

DISEÑO DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA DE ALTO DESEMPEÑO  
PARA RIEGOS DE LIGA, EVALUANDO SU RESISTENCIA AL ESFUERZO DE CORTE Y  
LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS DE PAVIMENTO

ESTUDIANTES:

MAIRA ELIZABETH RENDÓN MARTÍNEZ  
EDGARDO ALFREDO TORRES DAHBURA

DIRECTOR:

M.SC. HUGO LEÓN ARENAS LOZANO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
POPAYÁN-CAUCA

2018

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

**MAIRA ELIZABETH RENDÓN MARTÍNEZ**  
**EDGARDO ALFREDO TORRES DAHBURA**

TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA SOMETIDO AL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA COMO PARTE DE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER.

APROBADO POR:

---

HUGO LEÓN ARENAS LOZANO  
(DIRECTOR)

---

NOMBRE:  
(JURADO INTERNO)

---

NOMBRE:  
(JURADO EXTERNO)

Fecha: Popayán, julio de 2018.

## **REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA**

Torres D., E.A. & Rendón M., M.E. (2018). *Diseño de una emulsión asfáltica modificada de alto desempeño para riegos de liga, evaluando su resistencia al esfuerzo de corte y la adherencia entre capas de pavimento*. Trabajo de grado de Maestría, Universidad del Cauca, Popayán.

## **CESIÓN DE DERECHOS**

**NOMBRES DE AUTORES:** Maira Elizabeth Rendón Martínez, Edgardo Alfredo Torres Dahbura.

**TÍTULO:** Diseño de una emulsión asfáltica modificada de alto desempeño para riegos de liga, evaluando su resistencia al esfuerzo de corte y la adherencia entre capas de pavimento.

**GRADO / AÑO:** Magíster / 2018.

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.

---

Maira Elizabeth Rendón Martínez

C.C. 1.085.686.408

Email: mayrarendon02@gmail.com

---

Edgardo Alfredo Torres Dahbura

C.E. 505844

Email: dahbura81@icloud.com

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestros padres por mostrarnos el camino hacia la superación, por su orientación, comprensión y apoyo de manera incondicional durante todo el tiempo, se han convertido en un soporte muy importante en esta etapa de la vida.

A nuestros compañeros y amigos que durante este largo proceso de nuestras vidas, nos permitieron acumular tantas experiencias.

A la comunidad universitaria, por toda su disposición, colaboración y contribución en esta etapa tan importante; agradecemos además por brindar su experiencia y orientación necesaria en el desarrollo del trabajo de grado y por sus recomendaciones, lo cual permitió culminar con satisfacción y alcanzar los objetivos propuestos.

*Dedicatoria:*

*A Dios por darnos la bendición de culminar los estudios haciendo que el ideal de una parte de nuestras vidas se cumpla para lograr la felicidad, puesto que este es un paso más para seguir adelante con nuestras metas, a nuestros padres por brindarnos amor, afecto, cariño y el apoyo incondicional en todo momento.*

## Tabla de Contenido

<b>1.</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>18</b>
1.1	Descripción del problema.....	19
1.2	Justificación.....	20
1.3	Objetivos.....	20
1.3.1	<i>Objetivo General.....</i>	<i>20</i>
1.3.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>20</i>
<b>1.4</b>	<b>Estructura de la Tesis.....</b>	<b>21</b>
<b>2.</b>	<b>Revisión Bibliográfica .....</b>	<b>22</b>
2.1	Las Emulsiones Asfálticas Modificadas.....	22
2.1.1	<i>Materiales que constituyen una emulsión asfáltica modificada.....</i>	<i>22</i>
2.1.2	<i>Clasificación de las emulsiones asfálticas modificadas.....</i>	<i>24</i>
2.2	Caracterización física y reológica de una emulsión asfáltica modificada .....	25
2.3	El mecanismo de adherencia entre capas asfálticas.....	28
2.3.1	<i>Factores que inciden en la adherencia entre capas asfálticas.....</i>	<i>29</i>
2.3.1.1	<i>Nivel adecuado de compactación de la capa superior.....</i>	<i>29</i>
2.3.1.2	<i>Gradación de los agregados.....</i>	<i>30</i>
2.3.1.3	<i>Tipo de mezcla.....</i>	<i>30</i>
2.3.1.4	<i>Limpieza de la interfaz.....</i>	<i>30</i>
2.3.1.5	<i>El agua.....</i>	<i>31</i>
2.3.1.6	<i>La antigüedad del pavimento.....</i>	<i>31</i>
2.3.1.7	<i>Resistencia a la fricción entre las capas superior e inferior.....</i>	<i>31</i>
2.3.1.8	<i>Variación de la velocidad del vehículo.....</i>	<i>31</i>
2.3.1.9	<i>Temperatura de la interfaz entre capas asfálticas.....</i>	<i>32</i>
2.3.1.10	<i>Tasa de aplicación del riego de liga.....</i>	<i>33</i>
2.4	Métodos de evaluación de la adherencia entre capas asfálticas.....	33
2.4.1	<i>Pruebas destructivas.....</i>	<i>33</i>
2.4.1.1	<i>Corte Directo.....</i>	<i>33</i>
2.4.2	<i>Ensayo de resistencia al corte directo, NLT 382/08, usando el dispositivo “B”.....</i>	<i>35</i>
2.5	Fallas relacionadas con la deficiencia en la adherencia entre capas asfálticas.....	35

2.6	Modelación de estructuras de pavimento flexible .....	37
2.6.1	<i>Mecanismo de falla clásico de los pavimentos felxibles.</i> .....	37
2.6.2	<i>Modelación elástica multicapa.</i> .....	39
2.6.3	<i>Programa de diseño mecánico-empírico de pavimentos AASHTOWare®, Versión 2.2.</i> .....	39
<b>3.</b>	<b>Materiales y metodología</b> .....	<b>40</b>
3.1	Materiales empleados en el proyecto.....	42
3.1.1	<i>Cemento Asfáltico.</i> .....	42
3.1.2	<i>Agentes Modificadores y Aditivos.</i> .....	42
3.1.3	<i>Mezcla Asfáltica tipo MDC-19.</i> .....	43
3.1.4	<i>Agregados Pétreos.</i> .....	44
3.1.5	<i>Diseño Marshall MDC-19 para capa de rodadura (Nivel de Transito NT3).</i> .....	45
3.2	Proceso de modificación.....	46
3.2.1	<i>Formulación y elaboración del asfalto modificado.</i> .....	46
3.2.2	<i>Características físicas del asfalto modificado.</i> .....	46
3.3	Fabricación y formulación de las emulsiones asfálticas .....	47
3.3.1	<i>Proceso de fabricación.</i> .....	47
3.3.2	<i>Caracterización física de las emulsiones asfálticas modificadas.</i> .....	49
3.4	Caracterización física y reológica del asfalto residual .....	50
3.4.1	<i>Métodos de recuperación del asfalto residual.</i> .....	50
3.4.1.1	<i>Destilación emulsiones asfálticas ASTM D 6997-12;(E-762) Normas y Ensayos de materiales para carreteras –Instituto Nacional de Vías.</i> .....	50
3.4.1.2	<i>Práctica estándar recuperación residuos de asfalto emulsionado mediante evaporación a baja temperatura ASTM 7497-16</i> .....	51
3.4.1.3	<i>Recuperación de asfalto de una solución por Rotovapor ASTM D 5404/5404 M-11 (INV- E 759-13); Recuperación del asfalto de una solución utilizando el evaporador rotatorio.</i> .....	51
3.4.2	<i>Caracterización reológica avanzada.</i> .....	52
3.5	Evaluación de la adherencia entre capas asfálticas.....	54
3.5.1	<i>Elaboración de especímenes de ensayo.</i> .....	54
3.5.2	<i>Evaluación de adherencia entre capas mediante el ensayo de corte NLT-382 /08.</i> .....	57
3.6	Evaluación del comportamiento de una estructura de pavimento mediante una modelación estructural estática .....	58
3.6.1	<i>Programa de análisis elástico lineal multicapa WinJULEA.</i> .....	59
3.6.2	<i>Modelación estructural mecánico-empírica.</i> .....	60

<b>4.</b>	<b>Resultados y Análisis</b> .....	<b>62</b>
4.1	Caracterización física y reológica de los ligantes asfálticos modificados .....	62
4.1.1	<i>Caracterización física.</i> .....	62
4.1.2	<i>Caracterización reológica.</i> .....	62
4.1.2.1	<i>Grado de desempeño PG.</i> .....	62
4.1.2.2	<i>Evaluación del grado de desempeño de los residuos asfálticos según el ensayo de MSCR.</i> .....	63
4.1.2.3	<i>Evaluación de la resistencia a la fatiga de los residuos asfálticos</i> .....	67
4.2	Evaluación de la calidad de adherencia entre capas asfálticas .....	68
4.2.1	<i>Determinación de la influencia del tipo y tasa de riego de ligante modificado en la “Resistencia a esfuerzo cortante”.</i> .....	68
4.3	Modelación Estructural .....	70
4.3.1	<i>Esfuerzos cortantes máximos.</i> .....	70
4.3.2	<i>Influencia del tipo de modificador y cantidad del riego de liga en el comportamiento de la estructura de pavimento.</i> .....	71
4.3.2.1	<i>Evaluación mediante un programa elástico multicapa (WinJulea).</i> .....	71
4.3.2.2	<i>Evaluación mediante modelación estructural mecánico-empírica.</i> .....	73
<b>5.</b>	<b>Conclusiones generales y recomendaciones para futuras investigaciones</b> .....	<b>76</b>
5.1	Propuesta de una metodología de diseño del riego de liga .....	76
5.2	Conclusiones Generales.....	77
5.2.1	<i>Diseño y formulación reológica de emulsiones para liga.</i> .....	77
5.2.2	<i>Diseño y evaluación de la calidad de adherencia entre capas asfálticas.</i> .....	78
5.2.3	<i>Estudio del efecto de la calidad de adherencia en el desempeño de un pavimento.</i> .....	79
5.3	Recomendaciones para futuras investigaciones.....	79
<b>6.</b>	<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	<b>81</b>
<b>Anexos</b>	.....	<b>89</b>

## Lista de Figuras

Figura 1. Modos de separación (Adaptado de Read y Whiteoak, 2003) .....	35
Figura 2. Procedimiento básico de modelación de estructuras de pavimento (Fuente propia).....	37
Figura 3. Deformación a tracción crítica en el enfoque clásico del diseño de pavimento asfáltico (Adaptado de Read y Whiteoak, 2003).....	38
Figura 4. Metodología para el diseño de una emulsión asfáltica modificada de alto desempeño para riesgos de liga, evaluando su resistencia al esfuerzo de corte y la adherencia entre capas de corte (Fuente propia).....	41
Figura 5. Curva de comportamiento granulométrico de la mezcla asfáltica MDC-19 (Fuente propia) .....	44
Figura 6. Esquema del Proceso de modificación del asfalto (Fuente propia).....	47
Figura 7. Grado de desempeño PG, de los asfaltos modificados formulados, a la temperatura alta según AASHTO T 315-12 (R2016) (Fuente propia).....	62
Figura 8. Diferencia entre el grado de desempeño a temperatura alta AASHTO T 315-12 (R2016), entre los métodos de recuperación del residuo asfáltico y el asfalto original (Fuente propia).....	64
Figura 9. Respuesta elástica RE3200 Pa y dependencia al estrés de los asfaltos modificados recuperados, según la prueba de MSCR (Fuente propia).....	66
Figura 10. Gráfica de las Leyes de Fatiga de los residuos de asfalto (Fuente propia).....	67
Figura 11. Resultados del ensayo de corte NLT 382/08: Resistencia máxima al corte y energía de deformación para producir la rotura del material (Fuente propia) .....	68
Figura 12. Evaluación del criterio de falla para definir la calidad de los tipos de riego de liga (Fuente propia) .....	71
Figura 13. Gráficas de acumulación de daño, modelación interfaz con total adherencia y modelación interfaz con 22% de afectación (Fuente propia).....	74
Figura 14. Propuesta de una metodología de diseño del riego de liga (Fuente propia).....	76

## Lista de Tablas

Tabla 1. Principales características físicas de emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímeros .....	26
Tabla 2. Contraste del grado de desempeño a temperatura alta AASHTO T 315-12 (R2016), entre los métodos de recuperación del residuo asfáltico (Fuente propia).....	63
Tabla 3. Grado de desempeño a la deformación permanente según MSCR, AASHTO T 350-14 (Fuente propia) .....	65

## Lista de Fotografías

Fotografía 1. Agentes modificadores (Fuente propia) .....	43
Fotografía 2. Molino Coloidal SOLPER-75 (Fuente propia) .....	49
Fotografía 3. Esquema del equipo para el ensayo de destilación de emulsiones asfálticas (Fuente propia).....	51
Fotografía 4. Evaporador rotatorio y sistema de recuperación (Fuente propia) .....	52
Fotografía 5. Reómetro de corte dinámico (Fuente propia).....	53
Fotografía 6. Especímenes cilíndricos de diámetro 100m para ensayo de corte (Fuente propia) 55	
Fotografía 7. Especímenes compactados unidos mediante el riego de liga (Fuente propia) .....	56
Fotografía 8. Compactador giratorio (Fuente propia).....	56
Fotografía 9. Proceso del ensayo de corte NLT 382/08.....	58

## Lista de Anexos

Anexo A. Tabla 4. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013).....	90
Anexo B. Tabla 5. Resumen de Ensayos de Caracterización de los agregados pétreos (Fuente propia) .....	91
Anexo C. Tabla 6. Proporción máxima de arena natural en el agregado para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013).....	91
Anexo D. Tabla 7. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013) .....	92
Anexo E. Tabla 8. Análisis granulométrico combinación MDC-19 (Fuente propia).....	93
Anexo F. Tabla 9. Grado de desempeño PG, de los asfaltos modificados formulados, a la temperatura alta según AASHTO T 315-12 (R2016) (Fuente propia).....	93
Anexo G. Tabla 10. Especificaciones del asfalto modificado con polímeros (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013) .....	94
Anexo H. Tabla 11. Ensayos de Caracterización de los asfaltos modificados (Fuente propia) ...	95
Anexo I. Tabla 12. Especificaciones de emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímeros (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013) .....	96
Anexo J. Tabla 13. Ensayos de Caracterización de las emulsiones modificadas (Fuente propia)	98
Anexo K. Tabla 14. Evaluación del criterio de falla para definir la calidad de los tipos de riego de liga. (Fuente propia) .....	99
Anexo L. Figura 15. Ubicación de las cargas en la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia) .....	101
Anexo M. Tabla 15. Características de la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia)..	102
<a href="#">Anexo N</a> . Figura 16. Entrada de datos estructurales al programa WinJULEA y esquema de espesores de la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia).....	103
Anexo O. Figura 17. Estado de esfuerzos mecánicos en la interface de enlace entre capas bituminosas para los ejes de carga de 8.2 y 13.0 toneladas (Fuente propia).....	103
Anexo P. Figura 18. Interfaz de entrada de datos al Nivel 2 de precisión de diseño en el programa AASHTOWare® Versión 2.2 (Fuente propia) .....	104
Anexo Q. Figura 19. Interfaz de entrada de los criterios de desempeño, AASHTOWare® Versión 2.2 (Fuente propia).....	105

Anexo R. Figura 20. Modelo Climático seleccionado para la modelación estructural en AASHTOWare® Versión 2.2 (Fuente propia).....	105
Anexo S. Figura 21. Modelación de interfaz con total fricción (Fuente propia).....	106
Anexo T. Figura 22. Modelación de interfaz con 22% de afectación (Fuente propia).....	106

## Resumen

Los pavimentos asfálticos generalmente se construyen en varias capas y la mayoría de las técnicas de diseño y evaluación del pavimento asumen que las capas de asfalto adyacentes están completamente unidas y no se desarrollan desplazamientos entre ellas. Sin embargo, la unión completa no siempre se logra y una serie de fallas en el pavimento se han relacionado con condiciones deficientes de adherencia.

La investigación teórica mostró que la distribución de tensiones, deformaciones y desviaciones dentro de la estructura del pavimento está muy influenciada por la condición de enlace entre las capas adyacentes. El deslizamiento en la interfaz entre el curso del liante y la base podría reducir significativamente la vida de la estructura general del pavimento. Si se produce un deslizamiento dentro de la interfaz entre la superficie y el curso del aglutinante, la deformación máxima de tracción horizontal en la parte inferior de la superficie se vuelve excesiva y provoca el rápido fallo de la superficie. Esta condición empeora cuando existe una carga horizontal significativa.

El proyecto de grado tuvo como enfoque el diseño de una emulsión asfáltica para ser utilizada como riego de liga, promoviendo la adherencia entre capas de concreto asfáltico. El alcance del proyecto incluyó la evaluación de la calidad de enlace alcanzado para dichas capas. El objetivo principal fue proporcionar una guía metodológica para diseñar el material ligante emulsionado, definiendo la magnitud de la fuerza de enlace necesaria entre capas de concreto asfáltico, ofreciendo una vía para satisfacer los requisitos de diseño estructural. Para este fin se utilizaron evaluaciones reológicas al residuo del ligante emulsionado, la prueba de resistencia a corte descrita en la norma española NLT 382/08, modificadas para adaptarla a las condiciones locales de Colombia. Dichas adaptaciones se describen en la metodología utilizada.

También se ha llevado a cabo una evaluación estructural, por medios racionales y un dimensionamiento analítico de un pavimento “Tipo”, para ser evaluada la influencia y significancia de la calidad de una buena adherencia en la vida útil de un pavimento.

Se realizó un análisis gráfico, para estimar los valores máximos alcanzables de las resistencias de enlace al corte para cada tipo de emulsión asfáltica evaluada y compararla con aquellas resistencias requeridas según el cálculo analítico de la estructura de pavimento modelada. Esta comparación de los resultados ayuda a predecir la fortaleza de la unión requerida en la interfaz para recomendar límites de especificación de resistencia de la unión entre capas según el modelo de pavimento y la carga por eje de tránsito.

**Palabras clave:** Riego de adherencia, Resistencia al corte entre capas, Pavimento asfáltico, Tasa de aplicación, Emulsión asfáltica, Reología.

### **Abstract**

Asphalt pavements are generally constructed in several layers and most pavement design and evaluation techniques assume that the adjacent asphalt layers are completely joined and no displacements develop between them. However, complete bonding is not always achieved and a series of pavement failures have been linked to poor adhesion conditions.

The theoretical research showed that the distribution of stresses, deformations and deviations within the pavement structure is greatly influenced by the condition of link between the adjacent layers. Sliding at the interface between the course of the binder and the base could significantly reduce the life of the overall structure of the pavement. If a slip occurs within the interface between the surface and the course of the binder, the maximum horizontal tensile strain at the bottom of the surface becomes excessive and causes the surface to fail rapidly. This condition worsens when there is a significant horizontal load.

The project of degree had as focus the design of an asphaltic emulsion to be used as irrigation of league, promoting the adhesion between layers of asphalt concrete. The scope of the project included the evaluation of the link quality achieved for these layers. The main objective was to provide a methodological guide to design the emulsified binder material, defining the magnitude of the necessary bond strength between layers of asphalt concrete, offering a way to satisfy the requirements of structural design. For this purpose, rheological evaluations were applied to the residue of the emulsified binder, the cut resistance test described in the Spanish standard NLT 382/08, modified to adapt it to local conditions in Colombia. These adaptations are described in the methodology used.

A structural evaluation has also been carried out, by rational means and an analytical dimensioning of a "Type" pavement, to be evaluated the influence and significance of the quality of a good adherence in the useful life of a pavement.

A graphic analysis was carried out to estimate the maximum achievable values of the bond strengths for the cut for each type of asphaltic emulsion evaluated and compare it with those resistances required according to the analytical calculation of the patterned pavement structure. This comparison of the results helps to predict the strength of the joint required in the interface to

recommend specification limits of the bond between layers according to the pavement model and the load per transit axis.

**Keywords:** Tack coat, Interlayer shear strength, Asphalt pavement, Application rate, Asphalt emulsion, Rheology.

## 1. Introducción

Las emulsiones asfálticas son utilizadas para diversas aplicaciones en la industria de la construcción de carreteras (sellado de grietas de superficies en frío, adhesivo entre capas de pavimento, mezclas para bases y superficies de carreteras, incluyendo sellantes de calzadas y hasta emulsiones para techos); siendo éstas, elaboradas en Colombia a partir de asfaltos bases con penetración 60/70 y otras más especializadas con asfaltos bases modificados.

Las principales propiedades que se requieren de las emulsiones son la capacidad de recubrir agregados o superficies durante el proceso de mezclado o adición, la capacidad para formar una película de asfalto uniforme para sellar o unir capas y la suficiente estabilidad para su aplicación, aportando cohesión, adhesividad y resistencia a las deformaciones a altas temperaturas.

Más importantes aún, son las propiedades del residuo asfáltico en el proceso de rotura de las mismas ya que éste es uno de los grandes responsables a la hora de determinar el desempeño en un conjunto de materiales para pavimento.

Actualmente los métodos utilizados para la recuperación de dicho residuo se realizan a temperaturas que son muy superiores a las que naturalmente el producto se expone en el campo, arrojando resultados en sus análisis alejados a los valores reales obtenidos en campo, generando una mayor preocupación a la hora de recuperar los residuos asfálticos de emulsiones elaboradas con asfaltos modificados con polímero o adiciones de látex, ácidos y otros tipos de aditivos que, con el incremento de temperatura modifican sus propiedades alejando y alterando aún más los resultados esperados en campo, surgiendo la necesidad para hallar el método más representativo de recuperación de un residuo asfáltico y su respectivo análisis de las propiedades de desempeño.

En el presente estudio, se evalúa en el laboratorio las propiedades reológicas, mecánicas y de ingeniería de una emulsión asfáltica modificada, usada como riego de liga para capas asfálticas, verificando la adherencia y su contribución en el desempeño de un pavimento flexible.

La investigación está basada en la creación y desarrollo de una metodología para el diseño y la evaluación del desempeño de una emulsión asfáltica modificada con polímeros, aplicada en riego de liga para capas asfálticas en pavimentos, evaluando diez (10) tipos de emulsiones asfálticas, distribuidas en una (1) convencional y nueve (9) modificadas, con cuatro (4) tasas de aplicación, posteriormente se realizará una modelación estructural para validar el esfuerzo mínimo al esfuerzo de corte para los ejes de 8.2 y 13 toneladas que soporta cada ligante. Esto, con el objetivo de

analizar su eficacia en cuanto a la adherencia entre las capas en tránsito pesado, según los resultados del ensayo de resistencia al corte de capas adheridas de pavimentos en laboratorio.

### **1.1 Descripción del problema**

Los pavimentos de asfalto generalmente están compuestos por varias capas y la mayoría de los procedimientos de diseño y evaluación del pavimento presuponen que esas capas están completamente unidas. Una práctica típica para lograr la condición de adhesión completa es aplicar una película delgada unión bituminosa en la interfaz entre las capas adyacentes.

