,2	5,1	17580,1	2549,8	2549783,8	0,4	3,4	2541,4	206,6	4,6	0,59
-10	14	0,1	16393,1	4,9	16290,0	5,7	16520,7	6,3	16401,3	2378,8	2378800,8	0,7	3,4	2367,2	234,2	5,6	0,68
4,4	40	25	15224,6	5,5	15296,6	5,4	15299,2	5,1	15273,5	2215,2	2215232,5	0,3	3,3	2205,7	205,8	5,3	0,19
4,4	40	10	14261,8	6,3	13963,2	6,1	14464,1	6,4	14229,7	2063,8	2063844,2	1,8	3,3	2051,4	226,3	6,3	0,15
4,4	40	5	12952,4	6,9	12958,5	7,5	13452,4	7,2	13121,1	1903,1	1903056,4	2,2	3,3	1888,1	238,3	7,2	0,28
4,4	40	1	12123,8	8,5	11964,2	8,3	12454,8	8,0	12180,9	1766,7	1766692,3	2,1	3,2	1748,2	254,8	8,3	0,26
4,4	40	0,5	11763,1	9,3	11525,8	9,1	11278,1	9,8	11522,4	1671,2	1671177,9	2,1	3,2	1648,7	273,0	9,4	0,39
4,4	40	0,1	10420,5	10,1	10190,4	10,5	10114,9	10,0	10241,9	1485,5	1485466,5	1,6	3,2	1461,9	263,6	10,2	0,25
21,1	70	25	8345,6	11,7	8491,1	11,9	8418,2	10,9	8418,3	1221,0	1220969,9	0,9	3,1	1196,5	243,3	11,5	0,51
21,1	70	10	7112,2	13,2	7115,2	12,9	7173,5	12,1	7133,6	1034,6	1034646,3	0,5	3,0	1009,2	228,2	12,7	0,55
21,1	70	5	6501,5	13,9	6429,3	14,1	6328,9	13,3	6419,9	931,1	931125,7	1,4	3,0	904,4	221,5	13,8	0,43
21,1	70	1	5410,6	15,8	5306,3	14,9	5158,4	14,7	5291,7	767,5	767500,8	2,4	2,9	740,9	200,5	15,1	0,60
21,1	70	0,5	4846,3	16,7	4685,1	16,1	4549,2	16,7	4693,6	680,7	680742,0	3,2	2,8	652,6	193,8	16,5	0,34
21,1	70	0,1	3871,6	18,2	3855,0	18,2	3816,9	18,1	3847,9	558,1	558083,9	0,7	2,7	530,3	173,9	18,2	0,04
37,7	100	25	3753,1	18,2	3783,9	18,4	3801,5	19,9	3779,5	548,2	548172,3	0,6	2,7	518,8	177,2	18,9	0,93
37,7	100	10	3153,6	20,4	3006,1	20,9	2940,9	20,4	3033,5	440,0	439973,8	3,6	2,6	411,9	154,5	20,6	0,26
37,7	100	5	2656,2	21,1	2536,2	21,7	2474,2	21,6	2555,5	370,7	370650,7	3,6	2,6	345,0	135,6	21,5	0,36
37,7	100	1	1801,7	22,4	1728,5	22,4	1664,4	22,5	1731,5	251,1	251139,4	4,0	2,4	232,1	95,8	22,4	0,06
37,7	100	0,5	1544,6	21,1	1497,2	20,9	1433,6	21,7	1491,8	216,4	216365,4	3,7	2,3	201,7	78,4	21,2	0,39
37,7	100	0,1	1113,5	22,6	1087,7	22,2	1052,7	22,1	1084,6	157,3	157311,0	2,8	2,2	145,5	59,7	22,3	0,28
54,4	130	25	1137,3	22,4	1117,5	22,6	1097,6	21,3	1117,5	162,1	162077,3	1,8	2,2	150,2	60,9	22,1	0,68
54,4	130	10	783,5	20,8	849,6	21,8	808,9	20,4	814,0	118,1	118062,1	4,1	2,1	110,2	42,3	21,0	0,70
54,4	130	5	612,5	18,0	677,2	18,6	646,0	18,8	645,2	93,6	93580,4	5,0	2,0	88,8	29,6	18,5	0,39
54,4	130	1	391,8	16,8	425,1	16,1	410,9	16,3	409,3	59,4	59361,5	4,1	1,8	56,9	16,8	16,4	0,32
54,4	130	0,5	333,3	14,4	373,6	14,1	350,1	14,5	352,3	51,1	51100,3	5,8	1,7	49,5	12,7	14,4	0,20
54,4	130	0,1	246,6	12,1	260,1	12,2	242,7	12,2	249,8	36,2	36229,9	3,7	1,6	35,4	7,6	12,2	0,05