Sin embargo, la vinculación completa no siempre se logra, ya que muchos casos de fallas se han informado en varios países (TRRL, 1976; Kennedy, 1978; TRRL, 1979; Kennedy y Lister, 1980; Peattie, 1980; Shaat, 1992; Lepert et al., 1992; Hachiya y Sato, 1997; Raab y Partl, 2009; Hakim, 2002; Sutanto, 2006; Chen et al., 1995; Tashman et al., 2006; Al Hakim et al., 1997).

En varios países han venido ocurriendo fallas en la interfaz entre la superficie y el material de ligadura, particularmente en algunas ubicaciones puntuales en carreteras que sufren una alta carga horizontal (por ejemplo, curvas, intersecciones, gradientes ascendentes o descendentes). La condición podría volverse más crítica cuando las altas cargas horizontales ocurren durante el verano, debido a la menor fuerza de unión de la interfaz y poca rigidez asociada con una temperatura más alta del pavimento. Además, Collop y Thom (2002) destacaron que la introducción del sistema de capa delgada resulta en un mayor esfuerzo cortante en la interfaz debajo de la superficie, lo que puede causar una condición de unión más crítica en esta interfaz. Varios proyectos de investigación teóricos han sido realizados, para estudiar el efecto del enlace en el rendimiento del pavimento. La investigación mostró que el enlace afecta la distribución de tensiones, deformaciones y desviaciones dentro de una estructura de pavimento. Además, un deslizamiento completo en la interfaz entre el ligante y la base podría reducir significativamente la vida útil de la estructura general del pavimento (Romain, 1968; Uzan et al., 1978; Brown y Brunton, 1984; Shahin y otros, 1987; Al Hakim, 1997; Hachiya y Sato, 1997; Kruntcheva et al., 2000b). Shahin et al. (1987) demostró que, si se produce un deslizamiento dentro de la interfaz entre la superficie y la capa subyacente, la tensión máxima de tracción horizontal en la parte inferior de la superficie podría ser excesiva, lo que provocaría una falla rápida en la superficie. Esta condición empeora cuando existe una carga horizontal significativa.

## 1.2 Justificación

A través del tiempo se ha comprobado que algunas de las fallas a temprana edad de las capas de rodadura asfáltica en una estructura de pavimento se deben a una deficiente adherencia entre las capas, lo que impide que dicha estructura pueda trabajar de manera monolítica.

En nuestro país el riego de liga utilizado para adherir carpetas asfálticas es un proceso que se realiza siguiendo las recomendaciones y las tasas de aplicación del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), “Artículo 415-13: Suministro de Emulsiones Modificadas con Polímeros”, las cuales no hacen referencia a ningún ensayo que permita definir una tasa de riego de liga óptima que garantice el funcionamiento monolítico de las capas asfálticas ligadas.

Tampoco existe una normatividad general que permita la selección del ligante asfálticos utilizar según las condiciones propias de cada proyecto, por esta razón se pretende evaluar diferentes tipos de emulsiones asfálticas modificadas variando su contenido de asfalto y dosificación usando diferentes emulgentes, empleando el ensayo de corte directo para determinar el esfuerzo necesario para separar las dos capas y así evaluar la calidad de adherencia entre ellas, y de esta manera poder seleccionar la emulsión asfáltica modificada que mejor garantice la adherencia entre las capas asfálticas.

Además, se establecerá una metodología de evaluación a seguir que sirva como una guía para los consultores o constructores que quieran promover el uso de emulsiones modificadas en los riegos de adherencia, la cual podrá ser utilizada como referencia para conocer la influencia de cada tipo de modificador en el desempeño de una emulsión asfáltica y sea un complemento a corto plazo de las especificaciones que sobre este proceso tiene el Instituto Nacional de vías.

## 1.3 Objetivos

### *1.3.1 Objetivo General*

Evaluar el comportamiento de las emulsiones asfálticas modificadas, que permitan mejorar la adherencia cuando son utilizadas como riego de liga entre dos capas asfálticas.

### *1.3.2 Objetivos Específicos*

- Analizar las propiedades reológicas de una emulsión asfáltica modificada usada como riego de liga para inferir su influencia en la capacidad de adherir las capas asfálticas de un pavimento.

- Evaluarla adherencia entre capas asfálticas de pavimento, mediante el ensayo de corte NLT-382 /08 utilizando emulsiones asfálticas modificadas.
- Simular el comportamiento de una estructura de pavimento flexible, mediante modelación estructural dinámica, para determinar la tasa de riego de liga óptima y el tipo de residuo asfáltico modificado adecuado para satisfacer la vida de diseño.

#### **1.4 Estructura de la Tesis**

El trabajo se ha organizado en los siguientes capítulos:

##### Capítulo 1. Introducción

Se presenta el tema propuesto destacando la relevancia de los diferentes asuntos tratados, la descripción del problema, su justificación, el objetivo general y específicos a alcanzar con el fin de dar respuesta a las interrogantes que dieron origen al desarrollo de este trabajo.

##### Capítulo 2. Revisión Bibliográfica

Se recopila de manera resumida el estado del arte de los principales temas tratados en el trabajo: “La evaluación por desempeño del residuo asfáltico modificado utilizado para la fabricación de las emulsiones asfálticas, el mecanismo de adherencia entre las capas asfálticas los métodos utilizados actualmente para evaluar la eficiencia de un riego de liga y su influencia en el comportamiento de una estructura de pavimento”.

##### Capítulo 3. Metodología y materiales

Se describen las características físicas, químicas y reológicas de los materiales empleados en la investigación, así como los equipos utilizados y la metodología de preparación, compactación y forma de ensayo de los especímenes de prueba.

##### Capítulo 4. Resultados y análisis

Se presentan los resultados del estudio experimental, su comparación con otros resultados obtenidos en trabajos similares y el análisis de los mismos.

##### Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

En el capítulo final de esta tesis, se presentan las conclusiones y las recomendaciones para el desarrollo de futuras investigaciones complementarias del tema estudiado.

##### Capítulo 6. Referencias bibliográficas

Se presentan las distintas fuentes bibliográficas citadas en el presente documento.

## 2. Revisión Bibliográfica

### 2.1 Las Emulsiones Asfálticas Modificadas

Una emulsión modificada, parte de una mezcla de polímero con el cemento asfáltico, en un sistema de dos fases, en la cual el polímero está hinchado por la acción de los aromáticos presentes en el asfalto, siendo esta separación observable solo en un nivel microscópico. Para lograr esta estructura, es necesario dispersar el polímero con mezcladores o agitadores de alto corte y a elevadas temperaturas. Luego, el asfalto modificado es dispersado en agua, proceso denominado emulsificación, el cual se realiza principalmente mediante el uso de un emulsionante (también llamado emulgente), el cual es frecuentemente un surfactante.

Las emulsiones asfálticas modificadas tienden a mejorar las propiedades reológicas del asfalto residual, respecto al de las emulsiones convencionales; aportando una mayor capacidad elástica, un incremento de la viscosidad, y a su vez el módulo complejo, disminuyendo su ángulo de fase, lo que se traduce en una reducción de la susceptibilidad térmica y un aumento en la resistencia a la deformación permanente. De igual manera, en la gran mayoría de los casos, se provee al ligante asfáltico de una mayor resistencia al envejecimiento debido a la acción de los factores climáticos, aportando un mejor desempeño y una mayor vida útil al pavimento.

El objetivo principal de las Emulsiones Asfálticas Modificadas es (Rodríguez, *et al.*, 2001):

- Mejorar las características mecánicas, como elasticidad, resistencia al corte y deformación permanente del asfalto residual.
- Optimizar la resistencia al agua y a la oxidación.
- Mejorar la susceptibilidad térmica del ligante residual, para resistir gradientes térmicos excesivos.
- Aumentar la cohesividad entre los agregados pétreos que se quieren ligar.
- Mejorar resistencia al envejecimiento por fatiga y pérdida de flexibilidad.
- Aumentar la resistencia al fisuramiento a bajas temperaturas.
- Mejorar la recuperación ante esfuerzos altos por cargas de tránsito.

#### ***2.1.1 Materiales que constituyen una emulsión asfáltica modificada.***

Las emulsiones asfálticas modificadas, están constituidas de polímeros, cemento asfáltico, emulsionante, aditivos químicos y agua. Todos estos materiales son utilizados para fabricar una emulsión asfáltica, mediante el proceso llamado emulsificación, que implica inicialmente la

separación del asfalto modificado en pequeñas gotas, a través de la acción de energía mecánica de corte en un molino coloidal.

- **Los polímeros.**

Son sustancias de alto peso molecular, formados por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros, utilizadas para la modificación del cemento asfáltico previo a su emulsificación. Entre los modificadores poliméricos que han dado buenos resultados en la modificación de asfaltos se encuentran los siguientes (Rodriguez et al., 1997):

- Homopolímeros: Tienen una sola unidad estructural llamada monómero, que es una molécula pequeña de masa molecular unida a otros monómeros, en cientos o miles, por medio de enlaces químicos covalentes, formando macromoléculas llamadas polímeros. Los más conocidos son la celulosa, el almidón y el cloruro de vinilo.
- Copolímeros: Tienen varias unidades estructurales distintas. Son fabricados con base en un polímero de tipo elastoplástico, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato o Polietileno de Alta o Baja Densidad, entre otras. (Existen varias denominaciones comerciales, pero principalmente, se pueden encontrar dentro de estas familias, los conocidos como EVA y VAE).
- Elastómeros: Al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Son fabricados con base en bloques de estireno, de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno- Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB), entre otras. (Principalmente esta clase de polímeros son conocidos comercialmente como SBS y SBR)

- **El emulsionante.**

Tiene como función principal estabilizar las pequeñas gotas de asfalto que se generan por el efecto de corte en el molino coloidal, evitando que estas se vuelvan a fundir entre sí. El emulsionante absorbido en la superficie de las gotas genera una barrera eléctrica de repulsión estérica que contribuye a evitar el acercamiento y su coalescencia. Incluso, si se supera esta barrera energética y las gotas flocculan, la película que forma el emulsionante sobre la superficie sigue inhibiendo la coalescencia (AkzoNobel Surface Chemistry, 2009).

- **El Cemento Asfáltico.**

Es el material adhesivo y aglomerante que contiene betún. Puede ser modificado con polímeros, y su origen proviene como residuo del petróleo. Es predominantemente alifático y ciclo alifático, y se le conoce comúnmente como asfalto (AkzoNobel Surface Chemistry, 2009).

- **El Agua.**

Constituye la mayoría de la fase acuosa de la emulsión, la cual es una solución compuesta por mezclado de cantidades específicas de agua caliente, emulsionante y aditivos químicos. El sistema de la fase acuosa se diseña para asegurar el tiempo suficiente de reacción de los aditivos químicos, así como un correcto mezclado de la fase acuosa con el cemento asfáltico (AkzoNobel Surface Chemistry, 2009).

- **Los Aditivos Químicos.**

Son utilizados en la formulación de emulsiones asfálticas y utilizados para mejorar diversas propiedades como, por ejemplo, la resistencia a la deformación (los polímeros como el látex y las ceras ayudan a potenciar dicha propiedad). Otros aditivos como los activantes de adhesividad, garantizan la unión de la emulsión a los agregados pétreos, proveyendo resistencia al agua. Por último, podemos mencionar los espesantes solubles en agua, que aumentan la viscosidad de la emulsión, ayudando a cumplir especificaciones o también a reducir el escurrimiento en mezclas de granulometría abierta (AkzoNobel Surface Chemistry, 2009).

### ***2.1.2 Clasificación de las emulsiones asfálticas modificadas.***

En la clasificación de una emulsión asfáltica se tienen en cuenta todos los aspectos relacionados con su formulación, tales como: el tipo y concentración de emulsionante, elección y concentración de ácidos o bases utilizados para ajustar el pH, el grado y origen del cemento asfáltico utilizado. Los agregados en presencia del agua adquieren una carga superficial característica que depende del pH y su naturaleza mineral. Las emulsiones bituminosas modificadas para uso en carreteras se clasifican de acuerdo con su reactividad (rotura y curado). La velocidad de rotura y curado dependen de la clasificación de la reactividad de la emulsión, y las condiciones del entorno tales como temperatura y humedad. Según el artículo 411, tabla 411-1, de las especificaciones de construcción del INVIAS 2013, las emulsiones se clasifican en los siguientes grupos:

- **Las emulsiones catiónicas de rotura rápida.** Su rotura se produce al entrar en contacto con áridos limpios y con baja superficie específica como la gravilla, utilizada en los tratamientos superficiales o sellados con gravilla.

- **Las emulsiones catiónicas de rotura media.** La rotura se produce a una velocidad menor y es adecuada para su mezcla con áridos con baja superficie específica como los que se utilizan en mezclas en frío de granulometría abierta.

- **Las emulsiones catiónicas de rotura lenta.** Se utilizan en mezclas con áridos de alta superficie específica.

Algunos requerimientos y especificaciones solicitan grados de emulsiones súper-estables con características de rotura extremadamente lentas. Cuando se usan emulsiones asfálticas, es necesario tener control sobre la estabilidad de la emulsión, con el fin de poder controlar el rompimiento de la misma.

## **2.2 Caracterización física y reológica de una emulsión asfáltica modificada**

Las propiedades físicas de una emulsión asfáltica representan aquellas que definen el cambio sufrido por el cemento asfáltico al momento de fabricar la emulsión, pero que no alteran su composición química. Dependen mucho de la estructura interna y el método de procesamiento del material asfáltico durante su emulsificación. Las principales características que se determinan para una emulsión se describen a continuación en la Tabla 1.

**Tabla 1. Principales características físicas de emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímeros**

<b>Ensayos a la emulsion</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma de Ensayo INV</b>
<b>Viscosidad</b>		
SayboltFurola25°C	s	E- 763
SayboltFurola50°C		
Contenido de agua en volumen	%	E- 761
Estabilidad durante almacenamiento(24horas) Sedimentación a los 5 días	%	E- 764
<b>Destilación:</b>		
Contenido de asfalto residual	%	E- 762
Tamizado		E- 765
Retenido tamiz No 20 (850 m)	%	
<b>Rotura Dioctil sulfosuccinato sódico</b>		
	%	E- 766
Carga de particular		E- 767
pH		E- 768
Recubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento	%	
Con agregado seco		E- 769
Con agregado seco y acción del agua		
<b>Ensayos sobre el residuo de destilación</b>		E- 771
Penetración (25° C ,100 gr, 5 s)	0.1 mm	E- 706
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	° C	E- 712
Ductilidad (25° C, 5cm/min)	cm	E- 702
Recuperación elástica por torsión 25° C.	%	E- 727

Fuente: Instituto Nacional de Vías, INVIAS (2013)

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia. Las características reológicas del asfalto a una temperatura están determinadas por su constitución (composición química) y la estructura (disposición física) de las moléculas en el material, por lo que un cambio en la constitución y/o su estructura generará cambios en su reología (Read & Whiteoak, 2003). Actualmente, se utilizan métodos de evaluación basados en el comportamiento reológico del asfalto residual (AASHTO M 320-10). Para entender de una mejor manera la reología es necesario conocer los diferentes conceptos, definidos por Afanasieva y Álvarez (2004) de la siguiente manera:

- **Módulo Complejo de Corte ( $G^*$ ):** es la relación entre el valor absoluto de la tensión de corte en oscilación aplicada ( $\tau$ ), sobre la deformación angular obtenida ( $\gamma$ ), consecuencia de esa carga en valor absoluto y es una medida de la resistencia total de un material para deformarse cuando es repetidamente sometido a esfuerzos constantes. Por tratarse de una carga sinusoidal se relaciona con un ángulo de desfase ( $\delta$ ). El módulo complejo consiste en dos partes: elástica (recuperable) y viscosa (no recuperable).
- **Ángulo de Fase ( $\delta$ ):** es el ángulo entre la deformación sinusoidal aplicada y la resultante del esfuerzo sinusoidal resultante en una prueba de deformación controlada; o entre el esfuerzo aplicado y la resultante en una prueba de esfuerzo controlado. Es un indicador de las cantidades relativas de deformación recuperable y no recuperable. Toma el valor de  $90^\circ$  cuando el material se comporta como viscoso puro y cero cuando es un material elástico puro.
- **Componente Viscosa,  $G''$ :** es el producto del módulo complejo por el seno del ángulo de fase. Esta componente representa una medida de la pérdida de energía (disipada durante el ciclo de carga) en forma de calor durante el proceso de deformación.
- **Componente Elástica,  $G'$ :** es el producto del módulo complejo por el coseno del ángulo de fase. Esta componente es una medida de la energía almacenada durante el ciclo de carga.
- **Grado de desempeño PG:** Determina el parámetro  $G^*/\text{sen } \delta$ , el cual es empleado para medir la resistencia de los asfaltos a la deformación permanente. Este parámetro es parte de la clasificación PG (Performance Grade), desarrollada en Estados Unidos por la FHWA (*Federal Highway Administration*) bajo el programa SHARP (*Strategic Highway Research Program*).
- **Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la prueba del Múltiple Sweep Creep Recovery (MSCR):** El parámetro  $G^*/\text{sen } \delta$  ha evolucionado a un nuevo parámetro: "Jnr"

(*Non Recoverable Creep Compliance*), que a su vez deriva de una prueba de MSCR (Multi Stress Creep and Recovery), la cual simula de mejor manera las condiciones de trabajo a las que el asfalto será sometido en el pavimento, haciendo énfasis en la resistencia a la deformación permanente. Un asfalto podrá ser aceptado siempre y cuando cumpla con las exigencias que han sido definidas mediante la clasificación de niveles de tráfico (AASHTO M 332-14), así, un asfalto será seleccionado dependiendo de las condiciones del clima y ejes equivalentes considerados en el proyecto.

- *Linear Amplitude Sweep (LAS)*: El método de ensayo es utilizado con ligante envejecido usando AASHTO T 240 (RTFOT) y AASHTO R 28 (PAV), para simular el envejecimiento estimado para pavimentos asfálticos en servicio. La prueba comienza con un barrido de frecuencia para determinar las propiedades reológicas y luego una serie de ciclos de carga oscilatorios, sistemáticamente y linealmente en aumento de amplitud a una frecuencia constante para causar daños por fatiga acelerada. El enfoque del daño continuo se utiliza para calcular la resistencia a la fatiga tanto en la determinación de las propiedades reológicas, como en los resultados del barrido de amplitud de carga lineal.

### **2.3 El mecanismo de adherencia entre capas asfálticas**

La unión en la interfaz de las capas bituminosas es necesaria para transmitir las cargas del tránsito a través de toda la estructura del pavimento. La carga vertical en una estructura de pavimento genera una fuerza normal que actúa en la interfaz entre las capas. Investigaciones sobre el efecto que la carga normal ejerce en el punto de enlace entre capas, demuestran que la fuerza cortante en la interfaz aumenta en proporción a la magnitud de la carga normal [Uzan, *et al.*, 1978; Mohammad, *et al.* 2002). Dos capas que no están debidamente vinculadas, y que no se tenga conciencia de esto en la modelación de la estructura, sea cual sea el modelo teórico de diseño que se maneje, solo causará que aumente en gran medida, la tendencia a que las capas se desprendan (delaminen / deslicen), y/o se agrieten por fatiga, fallando dichas capas. Lo anterior se debe a la tensión de cizallamiento inducida por el estrés que provoca la intensidad de la carga de tránsito. De Beer, *et al.* [1999] investigó las tensiones de contacto con el pavimento de un neumático rodante y lento de movimiento, usando un vehículo-carretera-superficie-presión-transductor-matriz (VRSPTA) y demostró que las tensiones de contacto transversales y longitudinales pueden ser tan altas como un 12% y 20% de la tensión de contacto vertical, respectivamente. Además

cuando existen cargas horizontales dentro de los esfuerzos a los cuales se somete un pavimento, por ejemplo, en zonas como curvas y rampas de ascenso, las malas condiciones de adherencia en la interfaz debajo de la superficie, causan agrietamiento por deslizamiento o deformación horizontal permanente en la capa de superficie, debido a la mala transferencia de carga estructural y distribución de esfuerzos de la superficie a la capa debajo, causada por la pobre condición de enlace, conduciendo a una alta concentración de tensión en la capa superficial. El agrietamiento por deslizamiento o deformación permanente horizontal se iniciará en la parte superior de la superficie cuando el material de superficie no puede resistir las tensiones horizontales inducidas.

Según Khweir y Fordyce (2003) y N.N. Lan y N.Q. Phuc (2013), las fallas en la superficie de una carretera de concreto asfáltico debido a la mala adherencia entre las capas de asfalto pueden reducir la vida útil de la superficie de la carretera en más del 80%. El comportamiento de los pavimentos en servicio muestra la importancia de garantizar una buena unión en la interfaz entre las capas. El deslizamiento y la separación completa de las capas puede ocurrir si las capas están unidas inadecuadamente. Si las capas están separadas, pueden aparecer grietas, de laminación y baches reflexivos (piel de cocodrilo), comprometiendo la funcionalidad de la estructura del pavimento. Estas dificultades enumeradas podrían reducirse o eliminarse, si la condición de vinculación, buena o mala, de la interfaz se tiene plenamente en cuenta y declarada en el diseño estructural del pavimento (Romanoschi y Metcalf, 2001).

### ***2.3.1 Factores que inciden en la adherencia entre capas asfálticas.***

Una buena unión entre capas de pavimento es deseable porque asegura un buen desempeño en el pavimento. Por lo tanto, es esencial conocer los factores que afectan el estado de unión entre las capas adyacentes, para poder tomarlos en cuenta cuando se diseña el riego de liga y a la hora de efectuar alguna prueba de verificación de la calidad de adherencia, tenerlos presentes en la interpretación de los resultados. A continuación, se resumen varios de los factores que han sido identificados por los investigadores:

#### ***2.3.1.1 Nivel adecuado de compactación de la capa superior.***

Tiene una importancia significativa para lograr un buen enlace, puesto que, una mejor compactación da como resultado una mejor inserción de los agregados de la capa superior a la capa inferior y suficiente superficie de contacto entre las capas superior e inferior. Raab y Partl

[2004c], utilizando especímenes compactados en equipos giratorios, investigaron el efecto del esfuerzo de compactación sobre el enlace. Encontraron que una capa superior compactada a 204 giros mostró una mayor resistencia al corte de la interfaz en comparación con la de 50 giros, indicando que un mayor grado de compactación repercute en la calidad de la unión entre capas.

#### *2.3.1.2 Gradación de los agregados.*

Pos, *et al.* [2001] y Sholar, *et al.* [2004] investigaron el efecto sobre la adherencia, que tiene el tipo de gradación de los agregados seleccionados para el diseño de la capa superior e inferior de la unión, llegando a la conclusión de que la gradación de las mezclas de capa superior e inferior afecta significativamente a la resistencia al corte de la interfaz.

Además, Pos, *et al.* [2001] extrajo las siguientes conclusiones:

- Las mezclas de asfalto con material de grano fino colocado sobre capas de grano grueso proporcionan una fricción entre partículas adecuada en la interfaz y, por lo tanto, es más probable que tengan una mayor resistencia al corte de la interfaz.
- El enlace en la interfaz de una mezcla de asfalto con material de grano grueso colocado sobre una capa de grano fino se ve muy afectado por el contenido de betún y sus propiedades adhesivas.

#### *2.3.1.3 Tipo de mezcla.*

Raab y Partl [1999] afirmaron que el enlace en la interfaz también está influenciado por el tipo de mezcla utilizada en las capas superior e inferior. Collop, *et al.* [2003] informaron que la resistencia de la unión en la interfaz entre una capa densa con asfalto modificado y una base de Cemento tipo Macadam (CBM) es bastante baja.

Se pensó que la baja fuerza de unión de esta combinación de materiales era debida a la falta de enclavamiento de agregado en la interfaz (es decir, no incrustación de agregados entre la capa de mezcla densa y la capa rígida de base, CBM).

#### *2.3.1.4 Limpieza de la interfaz.*

Hachiya y Sato [1997] encontraron que el curado inadecuado de la capa de liga, aplicada sobre una interfaz sucia reduce significativamente la resistencia al corte de la interfaz. La aplicación de la capa de liga bituminosa, sobre una interfaz sucia, puede no ser efectiva, puesto que el polvo

funciona como un aislante de la adhesividad y repele el proceso de buen estado de la unión entre las capas del pavimento. Una emulsión asfáltica no puede cumplir la función de adherir las capas, si la superficie de la interfaz contiene agentes que limitan la posibilidad de la impregnación del ligante asfáltico sobre los poros de la superficie.

#### 2.3.1.5 *El agua.*

Es ampliamente conocido que el exceso en la humedad de la superficie de la interfaz a ligar tiene un impacto negativo en una estructura de pavimento de asfalto, ya que reduce la adherencia del betún. Raab y Partl [2004c] y Sholar, *et al.*, [2004] confirmaron que la presencia de agua en la superficie de la capa inferior al colocar la capa superior reduce la resistencia al corte de la interfaz.

#### 2.3.1.6 *La antigüedad del pavimento.*

Partl y Raab [1999] consideraron que la edad de la capa inferior (es decir, recientemente construida o antigua) también puede afectar la condición de enlace de interfaz. Para asegurar una buena unión entre las capas de pavimento adyacentes, la BS 594987 [*British Standard Institution*, 2007] recomienda diferentes tasas de aplicación de capas de adherencia, para las capas inferiores recién colocadas y las antiguas.

#### 2.3.1.7 *Resistencia a la fricción entre las capas superior e inferior.*

Esta condición se identifica como uno de los factores que afectan la unión en la interfaz entre las capas. Sholar, *et al.* [2004] y West, *et al.* [2005] encontraron que la textura de la superficie de la capa inferior afecta significativamente el enlace de la interfaz.

Además, mostraron que la colocación de mezclas de asfalto sobre una capa inferior molida aumenta significativamente la resistencia al corte de la interfaz entre esas capas.

#### 2.3.1.8 *Variación de la velocidad del vehículo.*

Se considera como una variable que afecta significativamente las propiedades de un pavimento de asfalto, ya que dicta la tasa de carga. El asfalto se comporta como un material viscoso a una velocidad de carga lenta y como un material elástico a una velocidad de carga rápida. Investigaciones sobre el efecto de la tasa de carga sobre el enlace encontraron que la resistencia al corte en la interfaz aumenta a medida que aumenta la tasa de carga [Hachiya y Sato, 1997; Sholar,

*et al.*, 2004 y Choi, *et al.*, 2005]. El agrietamiento por deslizamiento frecuentemente observado en los gradientes descendentes y ascendentes, curvas e intersecciones indica que la mayor magnitud de la carga horizontal en esas ubicaciones podría deteriorar significativamente la unión (especialmente en la interfaz superior).

#### 2.3.1.9 *Temperatura de la interfaz entre capas asfálticas.*

Uno de los factores que la revisión de la literatura ha demostrado, que afectan y tienen mucha influencia sobre las fallas de los riegos de liga y que causan deterioros muy prematuros en los pavimentos, es la temperatura en la interfaz debida al calentamiento en época calurosa del pavimento y la intensidad alta de la carga (presión de contacto extrema), derivada de camiones sobrecargados. La temperatura del pavimento varía ampliamente dependiendo de la ubicación geográfica y la época del año, por lo tanto, una investigación sobre el efecto de la temperatura del pavimento en la unión entre las capas del pavimento es de importancia significativa. Es bien sabido que el asfalto se comporta como un material viscoso a alta temperatura y como un material elástico a baja temperatura. Muchos investigadores encontraron que la fuerza cortante en la interfaz disminuye significativamente a medida que aumenta la temperatura de prueba [Uzan, *et al.*, 1978; Hachiya y Sato, 1997; Partl y Raab, 1999; Sholar, *et al.*, 2004; Canestrari, *et al.*, 2005; Choi, *et al.*, 2005 y West, *et al.*, 2005]. Una resistencia a la cizalladura muy baja observada durante las pruebas a alta temperatura ( $> 30^{\circ}\text{C}$ ) combinada con la desviación estándar de la prueba puede aumentar las dificultades para determinar la diferencia entre los materiales en las pruebas comparativas. Por otro lado, existe una preocupación con respecto a la capacidad de una máquina o aparato de prueba para probar a baja temperatura ( $<15^{\circ}\text{C}$ ) ya que la resistencia al corte puede ser mayor que su capacidad. Partl y Raab [1999], Sholar, *et al.* [2004], Choi, *et al.* [2005] y West, *et al.* [2005] consideró una temperatura de prueba intermedia ( $20\text{-}25^{\circ}\text{C}$ ) como la temperatura de prueba más adecuada debido a la aplicación práctica de la prueba, manteniendo la variabilidad de la prueba y la capacidad comparativa de la prueba. Por otro lado, las temperaturas intermedias o bajas de un pavimento también causan problemas de adherencia, en época de invierno, debido a que aumenta la rigidez del ligante en la interfaz, permitiéndole acumular más rápidamente daño por deformación a fatiga.

#### *2.3.1.10 Tasa de aplicación del riego de liga.*

El efecto que tiene la tasa de aplicación en la resistencia al corte se ve determinado por la cohesión que puede aportar el asfalto residual, es decir, la fuerza con la que es capaz de resistir esfuerzos. Los ligantes modificados con polímeros han mostrado tener mayores valores de resistencia ante deformación por corte, gracias a que poseen mejores propiedades reológicas a deformación permanente y fatiga, con tasas menores de aplicación. Pero hay que tener cuidado, porque incrementar las propiedades mecánicas de un asfalto utilizando polímeros también lleva al punto que se incrementa demasiado su viscosidad, lo cual reduce significativamente su capacidad de emulsificar, aumentando el tamaño de partícula, y perdiendo capacidad de cobertura homogénea de la superficie a ligar.

En el Artículo 421-13, del Capítulo 400, Pavimentos Asfálticos, de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, del Instituto Nacional de Vías, (INVIAS, 2013); se describe la actividad “Riego de Liga”, y en la sección 421.4.2 se especifica la tasa de dosificación del ligante, la cual no está basada en ningún aspecto experimental, correlacionado con la realidad nacional, según la calidad de adherencia alcanzada por los materiales que actualmente posee y distribuye el mercado.

### **2.4 Métodos de evaluación de la adherencia entre capas asfálticas**

Para cuantificar las propiedades mecánicas de la interfaz entre las capas de pavimento, se utilizan ampliamente dos enfoques:

- Pruebas destructivas llevadas a cabo in-situ o en el laboratorio.
- Pruebas no destructivas llevadas a cabo en pavimentos existentes.

A continuación, se detallan las pruebas más utilizadas en la actualidad.

#### **2.4.1 Pruebas destructivas.**

##### *2.4.1.1 Corte Directo.*

Según dónde se realice la prueba, las pruebas destructivas se pueden categorizar en pruebas destructivas in situ y pruebas destructivas en el laboratorio. Las pruebas destructivas in-situ usualmente se realizan descorazonando o cortando parcialmente la estructura del pavimento, seguido de pruebas in-situ. Mientras que las pruebas destructivas de laboratorio generalmente se realizan tomando las muestras de la estructura del pavimento o de las muestras fabricadas en el

laboratorio, seguidas de pruebas de laboratorio. La prueba de corte directo permite la aplicación de fuerza de corte paralela al plano de una interfaz entre capas, que se aproxima a la dirección de la tensión de corte en una estructura de pavimento [Tashman, *et al.*, 2007; Bognacki, *et al.*, 2007]. Muchas variantes de la prueba de corte directo se han desarrollado en diferentes países. En general, la prueba se puede dividir en dos categorías: prueba de corte directo con carga normal y prueba de corte directo sin carga normal. La diferencia principal entre las dos categorías es que la prueba de corte directo con carga normal considera la combinación de carga de cizalladura normal y el efecto de dilatación, que no se consideran en la prueba sin carga normal. Crispino, *et al.* (1997) desarrolló una prueba de corte dinámico para determinar el módulo de reacción de cizallamiento dinámico de la interfaz entre las capas de asfalto. Realizaron la prueba a diferentes frecuencias y temperaturas. Concluyeron que el módulo de reacción de cizallamiento dinámico de la interfaz es tres veces mayor que el módulo de reacción de cizalladura estática. Las pruebas de corte directo más usadas en la actualidad son:

- **Método estándar para determinar la resistencia al corte en la interfaz de capas de pavimento asfáltico, AASHTO TP-114:** Esta prueba de ensayo mide la resistencia al corte, utilizando el aparato *Luisiana Interlayer Tester* (LISST), para la caracterización de la resistencia al corte de la interfaz de muestras cilíndricas. El dispositivo consiste en dos partes principales: un marco de corte y un marco de reacción. Solo el marco de corte puede moverse, mientras que el marco de reacción es estacionario. Una muestra cilíndrica se coloca dentro del marco de corte y de reacción, este, está bloqueado en su lugar con collares. A medida que la carga vertical aumenta gradualmente, se produce un fallo de cortante en la interfaz.

- **Método de pruebas estándar para la determinación de la calidad de los riegos de liga para superficies de pavimento asfáltico en campo o laboratorio: AASHTO TP-115.** Los materiales de liga son analizados en el aparato de prueba denominado Comprobador de la Calidad de riegos de liga de Luisiana (LTCQT). El procedimiento de prueba implica desecar una superficie con riego de liga, ajustando la temperatura de la superficie con el ventilador o la pistola de aire caliente para alcanzar la temperatura de prueba, y aplicando una carga de compresión a la superficie del pavimento ligado, por una cantidad de tiempo dada usando el dispositivo LTCQT. El máximo de la resistencia a la tracción refleja la calidad de la adhesión del material de la capa ligada. Este método de prueba es adecuado para pruebas de campo o laboratorio para determinar la calidad de la capa de liga y la adhesión medida por la resistencia a la tracción. Este método de

prueba también es adecuado para investigación y desarrollo, con propósitos de comparaciones directas entre los materiales de liga en una superficie de pavimento.

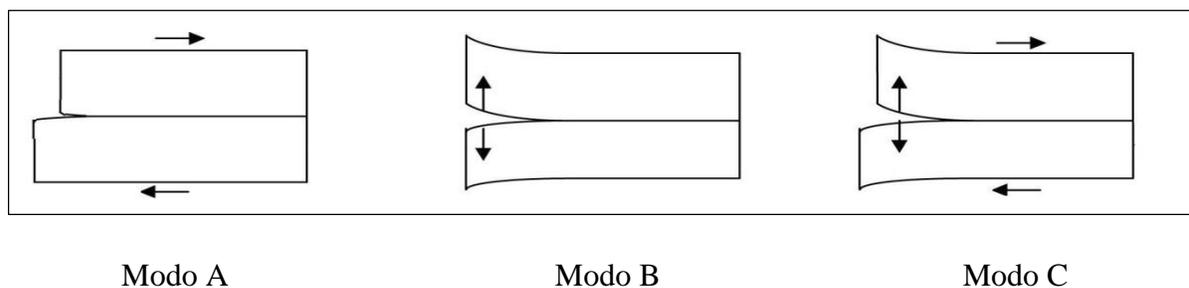
#### **2.4.2 Ensayo de resistencia al corte directo, NLT 382/08, usando el dispositivo “B”.**

Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la adherencia entre las capas de mezcla bituminosa, o bien entre las capas de mezcla bituminosa y las capas de materiales tratados con cementantes hidráulicos, que constituyen los pavimentos de carretera. Un testigo cilíndrico extraído del pavimento, correspondiente a la interfaz entre dos de sus capas, se somete a un esfuerzo cortante puro, midiéndose de forma continua tanto la carga aplicada como la deformación producida. El método permite determinar el esfuerzo cortante necesario para separar las dos capas, como parámetro para evaluar la adherencia entre ellas. También es posible determinar la energía de deformación, correspondiente al área delimitada bajo la curva de carga de deformación obtenida en el ensayo. El procedimiento se puede utilizar para el control de calidad de los riegos de adherencia, mediante el ensayo de testigos extraídos del pavimento. Este procedimiento también permite evaluar la efectividad de diferentes emulsiones, utilizadas en dichos riegos, mediante el uso de probetas de mezcla bituminosa fabricadas en el laboratorio.

#### **2.5 Fallas relacionadas con la deficiencia en la adherencia entre capas asfálticas**

Teniendo en cuenta que no siempre se logra una unión completa entre capas asfálticas, varios investigadores han llevado a cabo estudios, para proporcionar una mejor comprensión de las implicaciones de la condición de enlace de interfaz en el rendimiento del pavimento.

Las fallas de enlace en la interfaz podrían clasificarse por los siguientes modos de separación de las capas tal como se representa en la Figura 1: Corte (modo-A), Tensión (modo-B) y Esfuerzo cortante mixto (modo-C).



**Figura 1. Modos de separación (Adaptado de Read y Whiteoak, 2003)**

En una estructura de pavimento, la separación por cortante (modo A) puede ocurrir en la dirección transversal o longitudinal y se genera típicamente por tensiones de cortante inducidas por el tráfico y / o la temperatura en la interfaz. Además, las cargas horizontales inducidas por el vehículo en algunas ubicaciones de la carretera donde el vehículo acelera, frena, gira, asciende o desciende generan más tensiones de corte en la interfaz. Los casos informados de falla de unión muestran claramente que la separación por corte (modo A) se observa con frecuencia en campo.

La separación por tracción (modo B) puede ocurrir como resultado de formación de hinchamientos del pavimento, debido a retención de humedad interna, y la posterior evaporación de la misma. Sin embargo, Raab y Partl [1999] consideraron que la incidencia de la falla del enlace asociada con los hinchamientos, en una estructura de pavimento real es bastante rara.

La separación por tracción también podría ser causada por la tensión de tracción vertical debido a la succión del neumático. Similar al fenómeno en una ventosa, la adhesión se genera en el área de contacto entre el pavimento y el bloque de la banda de rodadura del neumático. Cuando el bloque de la banda de rodadura abandona el área de contacto, una fuerza adhesiva retiene la superficie del pavimento y genera un esfuerzo de tracción dentro de la superficie. Cabe señalar que la información sobre la importancia del esfuerzo de tracción generado por la succión del neumático no ha sido reportada ni confirmada por la incidencia de falla de adherencia en una estructura de pavimento real.

Podría producirse una separación de tensión de cizallamiento mixta (modo C) en la interfaz debajo de una capa delgada de superficie. Cuando la resistencia al corte de la interfaz debajo de la superficie delgada es relativamente baja, lo que lleva a una baja capacidad de transferir cargas horizontales a la capa inferior, las cargas horizontales se concentran en la capa de superficie y pueden causar pandeo de la delgada capa de revestimiento en la parte delantera. Si la interfaz no se ha separado y todavía existe una adhesión de tensión de interfaz, el pandeo generaría una tensión de tracción vertical (mientras que también se produce una tensión de cortante inducida por la carga horizontal) en la interfaz debajo de la superficie, situada en la parte delantera del neumático.

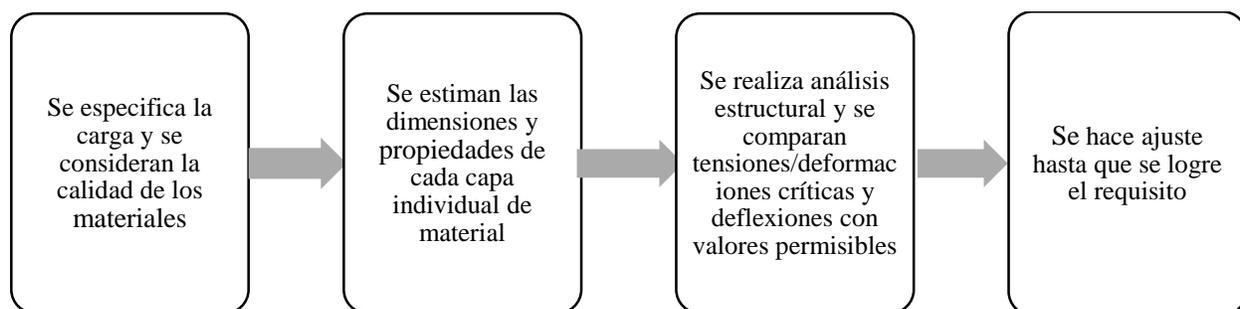
Se considera que este fenómeno ocurre, debido al efecto combinado de las siguientes condiciones [Hachiya y Sato, 1997; Raab y Partl, 1999]:

- La apariencia de una carga horizontal excesiva, con una mala transferencia de carga a la capa inferior debido a una resistencia al corte de la interfaz relativamente baja.

- La interfaz no se ha separado en el modo de cizallamiento, de modo que la adhesión a la tracción de la interfaz todavía existe.

## 2.6 Modelación de estructuras de pavimento flexible

El diseño analítico del pavimento se basa en la filosofía de que, la estructura debe tratarse del mismo modo que cualquier otra estructura de ingeniería civil, para lo cual el procedimiento básico se puede resumir de la siguiente manera:



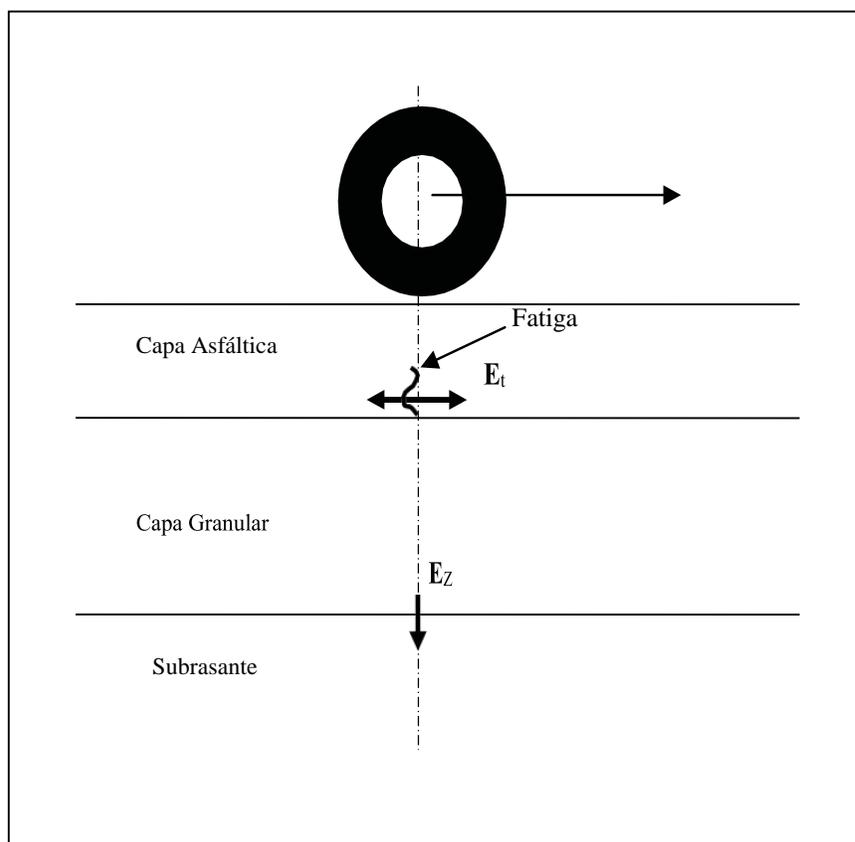
**Figura 2. Procedimiento básico de modelación de estructuras de pavimento (Fuente propia)**

En el diseño analítico del pavimento, el conocimiento del análisis estructural y las propiedades relevantes del material son muy importantes. Se sabe que la teoría elástica lineal es el enfoque más simple y se ha demostrado que es válida siempre que se tome la precaución adecuada. La teoría del elástico lineal se puede utilizar en el análisis del pavimento para predecir el estado de tensión, deformación y desviación bajo la carga vertical inducida por la carga de la rueda. El análisis puede extenderse para considerar una carga horizontal que surge en el área de contacto entre el neumático y el pavimento en una pendiente pronunciada o en una sección de la carretera donde el vehículo generalmente acelera, frena o gira [Kennedy y Lister, 1980; Peattie, 1980; SETRA / DTC, 1986].

### 2.6.1 Mecanismo de falla clásico de los pavimentos flexibles.

Tradicionalmente, el diseño analítico del pavimento asume dos modos clásicos de falla: Agrietamiento por fatiga en la base de la capa de asfalto y deformación permanente en la parte superior de la subrasante. En el enfoque de diseño clásico, la tensión de tracción horizontal en la base de la capa de asfalto y la tensión de compresión vertical en la parte superior de la subrasante (Figura3) se utilizan para determinar la vida crítica debido a fatiga y deformación permanente

respectivamente y no deben exceder el límite permisible valores dentro de la vida de diseño [TRRL, 1976; Kennedy, 1978; TRRL, 1979].



**Figura 3. Deformación a tracción crítica en el enfoque clásico del diseño de pavimento asfáltico (Adaptado de Read y Whiteoak, 2003).**

El modo clásico de falla antes mencionado no está respaldado en las estructuras gruesas de pavimento de asfalto. Nunn, *et al.* [1997], descubrieron que un pavimento asfáltico de larga duración adecuadamente mantenido con capas de asfalto de más de 180 mm de espesor no mostraba evidencia de deterioro estructural debido a fatiga en el fondo de las capas de asfalto o deformación en la parte superior de la subrasante. En una estructura de pavimento asfáltico grueso, se puede iniciar el agrietamiento por fatiga a partir de la superficie y puede tener lugar una deformación permanente dentro de los materiales bituminosos.

### **2.6.2 Modelación elástica multicapa.**

La modelación elástica multicapa de pavimentos, como técnica de diseño y evaluación del pavimento asume solo dos opciones para la condición de unión de la interfaz. La primera es que las capas de pavimento adyacentes están completamente unidas y no se desarrollan desplazamientos entre ellas, y la segunda es que las capas están totalmente desligadas, esta opción difícilmente es considerada por un diseñador, a menos que la literatura técnica lo obligue, por ejemplo, en el caso de superponer una mezcla asfáltica sobre una capa tratada con cementante hidráulico. Mayormente los diseñadores se limitan mucho en castigar en los diseños, la calidad de la unión entre capas ligadas, puesto que, asumir una completa adherencia al calcular los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en una estructura de pavimento flexible, ofrece los resultados más económicos, en cuanto a espesores de las capas.

### **2.6.3 Programa de diseño mecánico-empírico de pavimentos AASHTOWare®, Versión 2.2.**

El programa AASHTOWare®, Versión 2.2. Ilustra un enfoque avanzado del estado de la práctica en el diseño de los pavimentos, dando como resultado estructuras más confortables, duraderas y rentables. Este programa refleja un cambio en los métodos y procedimientos que los ingenieros utilizan para diseñar estructuras de pavimento.