BLACK SPACE

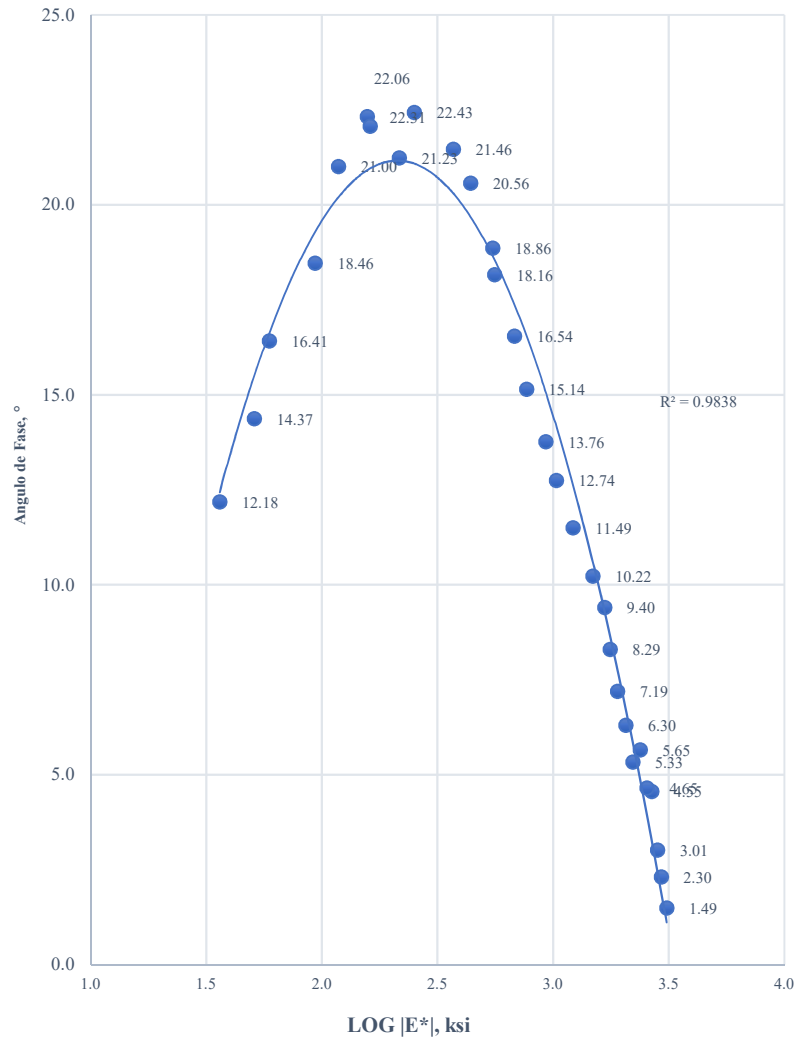