Aprovecha los avances en mecánica de materiales, espectros de carga axial y datos climáticos para predecir el rendimiento del pavimento, por lo tanto, es un salto de calidad de los procedimientos de diseño de pavimentos anteriores y facilita el desarrollo futuro en el modelado y análisis de pavimentos. Está basado en el desarrollo de la investigación de carreteras, que tiene como finalidad desarrollar la guía de diseño mecánico-empírico de pavimentos conocida como MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*).

Esta se desarrolló entre 1996 y 2004, en el marco del Programa de Investigación Cooperativa Nacional de Carreteras de los Estados Unidos (Proyecto NCHRP 1-37A). El MEPDG permite al usuario trabajar con tres niveles diferentes de precisión (en orden descendente), según la importancia de la carretera, la capacidad económica del proyecto o incluso, la vida útil deseada para diseño.

En la práctica, la elección de uno u otro nivel implica necesariamente calcular un número mayor o menor de información para entrada. Esa es la razón por la cual, la precisión de las predicciones

del desempeño de un pavimento, serán diferentes a pesar del hecho de que los modelos de respuesta al deterioro son idénticos en todos los niveles.

La modelación estructural se basa en el desempeño del pavimento, en base a la evolución de los criterios de deterioro (Deformación permanente, agrietamiento por fatiga superior e inferior, índice de regularidad internacional, agrietamiento térmico, etc.), por debajo de los límites máximos permitidos definidos por el diseñador, en la entrada de datos, de acuerdo con las especificaciones del proyecto o deseados por el propietario de la obra.

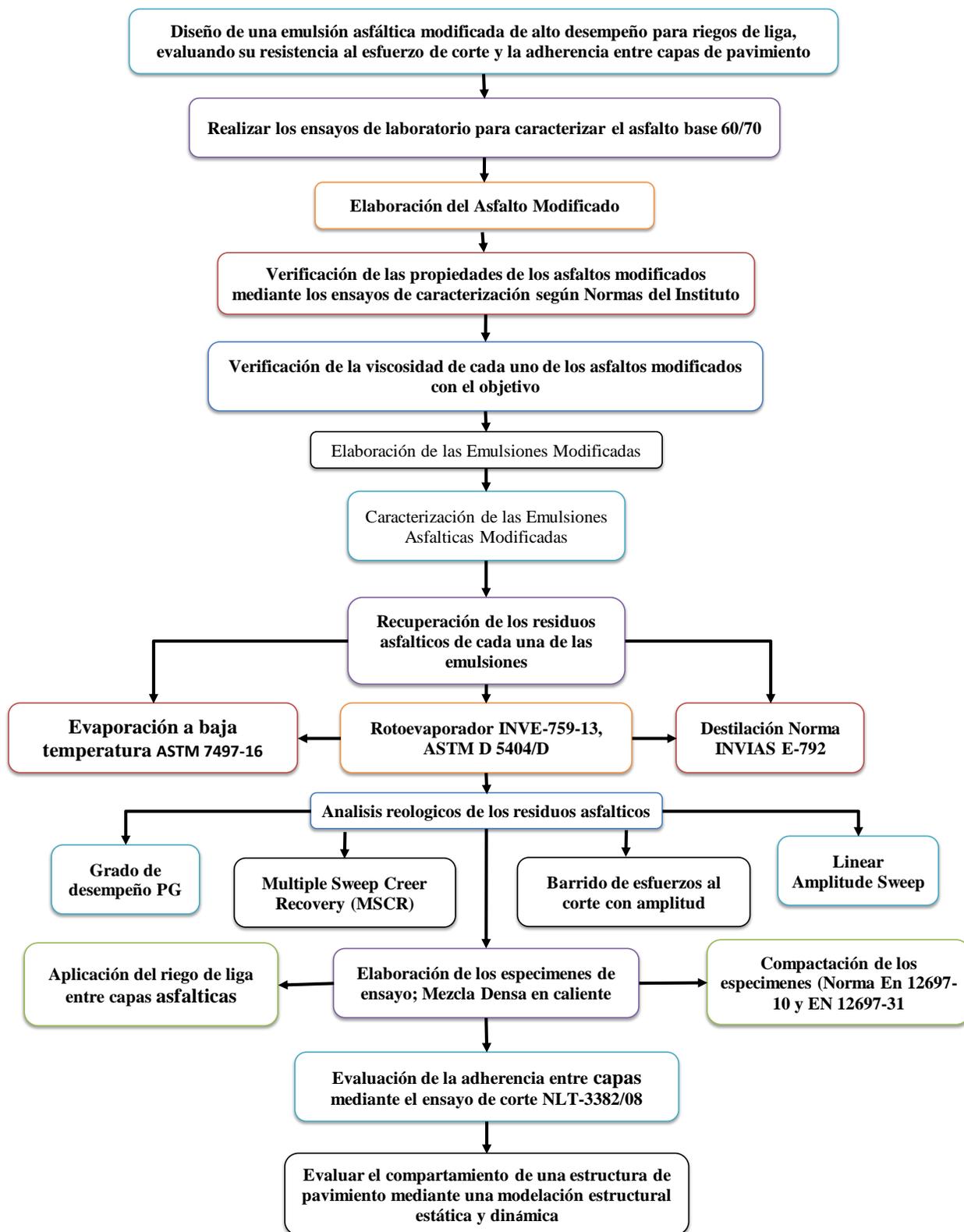
### **3. Materiales y metodología**

Las emulsiones asfálticas modificadas de alto desempeño, utilizadas para riego de liga, requieren el cumplimiento de los parámetros establecidos en el acervo normativo que rige la construcción de carreteras, para sus componentes (cemento asfáltico, agentes modificadores), fabricación y desempeño del producto final, el cual se evaluará a partir de ensayos normalizados que permitan sensibilizar su comportamiento bajo los requerimientos de trabajo.

En el desarrollo del presente capítulo se especifican los materiales y metodología utilizados para fabricación de emulsiones asfálticas modificadas, y la metodología de ensayo en su aplicación, de la siguiente manera:

1. Elaboración del asfalto modificado
2. Elaboración de las Emulsiones asfálticas modificadas.
3. Recuperación de los residuos asfálticos de cada una de las emulsiones.
4. Análisis reológico de los residuos asfálticos.
5. Evaluación de la adherencia entre capas.
6. Evaluación del comportamiento de una estructura de pavimento mediante una modelación estructural estática.

En la figura 4 se presenta de manera resumida la metodología adoptada en el desarrollo del trabajo.



**Figura 4. Metodología para el diseño de una emulsión asfáltica modificada de alto desempeño para riegos de liga, evaluando su resistencia al esfuerzo de corte y la adherencia entre capas de corte (Fuente propia)**

### **3.1 Materiales empleados en el proyecto**

#### **3.1.1 Cemento Asfáltico**

El material de base utilizado para la incorporación de los agentes modificadores es un Cemento Asfáltico (AC) con grado de penetración 60-70 proveniente de la Refinería del municipio de Barrancabermeja, Departamento de Santander; cumpliendo con la caracterización física exigida por el Instituto Nacional de Vías en el Artículo 410 -13.

La cantidad de cemento asfáltico utilizado para cada uno de los asfaltos modificados, como base para fabricar las emulsiones asfálticas, fue de 6000 gramos.

#### **3.1.2 Agentes Modificadores y Aditivos.**

En la fabricación de las diez (10) emulsiones asfálticas, nueve (9) de ellas se elaboraron con asfalto modificado y una con asfalto convencional; A continuación, se relacionan los agentes modificadores (Fotografía 1), describiendo brevemente cada uno:

1. Látex, SBR: Aditivo de látex de copo limero de estireno butadieno carboxilado que está diseñado como un adhesivo integral para capas de unión de cemento, morteros y concreto para mejorar la resistencia de unión y la resistencia química.

2. Polímero Elastoplástico (ELP): fabricado con base en bloques de estireno, se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

3. SBS Lineal: Modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque.

4. GCR (Grano de caucho reciclado): material obtenido de las llantas en desuso de los vehículos automotores, se obtiene mediante procesos de molienda de llantas usadas disminuido en tamaño, este material es utilizado en diferentes obras de ingeniería civil, como lo son en rellenos de terraplenes, materiales de contención, pisos de parques, como modificador en las mezclas asfálticas, entre otros.

5. EVA (Etileno Acetato de Vinilo): Copolímero con alto contenido de Acetato de Vinilo, con baja temperatura fusión y excelente resistencia y tenacidad.

6. Resinas de Copolímeros de Etileno (RCE): Es un copolímero de etileno y acetato de vinilo con una estructura molecular que permite un fácil procesamiento, adhesión, resiliencia, baja

dureza, buenas propiedades de barrera a humedad y a gas. Este presenta una excelente estabilidad térmica, y bajo contenido de oligómeros, las propiedades reológicas de la resina permiten procesamiento en equipos de películas planas y sopladas.

7. Ácido Saponificado: se utiliza para asfaltos en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

8. VAE (Vinil Acetato de etileno): mejora la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas.

9. GCR mejorado: mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta y tratamientos superficiales.

Adicionalmente se usaron aditivos fluxantes para reducir la viscosidad.



**Fotografía 1. Agentes modificadores (Fuente propia)**

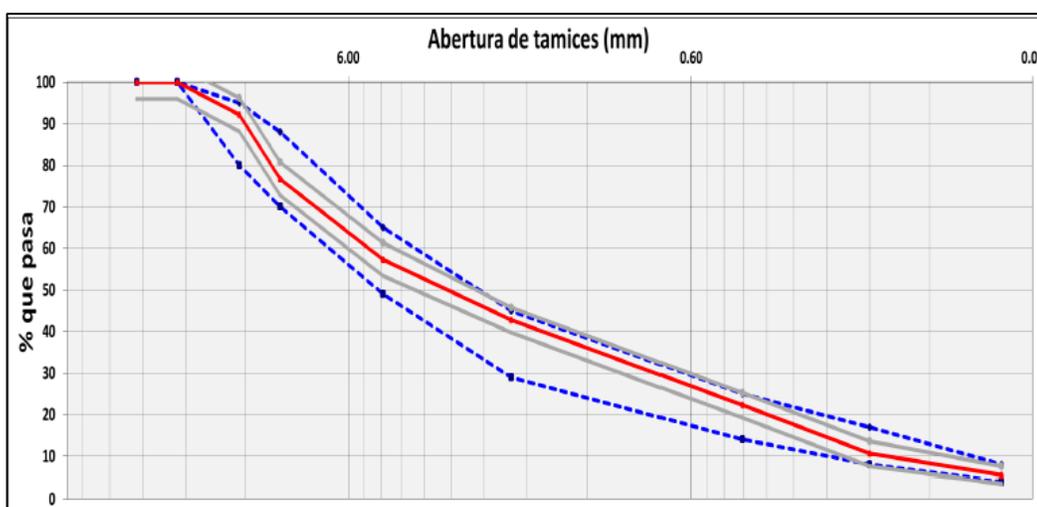
### ***3.1.3 Mezcla Asfáltica tipo MDC-19.***

Considerando que, en Colombia el tipo de mezcla asfáltica más usada son las mezclas asfálticas en caliente de gradación continua, los ensayos para la determinación de la adherencia se realizaron sobre muestras elaboradas con mezcla tipo MDC-19. El diseño de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua fue elaborado bajo la metodología Marshall.

### 3.1.4 Agregados Pétreos.

Los agregados pétreos provienen de la fuente de explotación (Rio Sogamoso, en el departamento de Santander); la Gravedad Especifica Efectiva (Gse) es igual a  $2.630 \text{ gr/cm}^3$  para el lote de agregados pétreos muestreados y usados en el diseño. Los agregados pétreos y el llenante mineral cumplieron con los requisitos exigidos en el Artículo 450, (Ver Tabla 4, Anexo A Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013)) Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua, plasmado en las especificaciones generales para construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, para un Nivel de Transito NT3, los resultados de los ensayos se muestran en el Anexo B. Tabla 5. Resumen de Ensayos de Caracterización de los agregados pétreos (Fuente propia).

El agregado fino también cumplió con las especificaciones exigidas en la tabla 450-4 (Ver Anexo C. Tabla 6. Proporción máxima de arena natural en el agregado para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013)). Su distribución granulométrica se ubica dentro de las franjas granulométricas (Figura 5) exigidas según la Tabla 450-6 (Ver Anexo D. Tabla 7. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013)). Los resultados del análisis granulométrico combinación MDC-19 se plasman en el Anexo E. Tabla 8. Análisis granulométrico combinación MDC-19 (Fuente propia)



**Figura 5. Curva de comportamiento granulométrico de la mezcla asfáltica MDC-19 (Fuente propia)**

### **3.1.5 Diseño Marshall MDC-19 para capa de rodadura (Nivel de Transito NT3)**

El diseño Marshall se realizó para diferentes porcentajes de cemento asfáltico 60/70 normalizado aditivado al 1.0% con promotor de adherencia. Las mezclas se elaboraron teniendo en cuenta que las temperaturas promedio de mezclado y compactación son 150°C y 135°C respectivamente, para el tipo de asfalto empleado, según su curva reológica.

#### **Materiales utilizados**

Material de arrastre del Rio Sogamoso – Departamento de Santander

Asfalto Sólido Ecopetrol 60-70

#### **Parámetros de diseño de la Mezcla Densa en Caliente MDC-19. (Formula de Trabajo)**

Contenido de Asfalto %: 5.40

Densidad Bulk: 2.312

Estabilidad óptima, N: 16560

Flujo, mm: 3.07

Gmm Rice: 2.421

Vacíos con aire%: 4.7

Vacíos en Agregados Minerales %: 16.8

Contenido de asfalto, %: 5.40

Vacíos llenos con asfalto, %: 70.7

Filler/ligante: 1.05

Estabilidad/flujo, KN7mm: 5.39

Concentración real de llenante: 0.25

Relación de Agregado Grueso (Ag): 0.60

Porción gruesa del Agregado fino (Af): 0.46

Porción fina del Agregado Fino (AFf): 0.33

Espesor promedio de película de asfalto mínimo, um: 7.82

#### **Compactación**

Golpes por cara: 75

**Nota aclaratoria de los autores: Los parámetros de diseño Marshall de la mezcla asfáltica que se utilice, como, por ejemplo: contenido óptimo de asfalto, estabilidad y flujo Marshall, vacíos de aire, etc., son netamente informativos, pues no tienen ninguna influencia en el cálculo de la resistencia al corte que ofrece un riego de liga. En este punto solo se ha expuesto**

**el caso de exponer los parámetros de diseño de la capa de rodadura MDC-19, con el único fin de comunicar que cumple con los requisitos especificados en la normativa del Instituto Nacional de Vías, INVIAS 2013, así mismo fue verificado para la capa base MDC-25.**

## **3.2 Proceso de modificación**

### ***3.2.1 Formulación y elaboración del asfalto modificado.***

Para cada uno de los asfaltos modificados se utilizaron 6000 gramos de Cemento Asfáltico base por cada polímero usado, las cantidades de polímero se determinaron para garantizar un asfalto base modificado que cumpliera con un PG 82-22 teniendo cierta recuperación elástica medida por el reómetro dinámico de corte (Ver Anexo F. Tabla 9. Grado de desempeño PG, de los asfaltos modificados formulados, a la temperatura alta según AASHTO T 315-12 (R2016) (Fuente propia)); se usaron aditivos para algunas muestras la cual se determinó una cantidad suficiente para lograr una viscosidad menor a 600 Pa.s cuando este estuviese a 150°C.

Para cada formulación, se determinó el grado de desempeño (PG) para temperaturas altas y bajas, estableciendo como mínimo un valor PG de 82°C, para la calidad del desempeño a temperatura alta. Debido a lo anterior, se pudo ubicar a cada formulación de asfalto modificado en el mismo estándar de desempeño, asegurando que cualquier resultado en la evaluación de la resistencia al corte de los especímenes de mezcla asfáltica, no sea influenciado por una calidad diferente del ligante modificado.

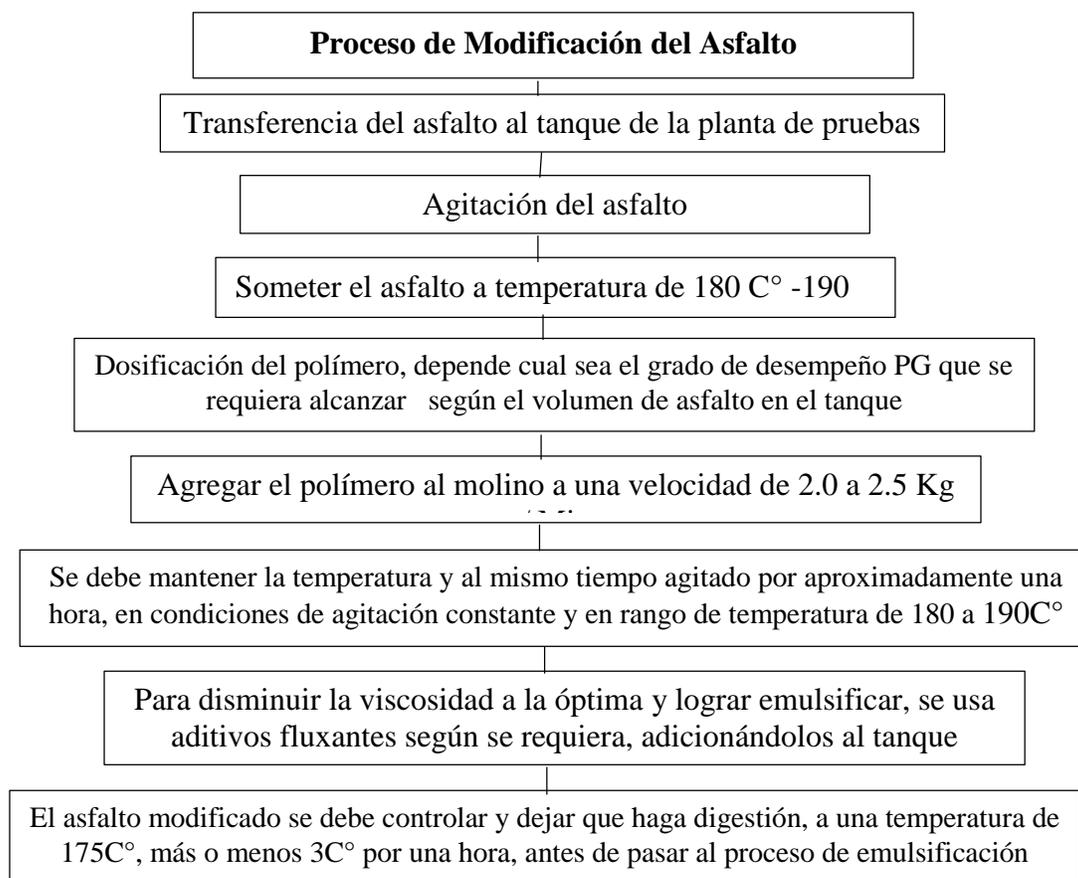
El equipo utilizado para la modificación de las muestras de asfalto modificado fue un molino coloidal SOLPER-75 con una capacidad de 3000gr y 3000RPM, el principio básico de este consiste en la acción que produce un rotor estriado al girar a 3000 revoluciones por minuto contra un estator fijo, también estriado, siendo sometido el asfalto a un intenso trabajo hidráulico, corte y rozamiento, el proceso de modificación se plasma en la figura 6 proceso de modificación del asfalto.

### ***3.2.2 Características físicas del asfalto modificado***

Se realizaron los ensayos de laboratorio descritos en la Tabla 414-1 Especificaciones de asfalto modificado con polímeros (Anexo G, Tabla 10. Especificaciones del asfalto modificado con polímeros (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013)) y la Tabla 413-3 Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado, garantizando que todas las

muestras cumplieran con dichas especificaciones tal como lo indica la tabla 11 del Anexo H. Ensayos de Caracterización de los asfaltos modificados (Fuente propia).

La verificación de la viscosidad de los asfaltos modificados se realizó con el fin de determinar que estas sean menor a 600 Pa.s a una temperatura de 150°C, utilizando el Viscosímetro Brookfield Modelo RV-2, para poder garantizar una mejor incorporación de asfalto de modificación y la solución jabonosa al momento de realizar cada una de las emulsiones y evitar que se sedimenten rápidamente.



**Figura 6. Esquema del Proceso de modificación del asfalto (Fuente propia)**

### 3.3 Fabricación y formulación de las emulsiones asfálticas

#### 3.3.1 Proceso de fabricación

Inicialmente se verificó el potencial para la emulsificación de los asfaltos modificados formulados, mediante el chequeo de la viscosidad con ayuda del Viscosímetro Brookfield Modelo RV-2, para poder fabricar las emulsiones, y obtener mediante tres métodos de recuperación

propuestos, los residuos asfálticos, contrastando nuevamente el grado de desempeño objetivo seleccionado, PG 82°C, seleccionando para todas las siguientes etapas de este estudio, el método de recuperación que garantiza la mínima alteración de las propiedades reológicas originales del asfalto modificado.

Una vez verificadas y ajustadas las fórmulas de los asfaltos modificados para poder alcanzar satisfactoriamente la emulsificación, se procedió a la fabricación de las emulsiones asfálticas modificadas en un Molino Coloidal SOLPER-75 (Ver Fotografía 2), el mismo equipo utilizado para la elaboración del asfalto modificado. El proceso de emulsificación se especifica a continuación:

- Como punto inicial se estableció la temperatura del asfalto y la de la solución jabonosa según lo descrito.
- Se preparó el asfalto modificado base a la temperatura de producción, normalmente entre 140 a 150°C para garantizar que la emulsión no sobrepase temperaturas de 95°C, ya que a esta temperatura el agua empieza a evaporarse.
- Se preparó la solución jabonosa usando un emulgente rápido para emulsiones del tipo CRR-1h, que son las especificadas por el Instituto Nacional de Vías, para riegos de liga. El emulgente debe tener un pH aproximadamente de 2.0% para poderlo trabajar.
- En el molino coloidal, se procede a incorporar primero el emulgente y luego poco a poco se adiciona el asfalto caliente para que este se incorpore correctamente. Este proceso dura alrededor de treinta minutos por cada emulsión.

En total se elaboraron diez (10) tipos de emulsiones asfálticas, de las cuales nueve fueron modificadas y una convencional; a continuación, se mencionan los tipos desarrollados:

1. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido tipo 1 (E.A. CRR-1). Realizada con Cemento Asfáltico 60/70 Normalizado
2. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido (E.A. CRR-1m), modificada con (Látex, SBR)
3. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido (E.A. CRR-1m), modificada con un Polímero Elastoplástico (ELP).
4. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido (E.A. CRR-1m), modificada con SBS Lineal.

5. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido (E.A. CRR-1m), modificada con GCR (Grano De Caucho Reciclado).

6. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido (E.A. CRR-1m), modificada con EVA (Etileno Acetato de Vinilo).

7. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido (E.A. CRR-1m), modificada con Resinas de copolímeros de etileno (RCE).

8. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido (E.A. CRR-1m), modificada con Ácido Saponificado.

9. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido (E.A. CRR-1m), modificada con VAE (Vinil Acetato de Etileno).