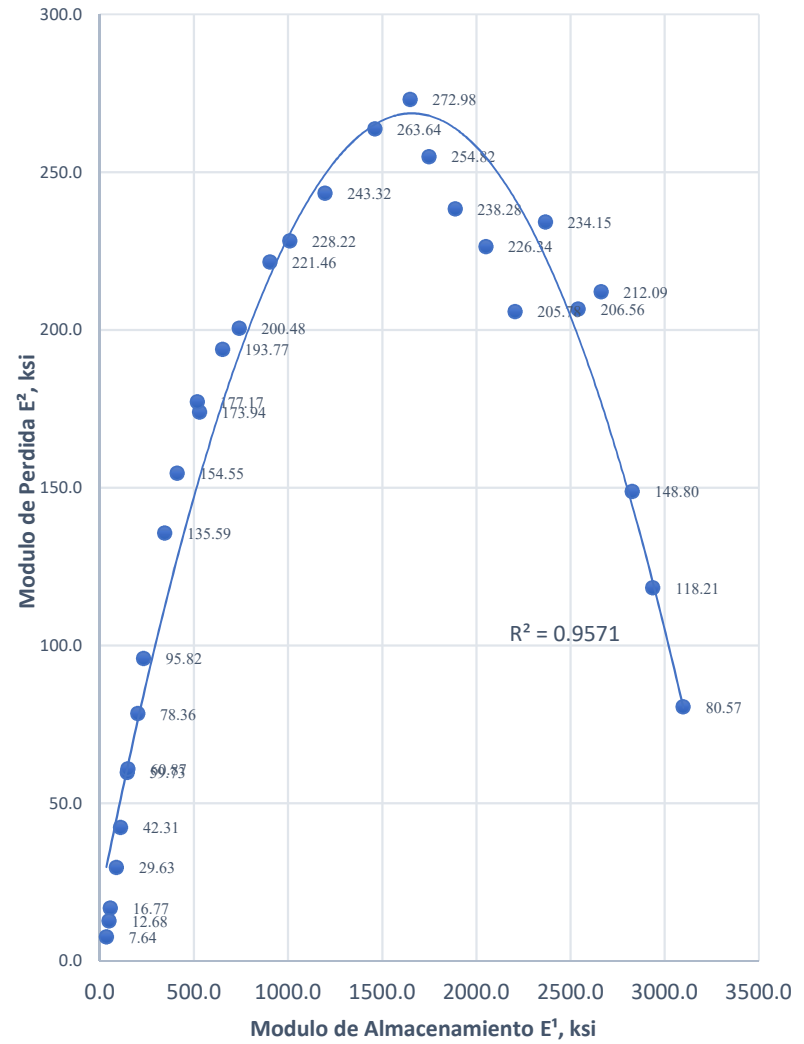
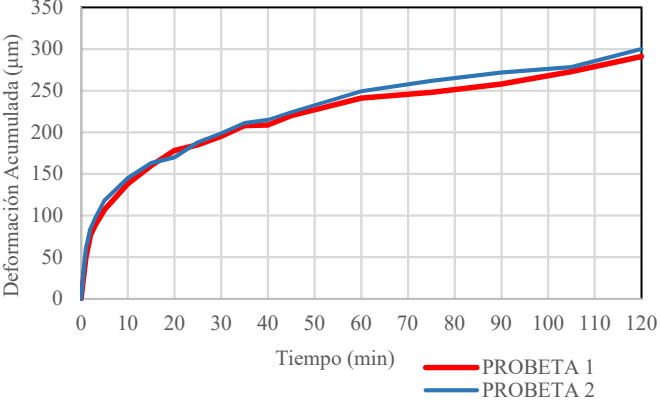