10. Emulsión Asfáltica Catiónica de Rompimiento Rápido (E.A. CRR-1m), modificada con GCR PG.



**Fotografía 2. Molino Coloidal SOLPER-75 (Fuente propia)**

### ***3.3.2 Caracterización física de las emulsiones asfálticas modificadas.***

Una vez elaboradas las emulsiones asfálticas modificadas se procedió a su caracterización física, según su naturaleza catiónica de rompimiento rápido, siguiendo las especificaciones del Instituto Nacional de Vías, en su Artículo 415-13 “Suministro de emulsión asfáltica modificada

con polímeros”, tomando como referencia la Tabla 415-1, Especificaciones de emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímeros, para rotura rápida CRR-1m (Ver Anexo I. Tabla 12. Especificaciones de emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímeros (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013)).

Se realizaron los diferentes ensayos sobre la emulsión asfáltica modificada y se verificó que cumplieran con todas las especificaciones exigidas, además, se compararon los resultados con la especificación internacional del departamento de transportes de Texas TDOT -ítem 300. 2.4, Tabla 10, CRS-1P, los resultados se plasman en la Tabla 13 del Anexo J. Ensayos de Caracterización de las emulsiones modificadas (Fuente propia).

### **3.4 Caracterización física y reológica del asfalto residual**

#### **3.4.1 Métodos de recuperación del asfalto residual.**

Se considerarán las metodologías utilizadas para la recuperación en laboratorio del residuo asfáltico proveniente de emulsiones asfálticas, que permitan garantizar la menor alteración de las propiedades originales del cemento asfáltico utilizado en la emulsificación. Lo anterior, evaluando tres (3) metodologías para la recuperación del residuo asfáltico, a continuación, se explica brevemente cada uno de ellos.

##### *3.4.1.1 Destilación emulsiones asfálticas ASTM D 6997-12;(E-762) Normas y Ensayos de materiales para carreteras –Instituto Nacional de Vías.*

Esta norma se utiliza para obtener el residuo de un asfalto emulsionado, el cual se puede usar para ensayos adicionales en dispositivos tales como un reómetro de corte dinámico (DSR). Las temperaturas de evaporación más bajas de este procedimiento proporcionan condiciones que están muy próximas a las técnicas de aplicación de estos materiales. Esta práctica podría utilizarse en lugar de técnicas de recuperación tales como las de ASTM D6934 y D6997, cuando las temperaturas utilizadas en dichas normas afectarían negativamente al residuo. En este método se calentó la muestra de emulsión asfáltica en un matraz de destilación de aleación de aluminio a 260 C° y se midió el volumen obtenido de agua y de destilado (Fotografía 3).



**Fotografía 3. Esquema del equipo para el ensayo de destilación de emulsiones asfálticas (Fuente propia)**

*3.4.1.2 Práctica estándar recuperación residuos de asfalto emulsionado mediante evaporación a baja temperatura ASTM 7497-16*

Esta norma de ensayo se usa para determinar cuantitativamente el residuo y los destilados aceitosos de las emulsiones asfálticas, tanto para verificar el cumplimiento de la especificación aplicable, como para evaluar la emulsión en servicio, para el control de calidad y para la investigación. También, para obtener el residuo y el destilado aceitoso para ejecución de ensayos posteriores. El método no es apropiado sobre emulsiones que contengan látex o polímeros, aunque algunas agencias lo utilizan, estipulando temperaturas de destilación más bajas.

*3.4.1.3 Recuperación de asfalto de una solución por Rotavapor ASTM D 5404/5404 M-11(INV- E 759-13); Recuperación del asfalto de una solución utilizando el evaporador rotatorio.*

En el método mencionado por el Instituto Nacional de vías la solución de solvente y asfalto se destilan parcialmente sumergido en un matraz rotatorio de destilación del rotavapor en un baño de aceite caliente, mientras la solución se somete a vacío parcial y a un flujo de gas nitrógeno o de dióxido de carbono. El equipo utilizado fue un evaporador rotatorio (Ver Fotografía 4).



**Fotografía 4. Evaporador rotatorio y sistema de recuperación (Fuente propia)**

Con el propósito de determinar las características físico-mecánicas de los residuos asfálticos de las emulsiones asfálticas utilizadas en la pavimentación, es necesario recuperar el cemento asfáltico de forma que sus propiedades reológicas no se afecten significativamente, el asfalto recuperado mediante el ensayo descrito por la presente norma se puede ensayar empleando los mismos métodos que para el cemento asfáltico original, lo que permite comparar sus propiedades antes y después del proceso de emulsificación.

#### ***3.4.2 Caracterización reológica avanzada***

Los análisis se realizaron en un Reómetro de Corte Dinámico Marca TA Instruments Modelo DHR-3 (Fotografía 5). A continuación, se explican de manera más detallada uno a uno los estudios realizados a los residuos asfálticos obtenidos:



**Fotografía 5. Reómetro de corte dinámico (Fuente propia)**

- Grado alto de desempeño (PG) AASHTO T 315-12 (R2016): Este método de prueba determina el parámetro  $G^*/\sin \delta$  (AASHTO M 320-10) el cual es empleado para medir la resistencia de los asfaltos a la deformación permanente. Este parámetro es parte de la clasificación de grado PG (Performance Grade), desarrollada en Estados Unidos por la FHWA (*Federal Highway Administration*) bajo el programa SHARP (*Strategic Highway Research Program*).

- Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la prueba del *Multiple Sweep Creep Recovery* (MSCR) AASHTO T 350-14. El parámetro  $G^*/\sin \delta$  ha evolucionado a un nuevo parámetro: "Jnr" (*Non Recoverable Creep Compliance*), que a su vez deriva de una prueba de MSCR (*Multi Stress Creep and Recovery*), la cual simula de mejor manera las condiciones de trabajo a las que el asfalto será sometido en el pavimento, haciendo énfasis en la resistencia a la deformación permanente.

- Linear Amplitude Sweep (LAS) AASHTO TP-101-14.

El método de ensayo es utilizado con ligante envejecido usando AASHTO T 240 (RTFOT) y AASHTO R 28 (PAV), para simular el envejecimiento estimado para pavimentos asfálticos en servicio. La prueba comienza con un barrido de frecuencia para determinar las propiedades reológicas y luego una serie de ciclos de carga oscilatorios, sistemáticamente y linealmente en aumento de amplitud a una frecuencia constante para causar daños por fatiga acelerada.

El enfoque del daño continuo se utiliza para calcular la resistencia a la fatiga tanto en la determinación de las propiedades reológicas, como en los resultados del barrido de amplitud de carga lineal.

### **3.5 Evaluación de la adherencia entre capas asfálticas**

#### **3.5.1 Elaboración de especímenes de ensayo.**

En el desarrollo de la investigación, se fabricaron especímenes de mezcla asfáltica, modificando los lineamientos de la norma española NLT 382/08.

Las principales adaptaciones realizadas se resumen de la siguiente manera:

- Se ocuparon los espesores reales de cada capa según el diseño estructural.
- La temperatura de compactación fue seleccionada en base a la carta de viscosidad del cemento asfáltico.
- Se han usado únicamente especímenes cilíndricos, fabricados en laboratorio de diámetro 100 mm, (Fotografía 6), se descartó el uso de cilindros de 150 mm puesto que no son usados en Colombia.
- En la compactación de los especímenes se utilizó el compactador giratorio, descrito en la norma UNE EN 12697-31 (Fotografía 8).
- Los especímenes de mezcla se han fabricado con asfalto Penetración 60/70, según clasificación Artículo 410, Tabla 410-1, usando la curva granulométrica Tipo MDC-19 Artículo 450, Tabla 450-6, con espesor de 40 mm para la rodadura y se ha usado la curva granulométrica Tipo MSC-25, Artículo 450, Tabla 450-6, con espesor de 80 mm para la capa de base, todo referente a las especificaciones de la construcción de carreteras 2013 del Instituto Nacional de Vías.

Estas modificaciones, son una recomendación de los autores para adaptar el diseño del riego de liga a las condiciones particulares de cada proyecto constructivo de pavimentos para carreteras. La justificación de la recomendación consiste en reflejar mejor el modelo estructural escogido, al momento de poner en evaluación la calidad del riego de liga que se pretende utilizar para unir las capas asfálticas.

Siguiendo con el procedimiento, se compactaron dos especímenes por cada tasa de aplicación: 100, 200, 300 y 400 grs. de residuo asfáltico/m<sup>2</sup> y por cada uno de los diez tipos de emulsión (una convencional, que es la muestra control y nueve modificadas), generando una matriz de 80 especímenes de prueba (Tabla 2), para el estudio del riego de liga entre capas asfálticas.

Se procedió con la elaboración y compactación de la capa base bituminosa o soporte, una vez extendida la emulsión mediante el uso de un atomizador sobre la capa soporte se mantuvo la probeta durante 24 horas a una temperatura de 20 a 25°C, antes de proceder a la fabricación y compactación de la capa superior (Fotografía 7).

Una vez frías las capas asfálticas de soporte, se procedió a la aplicación del riego de liga entre las capas asfálticas MDC-19, y se hizo variando la dosificación de residuo asfáltico remanente en el riego, según las tasas descritas anteriormente.

Se extendió sobre la cara superior de la capa soporte, el tipo de emulsión de adherencia a la tasa que se quería evaluar, procurando que ésta se repartiera de la forma más homogénea posible sobre la superficie. La compactación de cada capa se realizó a la temperatura de 150°C siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. El espesor de esta capa superior fue de 40 mm.



**Fotografía 6. Especímenes cilíndricos de diámetro 100mm para ensayo de corte (Fuente propia)**



**Fotografía 7. Especímenes compactados unidos mediante el riego de liga (Fuente propia)**



**Fotografía 8. Compactador giratorio (Fuente propia)**

### 3.5.2 Evaluación de adherencia entre capas mediante el ensayo de corte NLT-382 /08

Una vez elaborados los especímenes de mezcla asfáltica de prueba, se procedió a la evaluación de la calidad de adherencia entre capas mediante el ensayo de corte NLT-382 /08, usando el dispositivo “B”, donde a partir del diagrama carga-deformación de cada espécimen ensayado se determinaron las siguientes magnitudes:

- Carga máxima de rotura,  $F_{m\acute{a}x}$ , expresada en N.
- Resistencia a esfuerzo cortante,  $T_c$ , calculada a partir de la carga máxima de rotura mediante las expresiones:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (1)$$

Dónde:

$d$ = Promedio de los Diámetros ( $\pm 0,01$  mm), y  $S$ = Sección Transversal ( $\text{mm}^2$ )

$$T_c = \frac{\left(\frac{F_{m\acute{a}x}}{2}\right)}{S} \quad (2)$$

Dónde:

$F_{m\acute{a}x}$ = Carga máxima de rotura (N)

$S$ = Sección Transversal ( $\text{mm}^2$ )

$T_c$ = Resistencia a esfuerzo cortante en  $\text{N}/\text{mm}^2$  (MPa)

También puede determinarse la energía de deformación hasta rotura, correspondiente al área limitada bajo la curva de ensayo hasta alcanzarse el valor de carga máxima.



**Fotografía 9. Proceso del ensayo de corte NLT 382/08**

### **3.6 Evaluación del comportamiento de una estructura de pavimento mediante una modelación estructural estática.**

Determinar si una capa de liga está diseñada para reducir costos de mantenimiento, rehabilitación y una mayor vida en servicio, se ha convertido un reto en la ingeniería de pavimentos, esta situación depende de muchos factores como el tipo de liga, la dosificación, el espesor de la capa, la gradación de la mezcla, la carga de tránsito, la temperatura y la afectación por humedad, etc. Por ello, se requiere modelar apropiadamente una estructura de pavimento, asegurándonos que el tipo y tasa de aplicación del ligante, ofrezca las garantías para soportar los esfuerzos de corte que se generan en la interfaz. Actualmente, varios métodos de diseño de multicapa elástica consideran la condición de interfaz con unión completa entre las capas de mezcla de concreto asfáltico y totalmente desligadas. Estas dos suposiciones realmente no representan el comportamiento real de la interfaz de enlace y pueden conducir a un diseño inapropiado de la estructura del pavimento, puesto que en ninguno de esos dos casos se tiene en cuenta el comportamiento de la capa de liga. Para incorporar el comportamiento de la liga, en el método de diseño del pavimento, se tuvo como primer paso ubicar espacialmente tanto las cargas, como los puntos de evaluación estructural, tal como se muestra en Anexo L. Figura 15. Ubicación de las cargas en la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia).

Además, se establecen las magnitudes de las cargas, presión de contacto (inflado) y el radio de la carga.

Posterior a la ubicación de los puntos de verificación y las características de las cargas, se procedió a definir el modelo de estructura de pavimento a estudiar y obtener su estado de esfuerzos. La estructura seleccionada corresponde a la típica utilizada en Colombia para tránsitos altos, clasificados como NT3, con Ejes equivalentes de N80KN > 5 millones, clasificados de esta manera en el Artículo 100, Tabla 100-1, de Instituto Nacional de Vías. Los detalles de la estructura se muestran en Anexo M. Tabla15. Características de la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia), con todas las características, necesarias para realizar la modelación.

### ***3.6.1 Programa de análisis elástico lineal multicapa WinJULEA.***

El software de teoría multicapa elástico WinJULEA se empleó para modelar y encontrar la respuesta estructural del pavimento, específicamente determinar los esfuerzos de corte en la interfaz de enlace, y poder compararla con los resultados de los esfuerzos cortantes alcanzados por los materiales de liga, según sus dosificaciones de tasas de riego. Se supone que cada capa es homogénea, tiene un espesor finito (excepto la subrasante) y es isotrópico. También supone que hay una adherencia total entre las capas, y que no hay ninguna fuerza de corte en la superficie de la rodadura.

En la Figura 16, Anexo N. Entrada de datos estructurales al programa WinJULEA y esquema de espesores de la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia), se muestra la ventana de entrada de las características estructurales de las capas, la ubicación espacial y los puntos de verificación, establecidos anteriormente en la Tabla de la Figura 9. El objetivo fue obtener el estado de esfuerzos por carga estática, producido por los ejes equivalentes de 8.2 y 13 toneladas.

En este estudio, se ingresaron datos de la forma que los solicita el programa WinJULEA. Según los datos de ingreso de la Figura 16, Anexo N. Entrada de datos estructurales al programa WinJULEA y esquema de espesores de la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia), las unidades del espesor de capas, coordenadas de los puntos de evaluación y la profundidad de cálculo, están expresadas en milímetros (mm). Mientras que los módulos elásticos, están en unidades de Mega Pascales (Mpa). Por último, el programa usa la sigla PR, para abreviar el nombre del parámetro Poisson's Ratio (Razón o Coeficiente de Poisson). En la salida de cálculo del programa, se mostraron los estados de esfuerzo, en el cual interesa únicamente el parámetro "Máximo Esfuerzo de Cortante", debido a que este criterio es seleccionado para usar la "Teoría de fallo elástico". Esta teoría ha demostrado siempre dar predicciones seguras, además se emplea

únicamente para predecir fluencia y, por lo tanto, es aplicable solo a los materiales dúctiles, como es el caso del asfalto residual en un riego de adherencia.

La teoría antes mencionada aplica únicamente para el caso de un material que se comporte puramente dúctil a tensión. Dado este caso, se propuso definir como factor de seguridad para diseño de los riegos de liga, lo siguiente:

La relación entre la Resistencia Máxima al Esfuerzo de Corte ( $SSy$ ) de un espécimen normalizado evaluado en laboratorio a prueba directa en cortante puro, según NLT 382/08, y el Esfuerzo Máximo Cortante ( $\tau_{\text{máx}}$ ) medido en la interfaz de enlace entre capas, por la teoría multicapa elástica lineal, debe ser mayor a 1.

Es decir, para fines prácticos, un diseño de riego de adherencia en cuanto a tipo de ligante y tasa de dosificación por  $m^2$ , puede ser considerado seguro, si se cumple con la relación:  $SSy > \tau_{\text{máx}}$ .

El funcionamiento correcto del pavimento depende en gran medida de las propiedades mecánicas de los materiales que lo constituyen. Las estructuras de pavimento, una vez puestas en servicio, están sujetas a cargas normales repetidas y a esfuerzos cortantes que varían sus magnitudes con el paso de los vehículos.

### ***3.6.2 Modelación estructural mecánico-empírica.***

Para caracterizar el efecto de la condición de adherencia en el desempeño del pavimento flexible y medir las consecuencias de no determinar previamente la calidad de la liga, su tasa óptima, y así garantizar que se cumpla el concepto de “interfaz de adherencia con total fricción”, se realizó su modelación en el programa AASHTOWare®. Este es un modelo avanzado de predicción de desempeño estructural (Teoría Mecánico-Empírica), al que se le puede indicar, cuando la adherencia en la interfaz de enlace, entre las capas bituminosas, no será 100% efectiva. Esta herramienta permitió hacer una reflexión sobre la influencia de cometer el error de no diseñar la calidad del enlace, sobre la caída de la vida de servicio del pavimento. Esto dará una guía de la importancia de que tiene usar un ligante emulsionado, del tipo y en la tasa de aplicación que realmente cause adherencia eficiente y efectiva.

Como ya se aclaró, cada programa tiene su interfaz de entrada de datos, y este constituye el primer paso para modelar. En consecuencia, en la Figura 18 (Anexo P), se muestra el ingreso de todos los datos requeridos por el programa para el Nivel 2 de precisión de diseño.

La estructura ingresada en AASHTOWare®, posee las mismas características estructurales de las capas de la modelación estática en WinJULEA. El eje equivalente de carga es el de 8.2 Ton, Simple Rueda Doble (SRD), con un volumen de repeticiones en los 20 años de vida de diseño prevista, de 10 millones de ESAL`s (*Equivalent Standar Axel Load* o estándar equivalente de carga). En la Figura 19 (Anexo Q), se muestra la entrada de los criterios de desempeño del pavimento.

La citada Figura 19 (Anexo Q), muestra que el sistema métrico empleado es el anglosajón. Además, se define la confiabilidad del diseño en 90%, seleccionado a partir de la importancia del volumen de tránsito y la precisión que se quiere tener en la modelación del deterioro. Para terminar de definir los datos de entrada del Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM), se determinan los perfiles de temperatura y humedad en la estructura del pavimento durante el período de diseño, calculados en la guía de diseño a través del EICM (Figura 20, Anexo R).

Cuando todos los datos de entrada que solicito el programa fueron ingresados (incluyendo los límites para criterios de falla, Ver Anexo Q. Figura 19), se procedió a ejecutar el programa para la condición “Total adherencia y fricción entre capas” y “Adherencia en la interfaz de enlace afectada un 22%”. Este valor de afectación se calculó tomando en consideración que, si seleccionamos 0.6 MPa (Valor del Esfuerzo Máximo Cortante ( $\tau_{\text{máx}}$ ) para la modelación en WinJULEA del eje de 8.2 Ton), como el valor que representa el 100% de adherencia en la interfaz, entonces al promediar los valores de Resistencia Máxima al Esfuerzo de Corte ( $SS_y$ ), de los tipos de ligante que no alcanzan 0.6 MPa), se obtiene el valor de 0,467 MPa, lo cual es una relación del 22% en la caída de la resistencia requerida (0.6 MPa). Todo lo anterior basado, según el criterio de falla seleccionado: “La relación entre la Resistencia Máxima al Esfuerzo de Corte ( $SS_y$ ) de un espécimen normalizado evaluado en laboratorio a prueba directa en cortante puro, según NLT 382/08, y que el Esfuerzo Máximo Cortante ( $\tau_{\text{máx}}$ ) medido en la interfaz de enlace entre capas por la teoría multicapa elástica lineal, sea mayor a 1”.

## 4. Resultados y Análisis

### 4.1 Caracterización física y reológica de los ligantes asfálticos modificados

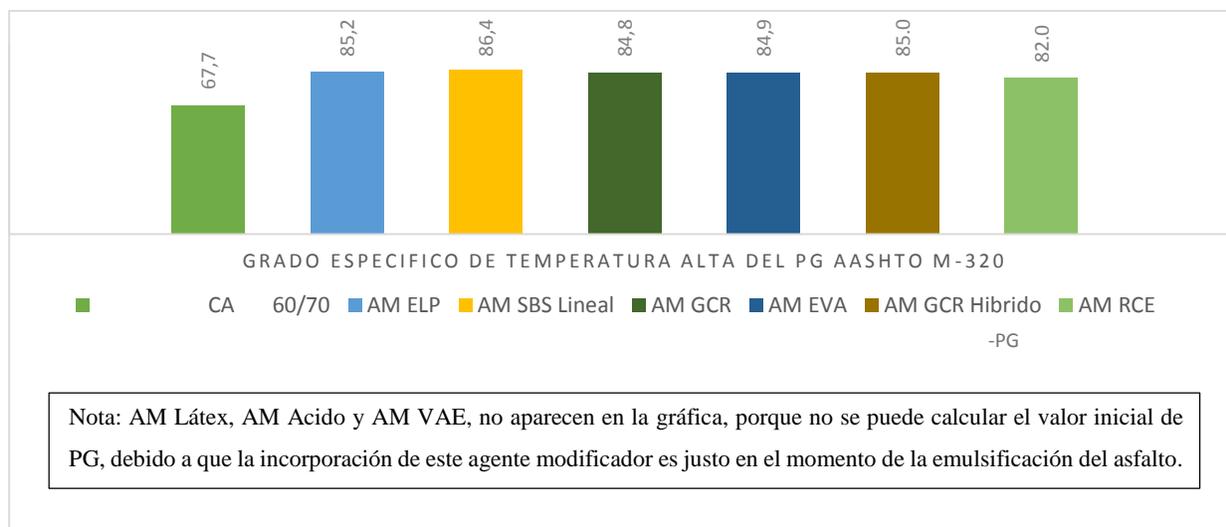
#### 4.1.1 Caracterización física.

Los resultados de la caracterización física del Cemento Asfáltico con grado de penetración 60/70, modificado con cada uno de los agentes modificadores, según los ensayos requeridos por el Artículo 414, Tabla 414-1, (INVIAS, 2013), son presentados en la Tabla 11 (Anexo H). Esta caracterización permite tener una idea de los valores alcanzados en cada prueba, sin embargo, en la búsqueda del desempeño, poco o nada se podría interpretar de los mismos para correlacionarlos y predecir su comportamiento como ligante en capas de adherencia. Es importante reportarlos, como herramienta de clasificación para emitir certificaciones de conformidad en el proceso de producción a escala industrial, mas no es correcto hacer comparaciones o evaluaciones profundas sobre ellos.

#### 4.1.2 Caracterización reológica.

##### 4.1.2.1 Grado de desempeño PG.

Con el propósito de optimizar la influencia del tipo de ligante modificado en la evaluación de la resistencia al corte de los especímenes de mezcla asfáltica, se definió que cada asfalto modificado el mismo estándar de desempeño a una temperatura de 82°C, tal como se puede ver en la figura 8.



**Figura 7. Grado de desempeño PG, de los asfaltos modificados formulados, a la temperatura alta según AASHTO T 315-12 (R2016) (Fuente propia)**

#### 4.1.2.2 Evaluación del grado de desempeño de los residuos asfálticos según el ensayo de MSCR.

En la Tabla 2, se observan los resultados de la evaluación del PG a la temperatura de 82°C del ligante asfáltico recuperado de cada una de las emulsiones formuladas, aplicando tres métodos propuestos internacionalmente, con el fin de realizar su evaluación posterior por desempeño.