Diagrama Cole-Cole

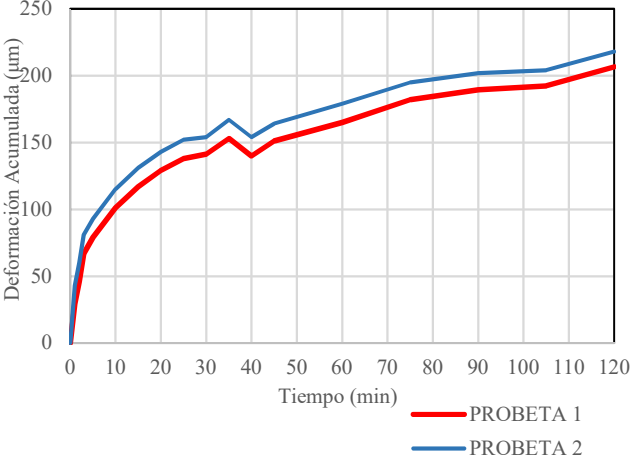


## ANÁLISIS DE LA VIDA A FATIGA MEZCLA DENSA FRÍA

## Apéndice V. Resistencia a la deformación plástica (0%)

				<b>RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE LABORATORIO INV E-756-13</b>	
		<b>Tipo de Mezcla:</b>		<b>Condiciones de Ensayo:</b>	
		MDF-19 + EA CRL-1 + 0.0% CEMENTO (Espécimen 1 y 2)		SIN Inmerso en Agua	Temperatura= 22.0 °C
Pasada	Tiempo (Min)	Deformación promedio acumulada (mm)	VELOCIDAD PROMEDIO DE DEFORMACIÓN (µM/MIN)	<b>DEFORMACIÓN PLÁSTICA</b> 	
0	0	0,00	0		
54	1	0,55	545,0		
107	2	0,80	255,0		
161	3	0,93	125,0		
268	5	1,13	100,0		
536	10	1,42	58,0		
804	15	1,62	40,0		
1072	20	1,74	25,0		
1340	25	1,87	25,0		
1608	30	1,97	20,8		
1876	35	2,10	25,3		
2144	40	2,12	5,0		
2412	45	2,22	20,0		
3216	60	2,45	15,3		
4020	75	2,55	6,7	<b>Procedencia de la mezcla:</b>	<b>Compactada en Laboratorio</b>
4824	90	2,65	6,7	<b>Masa del espécimen (g):</b>	<b>10271</b>
5628	105	2,76	7,2	<b>Altura promedio de espécimen (mm):</b>	<b>50</b>
6432	120	2,96	13,2	<b>Longitud promedio de espécimen (mm):</b>	<b>300</b>
<b>Observaciones:</b>				<b>Deformación Promedio total al final del ensayo (mm):</b>	<b>2,96</b>
				<b>V<sub>30/45</sub> (µm/min)</b>	<b>16,8</b>
				<b>V<sub>75/90</sub> (µm/min)</b>	<b>6,7</b>
				<b>V<sub>105/120</sub> (µm/min)</b>	<b>13,17</b>

### Apéndice W. Resistencia a la deformación plástica (1%)

				<b>RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE LABORATORIO INV E-756-13</b>	
		<b>Tipo de Mezcla:</b>		<b>Condiciones de Ensayo:</b>	
		MDF-19 + EA CRL-1 + 1% CEMENTO (Especimen 1 y 2)		SIN Inmerso en Agua	Temperatura= 22.0 °C
<b>PASAD A</b>	<b>TIEMP O (min)</b>	<b>DEFORMACIÓ N PROMEDIO ACUMULADA (mm)</b>	<b>VELOCIDAD PROMEDIO DE DEFORMACIÓ N (µm/min)</b>	<b>DEFORMACIÓN PLÁSTICA</b> 	
0	0	0,00	0		
54	1	0,36	360,1		
107	2	0,53	170,0		
161	3	0,74	210,0		
268	5	0,86	60,0		
536	10	1,08	44,0		
804	15	1,24	32,0		
1072	20	1,36	24,0		
1340	25	1,45	18,0		
1608	30	1,48	5,2		
1876	35	1,60	24,8		
2144	40	1,47	-26,0		
2412	45	1,58	21,2		
3216	60	1,72	9,6		
4020	75	1,89	11,0	<b>Procedencia de la mezcla:</b>	<b>Compactada en Laboratorio</b>
4824	90	1,96	4,8	<b>Masa del espécimen (g):</b>	<b>10271</b>
5628	105	1,98	1,7	<b>Altura promedio de espécimen (mm):</b>	<b>50</b>
6432	120	2,12	9,4	<b>Longitud promedio de espécimen (mm):</b>	<b>300</b>
<b>Observaciones:</b>				<b>Deformación Promedio total al final del ensayo (mm):</b>	<b>2,12</b>
				<b>V<sub>30/45</sub> (µm/min)</b>	<b>6,7</b>
				<b>V<sub>75/90</sub> (µm/min)</b>	<b>4,8</b>
				<b>V<sub>105/120</sub> (µm/min)</b>	<b>9,40</b>