Método de Recuperación	Estándar AASHTO T-315	CA 60/70	AM Látex	AM ELP	AM SBS Lineal	AM GCR	AM EVA	AM RCE	AM Acido	AM VAE	AM GCR PG
<b>Asfalto Original</b>	PG ALTO	64.0	***	82.0	82.0	76.0*	82.0	82.0	***	***	76.0*
	PG ALTO	67.7	***	85.2	86.4	80.8*	84.9	87.4	***	***	81.0*
<b>Destilación ASTM D 6997</b>	PG ALTO	64.0	64.0	82.0	82.0	76.0	76.0	70.0	76.0	64.0	82.0
	PG ALTO	68.7	69.5	87.5	87.6	78.2	79.5	74.3	79.8	67.8	82.3
<b>Rotovaporador ASTM D 5404/5404 M-11</b>	PG ALTO	64.0	76.0	82.0	82.0	76.0	82.0	82.0	76.0	76.0	76.0
	PG ALTO	66.9	77.6	85.5	86.5	80.6	84.8	82.8	80.4	80.1	80.4
<b>Evaporación baja T° ASTM 7497-16</b>	PG ALTO	64.0	76.0	82.0	82.0	76.0	82.0	82.0	70.0	76.0	76.0
	PG ALTO	66.4	77.8	85.7	86.0	78.0	85.5	82.4	72.2	81.8	80.8

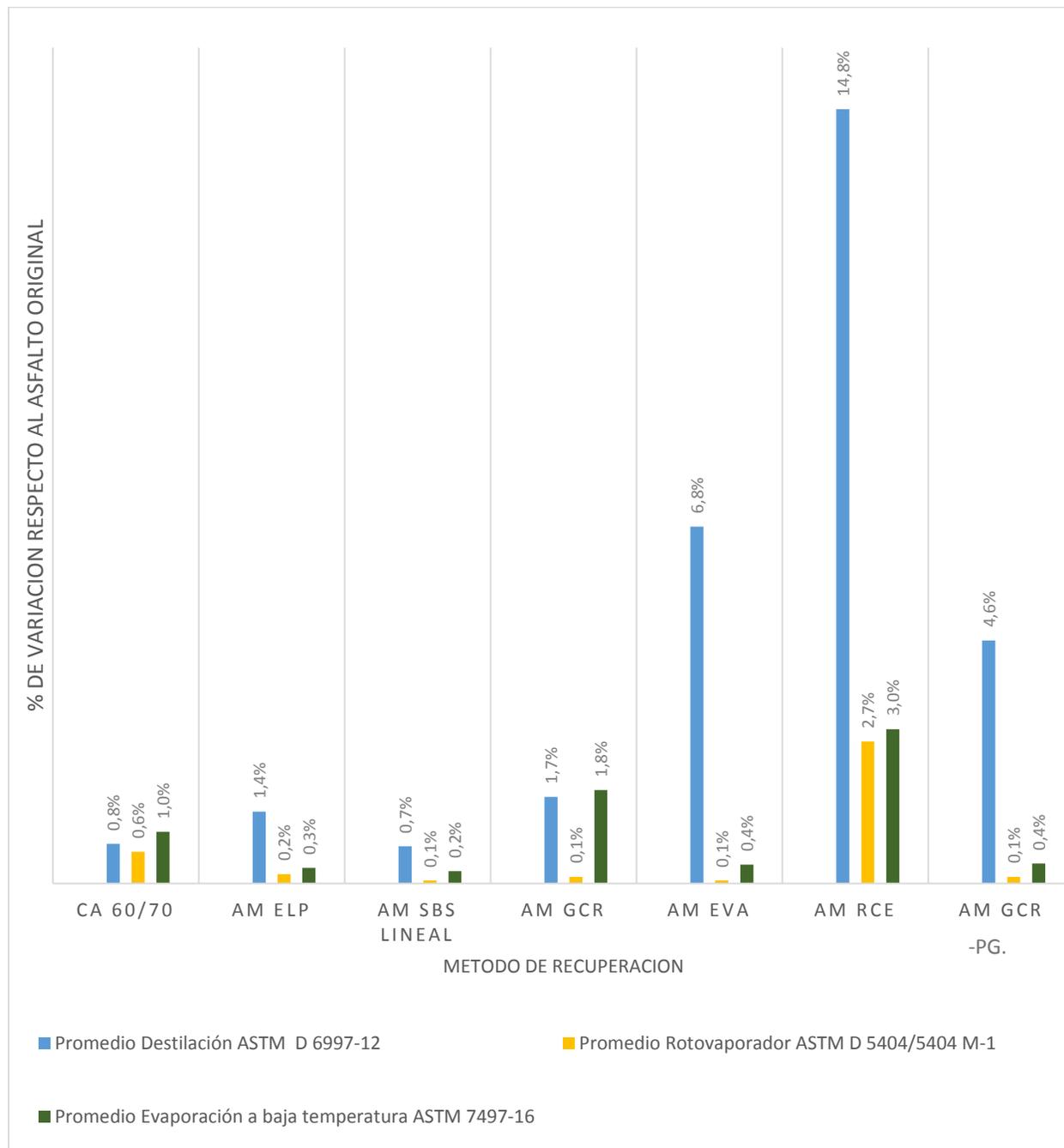
\*Para lograr la emulsificación de algunos agentes modificadores, se llegó a necesidad de reducir la viscosidad de estos, que a su vez redujo el valor de PG Original.

\*\*\*No se puede calcular el valor, debido a que la incorporación de este agente modificador es justo en el momento de la emulsificación del asfalto.

**Tabla 2. Contraste del grado de desempeño a temperatura alta AASHTO T 315-12 (R2016), entre los métodos de recuperación del residuo asfáltico (Fuente propia).**

Se promedió cada par individual de resultados de la tabla anterior, para luego calcular la proporción de variación en valor absoluto, entre asfalto original y recuperado para cada método elegido (Ver figura 8). Estos cambios físicos que experimentan los ligantes emulsionados al ser recuperados, consisten principalmente en endurecimiento por oxidación durante el proceso de calentamiento, aunque el mismo contemple temperaturas bajas. Comparando los métodos, según la figura 9, se puede afirmar que los residuos obtenidos mediante el método de “Destilación (ASTM D 6997-12)”, presentan la mayor variación, seguido de la “Evaporación a baja temperatura (ASTM 7497-16)”. Siendo la recuperación del asfalto por “Rotavapor (ASTM D 5404/5404 M-11)”, el método que más se acerca a las propiedades reológicas que tenía el asfalto modificado en

su estado original antes de emulsificar, por lo cual fue el seleccionado para proseguir con la restante caracterización reológica de los residuos asfálticos (Deformación permanente, recuperación elástica a altas temperaturas y a la fatiga por carga repetitiva).



**Figura 8. Diferencia entre el grado de desempeño a temperatura alta AASHTO T 315-12 (R2016), entre los métodos de recuperación del residuo asfáltico y el asfalto original (Fuente propia)**

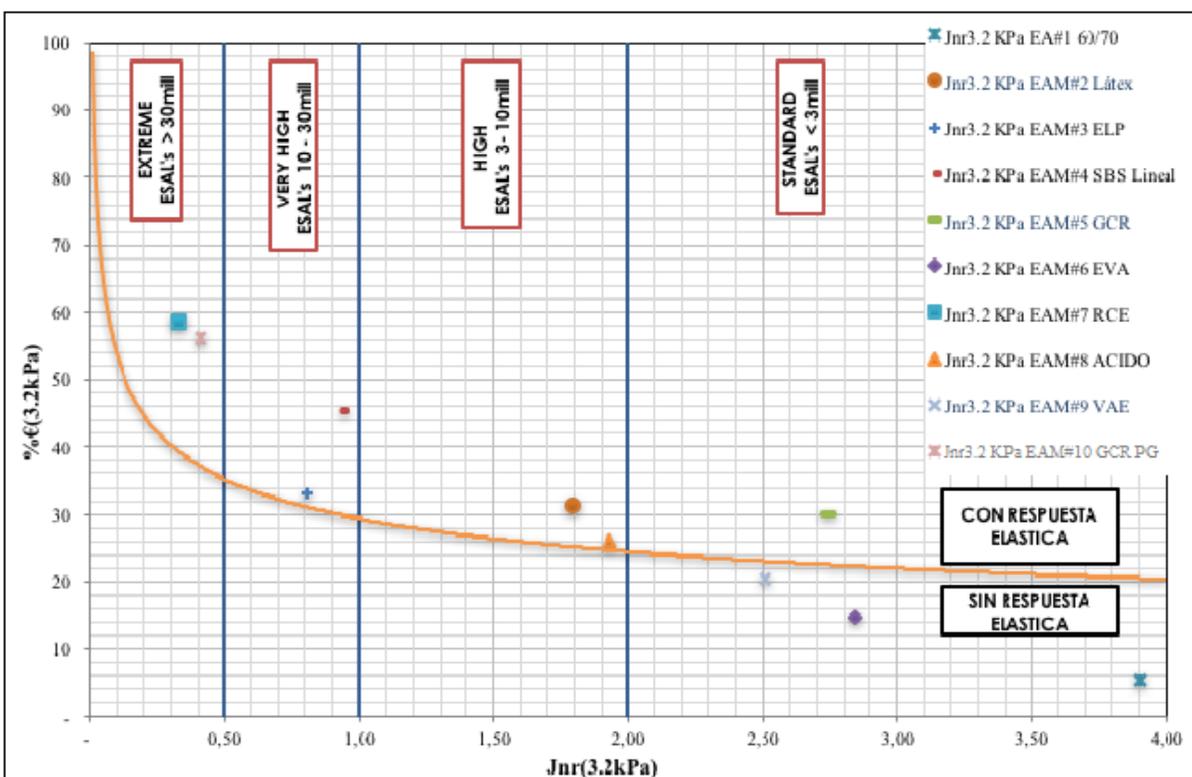
En la tabla 3 y figura 9, se muestran los resultados de la evaluación por desempeño mediante el ensayo MSCR a 82°C, para cada uno de los cementos asfálticos modificados originales y para los residuos de las emulsiones asfálticas, los cuales fueron recuperados mediante Rotavapor.

Estos resultados nos permiten evaluar que fórmula de modificado ofrece para la misma temperatura de desempeño alta, 82°C, propiedades de recuperación elástica y resistencia a la deformación plástica, las cuales pueden tener una alta incidencia en el grado de adherencia de las capas asfálticas como riego de liga, pues ayudarán a resistir el corte inducido por las fuerzas según la carga de tránsito.

Cemento Asfáltico Modificado	Estándar AASHTO T 350-14	CAN 60/70	AM Látex	AM ELP	SBS Lineal	GCR	EVA	RCE	Acido	VAE	GCR PG
<b>Original</b>	% $\epsilon_r$ (3.2)	5.64	***	34.10	46.87	30.88	15.40	62.10	***	***	58.60
	Jnr3.2	3.84	***	0.76	0.87	2.68	2.76	0.23	***	***	0.39
	Nivel de Tránsito	S	***	V	V	S	S	E	***	***	E
	ESAL's (Millones)	< 3	***	10 - 30	10 - 30	< 3	< 3	> 30	***	***	> 30
<b>Residuo de Rotavapor ASTM D 5404/5404 M-11</b>	% $\epsilon_r$ (3.2)	5.39	30.27	33.06	45.09	29.15	14.74	58.40	26.13	18.35	48.42
	Jnr3.2	3.90	1.98	0.81	0.94	2.88	2.85	0.33	1.93	2.82	0.48
	Nivel de Tránsito	S	H	V	V	S	S	E	H	S	E
	ESAL's (Millones)	< 3	3 - 10	10 - 30	10 - 30	< 3	< 3	> 30	3 - 10	< 3	> 30
<b>T° de prueba, (°C)</b>		<b>82</b>									

Nota: En amarillo están resaltados los mejores resultados obtenidos, AM-RCE seguido del AM-GCR PG

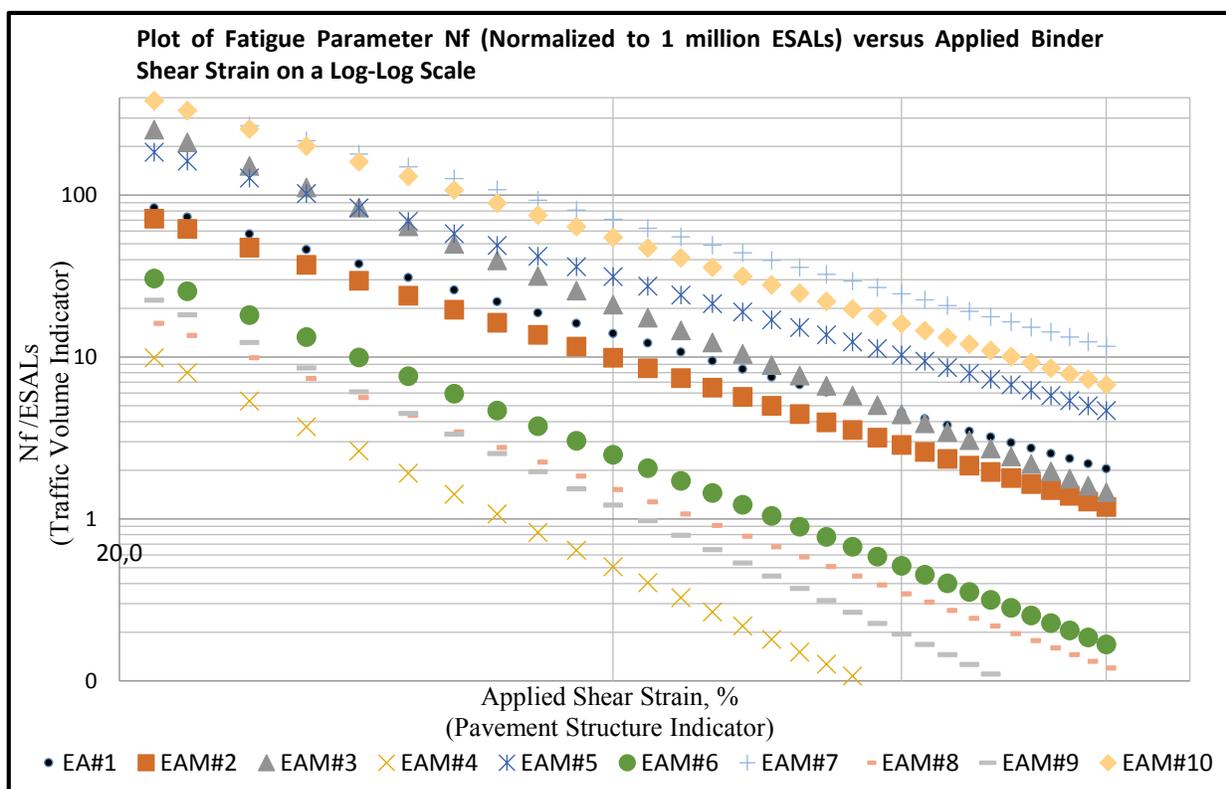
**Tabla 3. Grado de desempeño a la deformación permanente según MSCR, AASHTO T 350-14 (Fuente propia)**



**Figura 9. Respuesta elástica RE3200 Pa y dependencia al estrés de los asfaltos modificados recuperados, según la prueba de MSCR (Fuente propia)**

Los resultados presentados en la figura 9, son correspondientes al valor del Jnr y RE3200, medidos a 82°C. Estos parámetros están relacionados con la susceptibilidad del asfalto a deformarse permanentemente, entendiéndose que entre mayor sea su magnitud, en el caso del Jnr, más susceptible es a la deformación, y entre mayor sea el valor de la recuperación elástica al esfuerzo máximo de 3200 Pa, será garantizado un mejor comportamiento elástico del material asfáltico. En la figura 10, se presentan gráficamente, las respuestas elásticas de los asfaltos modificados a la temperatura de ensayo, PG 82°C, complemento de la prueba MSCR. De la Figura 9 y de la Tabla 4, se puede interpretar que el asfalto modificado con Resinas de copolímeros de etileno (RCE) y el modificado con GCR PG, son quienes presentan mejores comportamientos reológicos de resistencia a la deformación permanente a temperaturas altas. Estos resultados son congruentes con la naturaleza química de los polímeros. El RCE, es un compuesto de resinas que aumentan la flexibilidad, resistencia, y baja oxidación ante la exposición al calor. Mejora la tenacidad a baja temperatura, lo que reduce la fragilidad a la rotura. El siguiente en desempeño, GCR PG, está compuesto por un grupo de polímeros elastoméricos (con un elevado peso

molecular) como lo son el polisopreno sintético, el polibutadieno y el más abundante, el estireno butadieno, que principalmente optimizan propiedades mecánicas como la elasticidad, flexibilidad, dureza y la durabilidad (relación entre resistencia cortante y rigidez). En general todos los asfaltos modificados, presentan un mejor desempeño, como es de esperar, en comparación con el asfalto sin modificar (Pen 60/70), el cual, es el que presenta de acuerdo con este parámetro mayor susceptibilidad a deformarse.



**Figura 10. Gráfica de las Leyes de Fatiga de los residuos de asfalto (Fuente propia)**

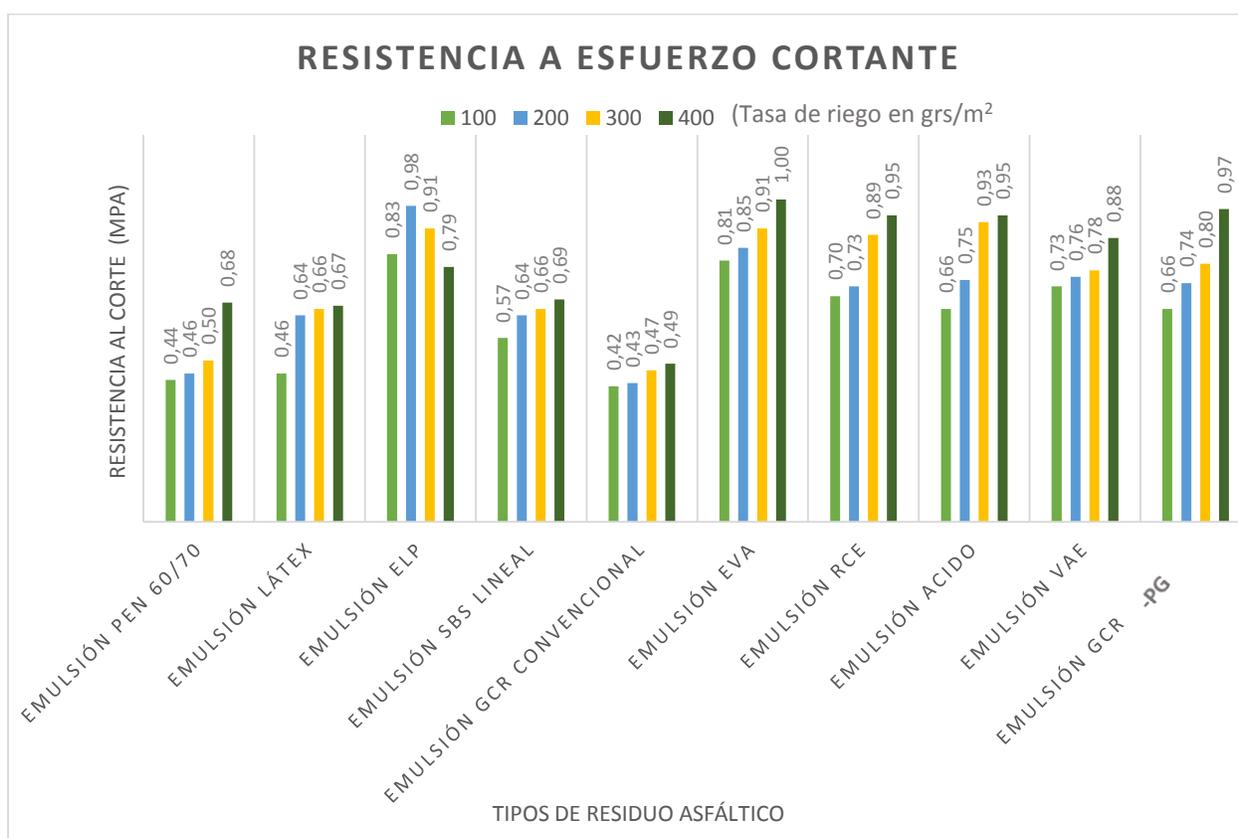
#### 4.1.2.3 Evaluación de la resistencia a la fatiga de los residuos asfálticos

En la Figura 10, se describe gráficamente las leyes de fatiga, según la variable “Nf” (Numero de ejes equivalentes a fatiga), para cada uno de los residuos asfálticos modificados formulados y recuperados en Rotavapor, siendo estas graficas deducidas a partir del enfoque del daño continuo visco elástico VECD, ampliamente expuesto en los apartados anteriores y normalizado según el Barrido de Amplitud Lineal (LAS) AASHTO TP-101-14, podemos observar , que el asfalto modificado de la emulsión clasificada como EAM #7 y EAM #10, utilizando como agente modificador, resinas de copolímeros de etileno (RCE) y GCR PG, son quienes nuevamente, así como en la prueba MSCR, presentan la mejor resistencia al daño inducido por la fatiga, es decir,

son capaces de soportar mayores ciclos de deformaciones altas, antes de llegar a la fatiga y romperse, por lo cual esta capacidad puede ser asociada, a su componente elástica, que les permite un mayor grado de recuperación, luego de sufrir deformaciones. En la tabla 4 se muestra que el grado en el que estos dos materiales vuelven a su forma original después de la deformación (recuperación elástica), es la mayor de todas para el RCE, 58.4%, seguida del GCR PG con 48.4%. Además, sus valores de “Jnr” (deformación no recuperable o deformación permanente) son de igual manera los menores 0.33 y 0.48 respectivamente. Entre menor “Jnr” tenga un material asfáltico, menor será la deformación permanente al aplicar una carga, y se fatigara menos ante ese esfuerzo.

## 4.2 Evaluación de la calidad de adherencia entre capas asfálticas

### 4.2.1 Determinación de la influencia del tipo y tasa de riego de ligante modificado en la “Resistencia a esfuerzo cortante”.



**Figura 11. Resultados del ensayo de corte NLT 382/08: Resistencia máxima al corte y energía de deformación para producir la rotura del material (Fuente propia)**

En la Figura 11 se presenta el resumen de resultados para cada uno de los residuos asfálticos recuperados para cada tipo de emulsión modificada, según el ensayo de corte NLT 382/08, en lo que respecta a determinar la resistencia máxima la corte en MPa, y la energía de deformación necesaria para producir la rotura del material, figura en base a la referencia del Anexo L. Figura 15. Ubicación de las cargas en la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia).

Analizando los resultados de la figura 12, se puede concluir lo siguiente:

- Al calcular el promedio de los resultados de las 4 tasas de riego (100, 200, 300 y 400 grs/m<sup>2</sup>) individualmente para cada tipo de ligante, el AM-EVA con 0.89 MPa y el AM-ELP con 0.88 Mpa, ofrecen el desempeño medio más alto entre los modificadores. Esto permite que en obra, se pueden tener mejores garantías, ante las posibles variaciones en la cantidad de riego que realmente aplica un equipo de irrigación con baja o media confiabilidad.

- El mayor valor de resistencia al corte que se puede encontrar, lo obtiene el AM-EVA (1.0 MPa a una tasa de 400 grs/m<sup>2</sup>), seguido del AM-ELP (0.98 MPa a una tasa de 200 grs/m<sup>2</sup>), luego sigue el AM-GCR (0.97 MPa a una tasa de 400 grs/m<sup>2</sup>).

- Resalta que el AM-ELP obtiene una muy alta resistencia con la mitad (200 grs/m<sup>2</sup>) de la tasa de riego aplicada, con respecto a los otros dos (400 grs/m<sup>2</sup>).

- Si se quiere comparar desempeños propiamente con el asfalto convencional Pen 60/70, los asfaltos modificados, aplicando la tasa mínima de 100 grs/m<sup>2</sup>, ofrecen entre el 32 y 53% de mayor resistencia al corte.

- Relacionando la resistencia a corte, con las propiedades reológicas, ya se había mencionado que el AM-RCE y AM-GCR PG tenían las mayores recuperaciones elásticas con 58.4% y 48.4%, respectivamente. Sus valores de “Jnr” también eran los más bajos con 0.33 y 0.48 respectivamente. El AM-ELP, tuvo la cuarta mayor recuperación elástica con 33.1% y el tercer valor más bajo de “Jnr” con 0.81. Por último, el AM-EVA presentó el penúltimo valor recuperación elástica con 14.8% y el octavo más bajo valor de “Jnr” con 2.85.

- Se puede interpretar que el ensayo de corte puro al que es sometido la liga no es directamente correlacionable con las propiedades reológicas, puesto que, si fuera así, el AM-RCE y el AM-GCR PG, que mantuvieron el liderato en dichas pruebas, deberían haber sido los mejores también ante corte, cosa que no ocurrió.

- Los mejores ante corte fueron el AM-ELP con alta resistencia (0.98 MPa) a menor tasa (200 grs/m<sup>2</sup>) de aplicación, seguido del AM-EVA con alta resistencia (1 MPa), pero al doble de

la tasa (400 grs/m<sup>2</sup>) que el AM-ELP.

- Tanto el AM-EVA como el AM-ELP, demostraron el mejor desempeño promedio global para las 4 tasas de riego, con 0.89 Mpa y 0.88 Mpa, respectivamente.
- Los ligantes modificados mostraron, que se obtienen mucho mayores resistencias al corte, con tasas de aplicación incluso por debajo del límite mínimo especificado por la normativa nacional en Colombia de 200 grs/m<sup>2</sup>.

### 4.3 Modelación Estructural

#### 4.3.1 Esfuerzos cortantes máximos.

El parámetro “Máximo esfuerzo cortante”, al cual está sometida una estructura de pavimento, se definió como el parámetro de evaluación de la calidad de adherencia que provee un riego de liga, según el criterio siguiente:

**I.** La relación entre la Resistencia Máxima al Esfuerzo de Corte ( $SSy$ ) de un espécimen normalizado evaluado en laboratorio a prueba directa en cortante puro, según NLT 382/08, y el Esfuerzo Máximo Cortante ( $\tau_{m\acute{a}x}$ ), medido en la interfaz de enlace entre capas, por la teoría multicapa elástica lineal, deberá ser mayor a 1. Es decir, para fines prácticos, un diseño de riego de adherencia en cuanto a tipo de ligante y tasa de dosificación por m<sup>2</sup>, puede ser considerado seguro, si se cumple con la relación:  $SSy > \tau_{m\acute{a}x}$ .

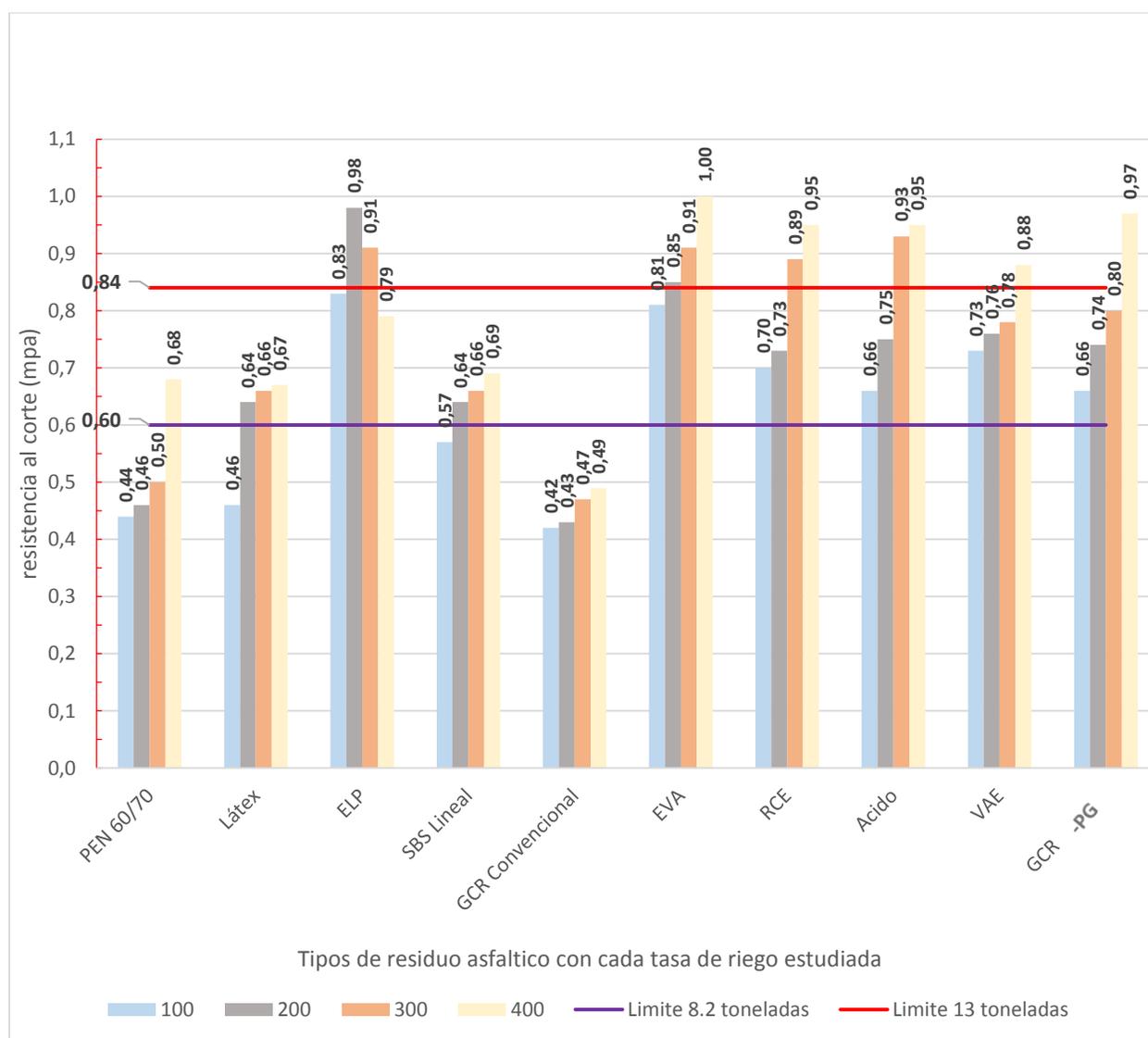
**II.** La literatura menciona, que las observaciones de campo mostraron la necesidad de asegurar una excelente unión de las capas, particularmente en áreas donde los vehículos son más propensos a aplicar fuerzas horizontales, como curvas de radio pequeño, rampas empinadas y áreas de aceleración y frenado. En estas áreas, a menudo se encuentran tensiones de corte críticas (Romanoschi, 1999). Por lo cual, en estos casos, se aconseja al diseñador, asumir valores de  $SSy$  mucho mayores a  $\tau_{m\acute{a}x}$ , por ejemplo:  $SSy = 1.5 \tau_{m\acute{a}x}$ .

En el Anexo O, Figura 17. Estado de esfuerzos mecánicos en la interface de enlace entre capas bituminosas para los ejes de carga de 8.2 y 13.0 toneladas (Fuente propia), se muestra que el **Esfuerzo Máximo Cortante ( $\tau_{m\acute{a}x}$ )**, para el eje de carga SRD de 8.2 Ton. y el eje de carga SRD de 13.0 Ton., son de 0.60 MPa y 0.84 MPa, respectivamente.

### 4.3.2 Influencia del tipo de modificador y cantidad del riego de liga en el comportamiento de la estructura de pavimento.

#### 4.3.2.1 Evaluación mediante un programa elástico multicapa (WinJulea).

Con el criterio de evaluación,  $SSy > \tau_{m\acute{a}x}$ , definido para medir la calidad de los riegos de adherencia, se procedió a la comparación de los valores de  $SSy$  obtenidos de la prueba de corte NLT 382/08, contra el valor de  $\tau_{m\acute{a}x}$ , ya calculado para cada eje. Aquellos modificadores que no cumplen el requisito pueden ser discriminados gráficamente en la figura 12.



**Figura 12. Evaluación del criterio de falla para definir la calidad de los tipos de riego de liga (Fuente propia)**

Partiendo de los resultados mostrados en la figura 12, podemos sacar unas conclusiones:

- Los modificadores que NO cumplen con el criterio de falla para los esfuerzos cortantes que el eje de 8.2 toneladas induce al pavimento son:
  - El asfalto convencional penetración 60/70 dmm, a menos que se ocupe una tasa de aplicación de 400 grs/m<sup>2</sup>.
  - Los asfaltos modificados con Látex y SBS lineal, cuando su tasa de aplicación sea de 100 grs/m<sup>2</sup>.
  - El asfalto modificado con GCR convencional, en ninguna tasa de aplicación.
- Los modificadores que cumplen con el criterio de falla para los esfuerzos cortantes que el eje de 13.0 toneladas induce al pavimento son:
  - El asfalto modificado con ELP, con tasas de aplicación de 200 y 300 grs/m<sup>2</sup>.
  - El asfalto modificado con EVA, con tasas de aplicación de 200, 300 y 400 grs/m<sup>2</sup>.
  - El asfalto modificado con RCE, con tasas de aplicación de 300 y 400 grs/m<sup>2</sup>.
  - El asfalto modificado con Acido, con tasas de aplicación de 300 y 400 grs/m<sup>2</sup>.
  - El asfalto modificado con VAE, con tasa de aplicación de 400 grs/m<sup>2</sup>.
  - El asfalto modificado con GCR-PG, con tasa de aplicación de 400 grs/m<sup>2</sup>.

Se demuestra una relevante influencia en el comportamiento mecánico de resistencia al corte entre capas asfálticas ligadas, según el tipo de modificador y la tasa de aplicación que se utilice. Esto refuerza la necesidad de especificar en los pliegos técnicos de contratación, la responsabilidad por parte del contratista de hacer el estudio de diseño de su riego de liga, con la finalidad que demuestre el cumplimiento del estado de esfuerzos calculados en el diseño estructural. En el Anexo K.- Tabla 14.- Evaluación del criterio de falla para definir la calidad de los tipos de riego de liga. (Fuente propia), se muestran discriminados y resaltados en color amarillo, aquellos ligantes que no cumplen con el criterio de falla para los esfuerzos cortantes que el eje de 8.2 toneladas induce al pavimento. En color verde, se señalaron aquellos ligantes que pasan el requerimiento para el eje 8.2 Ton., pero no cumplen para la condición del eje de 13 Ton. Por último, los señalados con negrita-rojo-gris, son aquellos ligantes que pueden, ser usados como riegos de liga en el modelo estructural de pavimento estudiado, con mucha mayor garantía, puesto que cumplen con la relación requerida de esfuerzos al corte, inducido por el eje más pesado de diseño 13 Ton.

#### 4.3.2.2 *Evaluación mediante modelación estructural mecánico-empírica.*

La modelación mecánico-empírica permite corroborar las consecuencias a las que un ingeniero de pavimentos se expone cuando no diseña previamente la calidad del residuo asfáltico y la tasa óptima a utilizar, en un riego de liga. Mediante una modelación usando el programa más avanzado hasta el momento para el diseño de pavimentos, conocido como AASHTOWare®, versión 2.2, podemos analizar las repercusiones en la duración de la vida de un pavimento si no se cumple el concepto de “interfaz de adherencia con total fricción”. Ingresando la misma estructura de pavimento, descrita en el cálculo estático multicapa, se sometió a una comprobación con el eje menos pesado de 8.2 Ton. Con los datos de entrada ya ingresados, según lo solicita el programa se hizo la corrida para dos condiciones opuestas: 1) Completa adherencia con fricción entre capas, 2) Adherencia en la interfaz de enlace afectada un 22%. Este valor de afectación se calculó, tomando en consideración que 0.6 MPa, es el valor del Esfuerzo Máximo Cortante ( $\tau_{\text{máx}}$ ) para la modelación en WinJULEA del eje de 8.2 Ton, y representa el 100% de adherencia requerida en la interfaz. Promediando los valores de Resistencia Máxima al Esfuerzo de Corte (SSy), de los ligantes señalados que no alcanzan 0.6 MPa (Anexo K.- Tabla 14.- Evaluación del criterio de falla para definir la calidad de los tipos de riego de liga. (Fuente propia)), se obtiene el valor de 0,467 MPa, lo cual es una relación del 22% en la caída de la resistencia requerida. En el Anexo S.- Figura 21.- Modelación de interfaz con total fricción (Fuente propia), se muestra el desempeño del pavimento, considerando las capas asfálticas totalmente adheridas (la interfaz de fricción tiene el valor de 1 ó 100% de enlace). El modelo predice que se cumplen, para los 20 años de servicio, con un volumen de 10 millones de ESAL's, al 90% de confiabilidad, todos los criterios de desempeño (ver Anexo Q.- Figura 19.- Interfaz de entrada de los criterios de desempeño, AASHTOWare® Versión 2.2 (Fuente propia). Mientras que en el Anexo T.- Figura 22.- Modelación de interfaz con 22% de afectación (Fuente propia), se muestra la otra condición, cuando la adherencia en la interfaz esta reducida en su calidad un 22%, es decir, solo se garantiza un 78% de resistencia de corte requerida, entre las capas asfálticas ligadas. El modelo predice que los criterios: Deformación permanente total del pavimento, agrietamiento de la capa asfáltica de abajo hacia arriba, agrietamiento de la capa asfáltica de arriba hacia abajo, y deformación permanente de la capa asfáltica, dejan de cumplir con los máximos límites de deterioro permitidos, y ya no está asegurada la vida útil diseñada del pavimento. Esto da un indicativo de la severidad de la afectación del desempeño, con una mínima reducción en la calidad de la adherencia por debajo del 25%.



Figura 13. Gráficas de acumulación de daño, modelación interfaz con total adherencia y modelación interfaz con 22% de afectación (Fuente propia).

En base a los resultados de la acumulación de daño para cada uno de los criterios de desempeño mostrados en la figura 13, se muestran las repercusiones en la vida útil del pavimento.

Se han graficado solo aquellos parámetros que resultaron afectados por la pérdida de calidad en el riego de liga utilizado.

El valor de IRI (in/mile) no fue afectado, al igual que el parámetro de agrietamiento térmico de la capa asfáltica (AC termal cracking, ft/mile).

En la columna izquierda de esta figura, se muestran los resultados modelando la interfaz con total adherencia entre capas, donde se observa que los límites máximos permitidos en los deterioros no son alcanzados.

Como contraparte, en la columna derecha se muestra la acumulación de daño para la interfaz de adherencia con 78% de adherencia entre las capas asfálticas.

Entonces se puede concluir:

- Al cuarto año de vida del pavimento, este ya alcanza las 0.75 pulgadas máximas permitidas de deformación total de la estructura.
- En el tercer año, el agrietamiento longitudinal, es mayor a los 2000 pies por cada milla de carretera.
- Por último, el área de agrietamiento tipo piel de cocodrilo sobrepasa el 25% del área de la capa superficial en el pavimento.

## 5. Conclusiones generales y recomendaciones para futuras investigaciones

### 5.1 Propuesta de una metodología de diseño del riego de liga

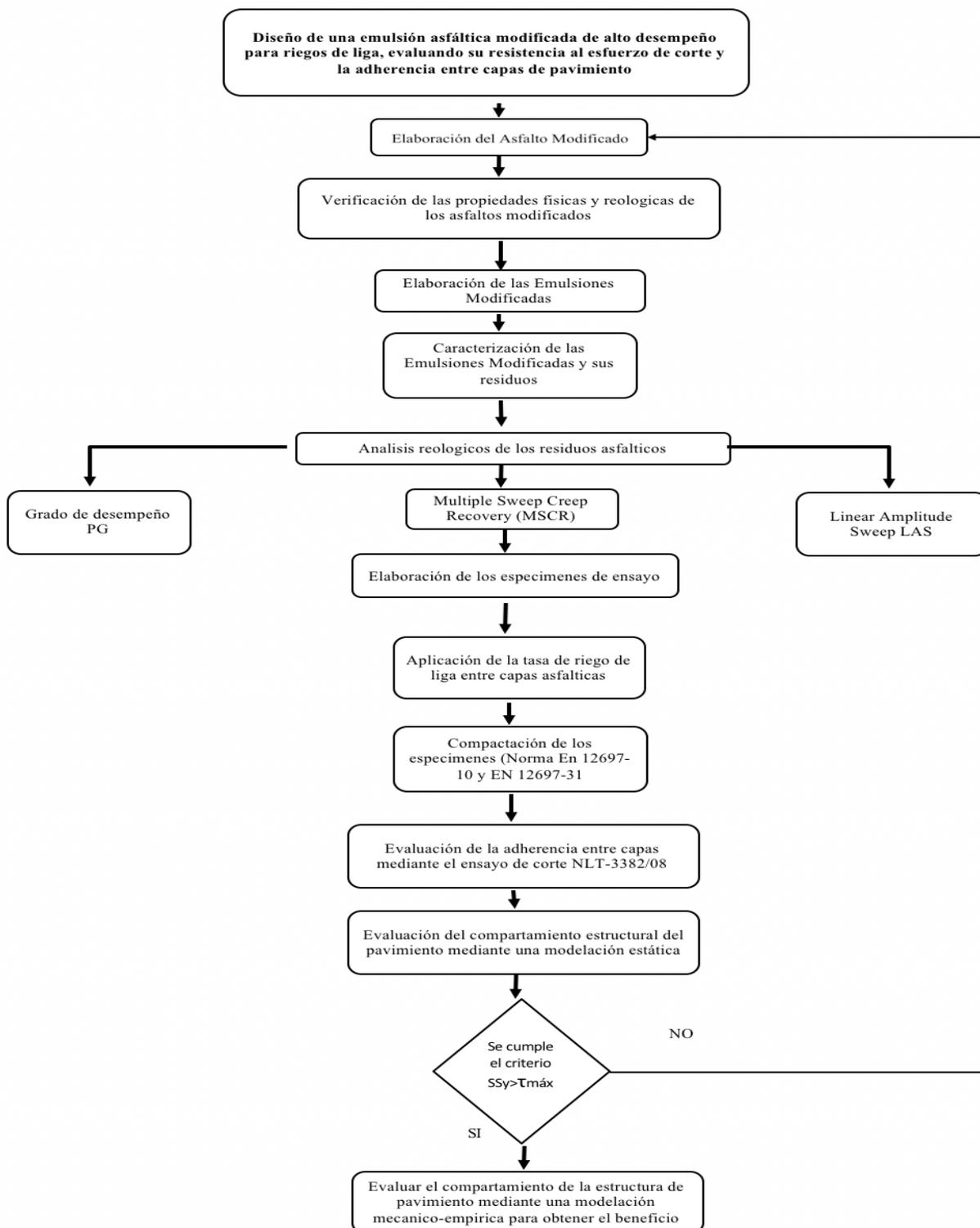


Figura 14. Propuesta de una metodología de diseño del riego de liga (Fuente propia).

Se presenta en la figura 14, un esquema gráfico de la metodología de estudio propuesta, para evaluar la calidad de un riego de liga.

La investigación presentada en esta tesis se ha ocupado de proporcionar una guía para diseñar un material asfáltico emulsionado de alto desempeño, evaluando la calidad de los enlaces de adherencia logrados entre las capas de mezclas asfálticas, con el fin de potenciar la vida útil en servicio de las carreteras en Colombia, con garantía de lograr los requisitos de esfuerzos estructurales contemplados en el dimensionamiento analítico de pavimentos.

Las conclusiones presentadas a continuación en este capítulo fueron extraídas del trabajo experimental de laboratorio, del estudio conceptual, definición de los criterios, modelaciones estructurales y de todos los resultados, realizados y/o obtenidos en esta tesis.

## **5.2 Conclusiones Generales**

### **5.2.1 Diseño y formulación reológica de emulsiones para liga.**

❖ Concibiendo una modificación con polímeros del asfalto convencional, se alcanza un Grado de desempeño, PG, AASHTO M-320, por encima de la temperatura calculada de calentamiento del pavimento, con el suficiente factor de seguridad (la literatura aconseja 6°C más de temperatura de desempeño, por carga alta y 6°C por carga estacionaria).

❖ El ensayo Múltiple Stress Creep Recovery (MSCR) o Múltiple Estrés de Recuperación Lenta, AASHTO T350-14, es una herramienta muy útil, para determinar la calidad de un riego de liga, sometido al fenómeno de temperatura alta y tráfico pesado, pues mide la respuesta elástica en un ligante asfáltico sometido a un elevado esfuerzo cortante a una temperatura alta. Además, este resultado está correlacionado directamente con la velocidad del tránsito y el número de ESAL`s de diseño, convirtiéndolo en una prueba útil para verificar la vida de diseño del ligante.

❖ La estimación de la tolerancia al daño de ligantes asfálticos utilizando el Barrido de Amplitud Lineal, (LAS, por sus siglas en inglés), AASHTO TP 101-14, es un método de prueba que cubre cómo determinar la resistencia al daño del ligante asfáltico, mediante carga cíclica, empleando amplitudes de carga que aumentan linealmente y es perfectamente correlacionable con la vida de diseño del pavimento, pues entrega el resultado de la calidad del ligante residual, en número de repeticiones dinámicas de ESAL`s, establecidas a temperaturas intermedias o bajas.

### 5.2.2 *Diseño y evaluación de la calidad de adherencia entre capas asfálticas.*

❖ Los ligantes modificados con polímeros mostraron tener mayores valores de dureza ante deformación por corte, gracias a que poseen mejores propiedades reológicas a deformación permanente y fatiga.

❖ Parecería que a mayor tasa de aplicación en un riego de liga con ligante modificado, mejor será su resistencia al corte. Lo anterior es válido hasta un cierto valor límite, donde demasiada cantidad de ligante puede causar lubricación en lugar de cohesión, y el fallo por deslizamiento también se daría. Sin embargo, los ligantes modificados mostraron, que se obtienen mucho mayores resistencias al corte, con tasas de aplicación incluso por debajo del límite mínimo especificado por la normativa nacional en Colombia de 200 grs/m<sup>2</sup>.