### Apéndice X. Resistencia a la deformación plástica (2%)

				<b>RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE LABORATORIO INV E-756-13</b>	
		<b>Tipo de Mezcla:</b>		<b>Condiciones de Ensayo:</b>	
		MDF-19 + EA CRL-1 + 2% CEMENTO (Especimen 1 y 2)		SIN Inmerso en Agua	Temperatura= 22.0 °C
<b>PASADA</b>	<b>TIEMPO (min)</b>	<b>DEFORMACIÓN PROMEDIO ACUMULADA (mm)</b>	<b>VELOCIDAD PROMEDIO DE DEFORMACIÓN (µm/min)</b>	<p style="text-align: center;"><b>DEFORMACIÓN PLÁSTICA</b></p> <p style="text-align: center;">Deformación Acumulada (µm)</p> <p style="text-align: center;">Tiempo (min)</p> <p style="text-align: right;">— PROBETA 1 — PROBETA 2</p>	
0	0	0,00	0		
54	1	0,80	795,0		
107	2	1,84	1045,0		
161	3	1,20	-645,0		
268	5	1,30	50,0		
536	10	1,55	51,0		
804	15	1,58	5,0		
1072	20	1,89	63,0		
1340	25	1,81	-17,0		
1608	30	2,03	44,0		
1876	35	2,23	41,0		
2144	40	2,24	1,0		
2412	45	2,27	6,0		
3216	60	2,33	4,0		
4020	75	2,38	3,7	<b>Procedencia de la mezcla:</b>	<b>Compactada en Laboratorio</b>
4824	90	2,48	6,3	<b>Masa del espécimen (g):</b>	<b>10271</b>
5628	105	2,52	2,8	<b>Altura promedio de espécimen (mm):</b>	<b>50</b>
6432	120	2,63	7,2	<b>Longitud promedio de espécimen (mm):</b>	<b>300</b>
<b>Observaciones:</b>				<b>Deformación Promedio total al final del ensayo (mm):</b>	<b>2,63</b>
				<b>V<sub>30/45</sub> (µm/min)</b>	<b>16,0</b>
				<b>V<sub>75/90</sub> (µm/min)</b>	<b>6,3</b>
				<b>V<sub>105/120</sub> (µm/min)</b>	<b>7,24</b>

### Apéndice Y. Resistencia a la deformación plástica (3%)

				<b>RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE LABORATORIO INV E-756-13</b>	
		<b>Tipo de Mezcla:</b>		<b>Condiciones de Ensayo:</b>	
		MDF-19 + EA CRL-1 + 3% CEMENTO (Espécimen 1 y 2)		SIN Inmerso en Agua	Temperatura= 22.0 °C
Pasada	tiempo (min)	deformación promedio acumulada (mm)	VELOCIDAD PROMEDIO DE DEFORMACIÓN (μM/MIN)	<p style="text-align: center;"><b>DEFORMACIÓN PLÁSTICA</b></p> <p style="text-align: center;">Deformación Acumulada (μm)</p> <p style="text-align: center;">Tiempo (min)</p> <p style="text-align: center;">— PROBETA 1 — PROBETA 2</p>	
0	0	0,00	0		
54	1	0,53	528,7		
107	2	0,78	255,4		
161	3	0,84	56,4		
268	5	0,94	50,1		
536	10	1,17	46,0		
804	15	1,25	15,4		
1072	20	1,40	30,6		
1340	25	1,46	12,0		
1608	30	1,53	14,0		
1876	35	1,60	14,0		
2144	40	1,60	0,0		
2412	45	1,63	6,0		
3216	60	1,68	3,0	<b>Tipo de mezcla:</b>	<b>MDF-19 + EA CRL-1 + 3% CEMENTO (Espécimen 1 y 2)</b>
4020	75	1,78	7,0	<b>Procedencia de la mezcla:</b>	<b>Compactada en Laboratorio</b>
4824	90	1,92	9,3	<b>Masa del espécimen (g):</b>	<b>10271</b>
5628	105	1,90	-1,3	<b>Altura promedio de espécimen (mm):</b>	<b>50</b>
6432	120	1,98	5,1	<b>Longitud promedio de espécimen (mm):</b>	<b>300</b>
<b>Observaciones:</b>				<b>Deformación Promedio total al final del ensayo (mm):</b>	<b>1,98</b>
				<b>V<sub>30/45</sub> (μm/min)</b>	<b>6,7</b>
				<b>V<sub>75/90</sub> (μm/min)</b>	<b>9,3</b>
				<b>V<sub>105/120</sub> (μm/min)</b>	<b>5,06</b>

### Apéndice Z. Resistencia a la deformación plástica (4%)

				<b>RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE LABORATORIO INV E-756-13</b>	
		<b>Tipo de Mezcla:</b>		<b>Condiciones de Ensayo:</b>	
		MDF-19 + EA CRL-1 + 4.0% CEMENTO (Especimen 1 y 2)		SIN Inmerso en Agua	Temperatura= 22.0 °C
<b>PASADA</b>	<b>TIEMPO (min)</b>	<b>DEFORMACIÓN PROMEDIO ACUMULADA (mm)</b>	<b>VELOCIDAD PROMEDIO DE DEFORMACIÓN (µm/min)</b>	<p style="text-align: center;"><b>DEFORMACIÓN PLÁSTICA</b></p> <p style="text-align: center;">Deformación Acumulada (µm)</p> <p style="text-align: center;">Tiempo (min)</p> <p style="text-align: right;">— PROBETA 1 — PROBETA 2</p>	
0	0	0,00	0		
54	1	0,35	345,0		
107	2	0,52	170,0		
161	3	0,60	80,0		
268	5	0,70	50,0		
536	10	0,86	33,0		
804	15	0,97	21,0		
1072	20	1,00	7,0		
1340	25	1,05	9,0		
1608	30	1,10	10,0		
1876	35	1,12	5,0		
2144	40	1,17	10,0		
2412	45	1,20	5,0		
3216	60	1,26	4,0		
4020	75	1,34	5,3	<b>Procedencia de la mezcla:</b>	<b>Compactada en Laboratorio</b>
4824	90	1,37	2,0	<b>Masa del espécimen (g):</b>	<b>10271</b>
5628	105	1,40	2,0	<b>Altura promedio de espécimen (mm):</b>	<b>50</b>
6432	120	1,43	2,3	<b>Longitud promedio de espécimen (mm):</b>	<b>300</b>
<b>Observaciones:</b>				<b>Deformación Promedio total al final del ensayo (mm):</b>	<b>1,43</b>
				<b>V<sub>30/45</sub> (µm/min)</b>	<b>6,7</b>
				<b>V<sub>75/90</sub> (µm/min)</b>	<b>2,0</b>
				<b>V<sub>105/120</sub> (µm/min)</b>	<b>2,33</b>