❖ El método de prueba para evaluar la calidad que provee un ligante residual, en cuanto a la resistencia al corte de especímenes de capas asfálticas adheridas, ha sido seleccionado considerando factores como: Simplicidad del procedimiento, repetitividad aceptable, equipo fácil de calibrar, método rápido en ejecución y cálculo, sin requerir personal altamente capacitado, utiliza equipo universal de bajo costo, al igual que es fácil de calibrar.

❖ El procedimiento de prueba de corte directo en laboratorio, no solo funciona para diseñar el tipo de ligante y su tasa de aplicación, sino que se puede utilizar para el control de calidad de los riegos de adherencia, mediante el ensayo de testigos extraídos del pavimento, en los tramos de prueba en proyectos viales, tomando en cuenta la importancia del correcto enlace de las capas asfálticas en la vida útil de las obras (superiores a 5 años) y así construir pavimentos de mayor durabilidad y menores costos de mantenimiento y rehabilitación futuros.

❖ Se encontró en el resultado del estudio experimental al corte en laboratorio, que todos los ligantes modificados (excepto el GCR), mostraron a la tasa mínima de aplicación de la normativa nacional, 200 grs/m<sup>2</sup>, un considerable mayor valor de resistencia al corte, en relación con el ligante asfáltico penetración 60/70 convencional. Lo que podría indicar, que el costo de usar un asfalto modificado podría ser compensado con el uso de una tasa optimizada de aplicación de la cobertura de liga, al requerir menores cantidades para lograr el mismo esfuerzo, cuando se obtenga por modelación estructural el requerimiento cortante.

### **5.2.3 Estudio del efecto de la calidad de adherencia en el desempeño de un pavimento.**

❖ Esta investigación propone como factor de diseño para un riego de liga: Que la relación entre la Resistencia Máxima al Esfuerzo de Corte ( $SSy$ ) de un espécimen normalizado evaluado en laboratorio a prueba directa en cortante puro, según NLT 382/08, y el Esfuerzo Máximo Cortante ( $\tau$  máx) medido en la interfaz de enlace entre capas, por la teoría multicapa elástica lineal, sea mayor a 1. Es decir, para fines prácticos, un diseño de riego de adherencia en cuanto a tipo de ligante y tasa de dosificación por  $m^2$ , puede ser considerado seguro, si se cumple con la relación:  $SSy > \tau$  máx.

❖ La metodología de diseño, propuesta en esta tesis, para el ligante emulsificado, con el objeto de alcanzar altos desempeños, puede dar una ayuda al momento de escoger la emulsión que va a ser utilizada como riego de liga en un proyecto vial, y evitar la aparición de deterioros prematuros y la caída en la vida útil, con los consecuentes costos de rehabilitación.

### **5.3 Recomendaciones para futuras investigaciones.**

❖ Se recomienda para futuras investigaciones, hacer cambios en los parámetros de diseño de las mezclas asfálticas, por ejemplo, la granulometría, pues la literatura dice, que esta textura final de la superficie de la mezcla tiene una incidencia importante en el área de contacto de las capas ligadas, lo cual repercute en el esfuerzo cortante alcanzado. A la vez, el grosor de la película de asfalto de la mezcla puede crear mayor o menor adherencia en la interfaz, por lo cual, sería recomendable también valorar usar contenidos diferentes de ligante óptimo en las probetas de mezcla.

❖ Las pruebas de cizallamiento directo con o sin carga normal, así como las pruebas de fatiga por corte, se deben realizar en varias repeticiones para alcanzar mayor repetitividad. En este estudio, la matriz fue: 10 tipos de emulsiones, a 4 tasas de aplicación, con 2 especímenes por cada combinación, lo cual constituyó, un total de 80 pruebas. Sin embargo, no se tomaron en cuenta factores importantes, cuya influencia es válida de entender, como la temperatura de la interfaz, pues todas las probetas se ensayaron a  $25^{\circ}C$ .

❖ Se deben realizar pruebas de interfaz, a diferentes tasas de desplazamiento para las pruebas de corte directo, y en varias frecuencias de carga para las pruebas de fatiga de corte cíclico, para determinar su influencia en los parámetros del modelo de calidad de la unión en la interfaz.

❖ Se debe realizar una investigación adicional para investigar los efectos de la textura de la capa donde se aplica el riego de liga, que tiene en la calidad de adherencia que se logra en la interfaz.

❖ Estos estudios para caracterizar el efecto de la condición de adherencia en el diseño del pavimento usan solo un enfoque teórico-experimental, basado en pruebas de laboratorio. Por lo cual, sería un gran aporte, para solventar la problemática, si se llevaran a cabo estudios complementarios, que incluyan una secuencia de pruebas experimentales en laboratorio de la resistencia de la unión, análisis de la modelación del desempeño del pavimento y cerrar con la verificación in-situ real.

## 6. Referencias Bibliográficas

- AASHTO M. (2016), “Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder”. AASHTO Designation: M 320-16.
- AASHTO M. (2014), “Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)”. AASHTO Designation: M 332-14.
- AASHTO M. (2016), “Standard Specification for Cationic Emulsified Asphalt”, Table 1. AASHTO Designation: M 208-16.
- Afanasieva, N. y Álvarez, M. (2004). Estudio del envejecimiento de los asfaltos bajo la acción de algunos factores climáticos. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Ahlvin R.G and Ulery H.H (1962). “Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains, and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space”, In Transportation Research Board (TRB), Bulletin 342, pp. 1-13, Washington D.C, EUA.
- AkzoNobel Surface Chemistry 2009. Performance blends for emulsification – Agroapplications - [Online]. Available: [http://www.sc.akzonobel.com/en/agriculture/Documents/Letter\\_size/AkzoNobel\\_tb\\_71\\_Agro\\_Emulsion\\_Performance\\_Blends.pdf](http://www.sc.akzonobel.com/en/agriculture/Documents/Letter_size/AkzoNobel_tb_71_Agro_Emulsion_Performance_Blends.pdf)
- Al Hakim B (1997) An improved backcalculation method to predict flexible pavement layers moduli and bonding condition between wearing course and base course. PhD thesis, Liverpool John Moores University, Liverpool, UK
- Al Hakim B, Al Nageim H, Pountney D, and Lesley L (1997) The development of an improved pavement back-calculation. Proceedings of the 1st Conference on Rehabilitation and Development of Civil Engineering Infrastructure Systems, Lebanon, paper No. 72
- British Standards Institution (2003f) Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 36: Determination of the thickness of a bituminous pavement. BS EN 12697-36, British Standards Institution, London, UK
- British Standards Institution (2004a) Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. BS EN 12697-26, British Standards Institution, London, UK
- British Standards Institution (2004b) Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 35: Laboratory mixing. BS EN 12697-35, British Standards Institution, London, UK
- British Standards Institution (2005a) Specification for coated macadam for roads and other paved areas. BS4987-1&2, British Standards Institution, London, UK

- British Standards Institution (2005b) Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas. Part 104: Methods of test for the determination of density and compaction. BS598-104, British Standards Institution, London, UK
- Burmister D. (1943). "The General Theory of Stresses and displacements in layered soil systems", In Transportation Research Board (TRB), Washington D.C, EUA.
- Burmister DM (1945) The general theory of stresses and displacements in layered systems. Journal of Applied Physics, The American Institute of Physics, Melville, USA, Vol. 16, pp.89-94, pp.126-127, pp.296-302
- Chen D., Zaman M., Laguros J. and Soltani A. (1995) "Assessment of computer programs for analysis of flexible pavement structure", In Transportation Research Record TRB, Issue 1482, pp. 123-133, Washington D.C, EUA.
- Coria C. (2013). "Modelo de respuesta estructural multicapa para diseño de pavimentos flexibles UMICH PAV", Tesis de posgrado facultad de Ingeniería Civil UMSNH, Morelia, Michoacán, México.
- Corro S. y Prado G. (1999). "Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. DISPAV 5, Versión 2", Instituto de Ingeniería de la UNAM, Series Azules, México, DF.
- Das A. and Pandey B.B. (1999). "Mechanistic-Empirical design of bituminous Roads: An Indian Perspective", Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, No. 5, September/October 1999, pp. 463-471.
- Dormon G.M. and Metcalf C.T. (1965). "Design Curves for Flexible Pavements Based on Layered System Theory", In Transportation Research Record TRB, Issue 71, pp. 69-84, Washington D.C, EUA.
- Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS (2013). Artículo 411-13, "Suministro de Emulsión Asfáltica", Tabla 411-1.
- Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS (2013). Artículo 411-13, "Suministro de Emulsión Asfáltica Modificada con Polímeros", Tabla 415-1.
- Foster C.R. and Ahlvin R.G. (1954). "Stresses and deflections induced by a uniform circular load", In Proceedings Transportation Research Board (TRB), Vol. 33, pp. 467-470, Washington D.C, EUA.

- Garnica P. and Hernández R. (2013). “IMT PAVE”, Instituto Mexicano del Transporte IMT, Sanfandila, Querétaro.
- Hachiya T and Sato K (1997) Effect of tack coat on bonding characteristics at interface between asphalt concrete layers. Proceeding of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, USA, pp.349-362
- Hakim BA (2002) The importance of good bond between bituminous layers. Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, August, paper no. 1:5-3
- Hetnarski, R. B. and J. Ignaczac (2006), “Mathematical Theory of Elasticity”. Journal of Thermal Stresses vol. 29(5): PP. 505-506.
- Huang Y.H. (1993). “Pavement Analysis and De-sign”, Prentice Hall, New Jersey.
- Hwang D. and Witzczak M. (1979) “DAMA: User’s manual”, Department of civil engineering, University of Maryland, EE.UU.
- Instituto Nacional de Vías, INVIAS (2013), Especificaciones generales para construcción de carreteras, Art. 400-13.
- Jones A. (1962). “Tables of stresses in three-layer elastic systems”, In Transportation Research Board (TRB), No. 342, pp. 176-214, Washington D.C, EUA.
- Kennedy CK (1978) The development of slip-planes in rolled asphalt surfacings. TRRL report LR 813, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- Kennedy CK and Lister NW (1980) Experimental studies of slippage. The Performance of Rolled Asphalt Road Surfacings, The Institution of Civil Engineers, London, UK, pp.31-56
- Kerschhagl J (2009) Manual handling assessment tables (mat). Guideline, Short risk assessment of manual handling of loads stipulated for testing simplified practices, Federal Ministry of Labour, Social Affairs and Consumer Protection, Central Labour Inspectorate, Vienna, Austria
- Khweir K and Fordyce D (2003) Influence of layer bonding on the prediction of pavement life. Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Transport, UK, Vol. 156, Issue TR2, pp.73-83
- Kruntcheva MR, Collop AC, Thom NH (2000a) The portable seismic pavement analyser: laboratory trials. Project Report PGR 2000-02, The University of Nottingham, Nottingham, UK

- Lepert P, Poilane JP and Villard-Bats M (1992) Evaluation of various field measurement techniques for the assessment of pavement interface condition. Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, UK, Vol. 3, 224-237
- Leutner R (1979) Untersuchung des schichtenverbundes beim bituminos enoberbau. Bitumen, ARBIT, Hamburg, Germany, Heft 3
- Linsbauer HN and Tschegg EK (1986) Fracture energy determination of concrete with cube shaped specimens. Zement und Beton 31, pp.38-40.
- Marshall R, Ryman K and Hickling K (2004) Epiglass® multipurpose epoxy resin. Manual, International Paint Ltd., Southampton, UK
- Matsuno S and Nishizawa T (1992) Mechanism of longitudinal surface cracking in asphalt pavement. Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, UK, Vol. 2, pp.277-291
- Mohammad LN, Raqib MA, Wu Z and Huang B (2002) Measurement of interlayer bond strength through direct shear tests. The 3rd International Conference of Bituminous Mixtures and Pavements CD-ROM, Thessaloniki, Greece, 21-22 November
- Myers LA and Roque R (2001) Evaluation of top-down cracking in thick asphalt pavements and the implications for pavement design. Perpetual Bituminous Pavements, Transportation Research Circular, No. 503, TRB, Washington DC, USA, pp.79-87
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (2004). “Guide for Mechanistic-Empirical De-sign of New and Rehabilitated Pavement Structures”, Final Report 1-37A, ARA Inc. ERES Consultants Division, EUA.
- Normas de Ensayo de Materiales INVIAS (2013). Norma INVIAS E 759-13, “Recuperación del Asfalto de una Solución Utilizando el Evaporador Rotatorio”.
- Nishiyama T, Lee DH and Bhatti MA (2005) Investigation of bonding condition in concrete overlay by laboratory testing, finite element modelling and field evaluation. TRB 84th Annual Meeting CD-ROM, Washington DC, USA
- Nunn ME, Brown A, Weston D and Nicholls JC (1997) Design of long life flexible pavement for heavy traffic. TRL report 250, TRL Ltd. Crowthorne, UK
- Odemark N. (1949). “Investigations as to the elastic properties of soil and design of pavements according to the theory of elasticity”, Meddelande 77, Statens Vaginstitut; Stockholm, Sweden. (Traducido al inglés por A. Ioannides en 1989).

- Palmer L.A and Barber E.S (1940). "Soil displacement under a circular loaded area", Proceedings Transportation Research Board (TRB), No. 20, pp. 279-286, Washington D.C, EUA.
- Peattie K. R. (1962). "Stress and strain factors for three-layer elastic systems", In Transportation Research Board (TRB), No. 342, pp. 215-253, Washington D.C, EUA.
- Peattie KR (1980) The incidence and investigation of slippage failures. The Performance of Rolled Asphalt Road Surfacing, The Institution of Civil Engineers, London, 3-15
- Pell PS (1980) Discussion on slippage of rolled asphalt wearing courses. The Performance of Rolled Asphalt Road Surfacing, The Institution of Civil Engineers, London, UK, pp.64-65
- Piber H, Canestrari F, Ferrotti G, Lu X, Millien A, Partl MN, Petit C, Phelipot-Mardelé A and Raab C (2009) RILEM interlaboratory test on interlayer bonding of asphalt pavements. Proceeding of the 7th International RILEM Symposium ATCBM09 on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Material, Vol.2, Rhodes, Greece, 27-29 May, pp.1181-1189
- Pos JK, Kruntcheva MR, Collop AC and Thom NH (2001) Effects on bond between pavement layers. Project Report, The University of Nottingham, Nottingham, UK
- Raab C and Partl MN (2004a) Interlayer shear performance: experience with different pavement structures. Proceeding of the 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria, pp.535-545
- Raab C and Partl MN (2004c) Effect of tack coats on interlayer shear bond of pavements. Proceeding of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Sun City, South Africa, pp.847-855
- Raab C and Partl M (2005) Determination of the mechanical resistance of thin surfacings on asphalt pavements. Proceeding of the 4th International Conference on Maintenance and Rehabilitations of Pavements and Technological Control, Belfast, Northern Ireland, UK, 18-19th August, paper no. 144
- Raab C and Partl MN (2009) Interlayer bonding of binder, base and subbase layers of asphalt pavements: Long-term performance. Journal of Construction and Building Materials, Vol.23, pp. 2926-2931
- Read J and Whiteoak D (2003) The Shell bitumen handbook. Shell Bitumen, London, UK

- Roffe JC and Chaignon F (2002) Characterisation tests on bond coats: worldwide study, impact, tests, recommendations. The 3rd International Conference of Bituminous Mixtures and Pavements CD-ROM, Thessaloniki, Greece, 21- 22 November
- Raad L. and Marhamo L. (1991). "Evaluation of Two Layer Pavements Using Dimensional Analysis" Transportation Research Record TRB, Issue 1307, pp. 99-110, Washington D.C, EUA.
- Rodríguez R, Hernández G, Blanco R and Castaño V, 1 Mechanical Properties of the Composite Asphalt-Styrene-Butadiene Copolymer at High Degree of Modification, International Journal Polymeric Mater #35, 129-144, 1997.
- Romanoschi SA and Metcalf JB (2001a) Effect of interface condition and horizontal wheel loads on the life of flexible pavement structures. Transportation Research Record No. 1778, Washington DC, USA, pp.123-131
- Romanoschi SA and Metcalf JB (2001b). Characterization of asphalt concrete layer interfaces. Transportation Research Record No. 1778, Washington DC, USA, pp.132-139
- Romanoschi SA and Metcalf JB (2002). The characterization of pavement layer interfaces. Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, August, paper no. 1:5-2
- Romanoschi SA and Metcalf JB (2003). Errors in pavement layer moduli backcalculation due to improper modeling of layer interface condition. TRB 82nd Annual Meeting CD-ROM, Washington DC, USA
- Sanders PJ and Nunn M (2005). The Application of Enrobé a Module Élevé in Flexible Pavements. TRL Report 636, TRL Ltd., Crowthorne, UK
- Shaat AA (1992) Investigation of slippage of bituminous layer in overlaid pavement in Northern Ireland. Consultancy Report Submitted for the DOE in Northern Ireland, Belfast, UK
- Sholar GA, Page GC, Musselman JA, Upshaw PB and Moseley HL (2004). Preliminary investigation of a test method to evaluate bond strength of bituminous tack coats. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 73, pp.771-801
- Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference (SATC 2007), Pretoria, South Africa, pp.294- 304

- Sutanto M, Collop A, Airey G, Elliott R, Choi Y (2006). Laboratory measurement of bond between asphalt layers. *International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology*, Liverpool, UK, Vol.7, Issue 1, pp.38- 57
- Tashman L, Nam K and Papagiannakis T (2006). Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers. Report Prepared for Washington State Department of Transportation, Washington Center for Asphalt Technology, Washington State University, Pullman, Washington, USA
- Texas Department of Transportation Specifications TDOT (2014). Item 300.2.4 “Standard Specification for Emulsified Asphalt”, Table 10.
- Thom NH (2007). Personal communication at the Nottingham Transportation Engineering Centre (NTEC), University of Nottingham, UK, 19 March
- Tschegg KE, Kroyer G, Tan DM, Stanzl-Tschegg SE and Litzka J. (1995). Investigation of bonding between asphalt layers on road construction. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, July/August, pp.309-317
- TRRL (1976). Interim report of the working party on the slippage of rolled asphalt wearing courses. TRRL report SR 213UC, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- TRRL (1979). Final report of the working party on the slippage of rolled asphalt wearing courses. TRRL report SR 493, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- Uzan J, Livneh M and Eshed Y. (1978). Investigation of adhesion properties between asphalt concrete layers. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 47, pp.495-521
- Walsh ID and Williams J.T. (2001). HAPAS certificates for procurement of thin surfacing. *Highways and Transportation*, Vol.48, No.7-8, pp.12-14
- Washington State Department of Transportation (2009). Top-down cracking. <URL: [http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/09\\_pavement\\_evaluation/top\\_down\\_cracking.htm](http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/09_pavement_evaluation/top_down_cracking.htm)> [Accessed 12 December 2017]
- West RC, Zhang J and Moore J (2005) Evaluation of bond strength between pavement layers. NCAT Report 05-08, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Alabama, USA

- Whiffin AC and Lister NW (1962). The application of elastic theory to flexible pavements. Proceeding of the 1st International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, pp.499-552
- WinJULEA (Windows Jacob Uzan Layered Elastic Analysis) developed by Dr. Jacob Uzan, Technion University Israel.
- Yoder E.J and Witczak M.W. (1975). "Principles of Pavement Design", John Wiley & Sons, Second Edition, EUA.

# **Anexos**

**Anexo A. Tabla 4. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013)**

CARACTERÍSTICAS	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO		
		NT1	NT2	NT3
<b>Dureza, agregado grueso (O)</b>				
Desgaste en la máquina de los angeles, máximo (%)	E-218			
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones		25/35/-	25/35/35	25/35/35
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones		5/7/-	5/7/7	5/7/7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238			
- Capa de: rodadura / intermedia / base			25/30/30	20/25/25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base	E-224			
- Valor en seco, mínimo (kN)				110/90/75
- Relación húmedo/seco, mínima (%)				75/75/75
Coefficiente de pulimento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	0.45	0.45	0.45
<b>Durabilidad (O)</b>				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados finos y gruesos, máximo (%)	E-220	18	18	18
<b>Limpieza, agregado grueso (F)</b>				
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5	0.5	0.5
<b>Limpieza, gradación combinada (F)</b>				
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)	E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
<b>Geometría de las partículas, agregado grueso (F)</b>				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%)	E-227			
- Una cara: rodadura / intermedia / base		75/60/-	75/75/60	85/75/60
- Dos caras: rodadura / intermedia / base		-/-/-	60/-/-	70/-/-
<b>Geometría de las partículas, agregado fino (F)</b>				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%)	E-239			
- Capa de: rodadura / intermedia / base		40/35/-	45/40/35	45/40/35
<b>Adhesividad (O)</b>				
- Agregado grueso: Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%)	E-757	Reportar		
- Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método riedel-weber), índice mínimo	E-774	4		

**Anexo B. Tabla 5. Resumen de Ensayos de Caracterización de los agregados pétreos (Fuente propia)**

Propiedad	Norma INVIAS	Especificación INVIAS(NT3)	Resultado
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%) 100 ciclos	INV E-218	<5	4,2
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%) 500 ciclos	INV E-218	<25	20,99
Degradación por abrasión en el aparato Micro-Deval (%)	INV E-238	<20	7,7
Resistencia mecánica por el método 10% de finos Valor en Seco (KN)	INV E-224	<110	***
Resistencia mecánica por el método 10% de finos Relación Húmedo/Seco (%)	INV E-224	<75	***
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura	INV E-232	>0.45	***
Solidez Frente a la Acción de Sulfatos (%)	INV E-220	<18	8,8
Impurezas en agregado grueso (%)	INV E-237	<0.5	0,38
Índice de Plasticidad	INV E-125/126	N.P	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	0,10%
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
Vacios de Llenante Seco Compacto (%)	INV E-229	≥38	39,2
Cubrimiento de los Agregados en Presencia del Agua Hirviendo	INV E-757	Reportar	95%
Adhesividad de los Ligantes Bituminosos a los Agregados Finos (Método Riedel-Weber)	INV E-774	>4	7
Peso Unitario Llenante en Kerosene (g/cm3)	INV E-225	0.5-0.8	0,79
*** No se pudo realizar este ensayo			

**Anexo C. Tabla 6. Proporción máxima de arena natural en el agregado para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013).**

Característica	Nivel de Tránsito		
	NT1	NT2	NT3
Proporción de arena natural: % de la masa total del agregado combinado	≤ 25	≤ 25	≤ 15
Proporción de arena natural: % de la masa total del agregado fino		≤ 50	

**Anexo D. Tabla 7. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013)**

Tipo de mezcla		Tamiz (mm/U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.42	0.18	0.075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.1	No.4	No.8	No.
								5	0		
							0	0	0	200	
Densa	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semidensa	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
Módulo											
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo ( $\pm$ )					4 %				3%		2%

Anexo E. Tabla 8. Análisis granulométrico combinación MDC-19 (Fuente propia)

PROPORCIÓN→	% PASA				MATERIAL COMBINADO	ESPECIFICACIÓN MDC-19	
	20.0%	50.0%	20.0%	10.0%		MIN	MAX
TAMIZ ↓	GRAVA 3/4"	ARENA FINA	GRAVILLA 3/8"	GRAVA 1/2"			
1"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
3/4"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
1/2"	62.1	100.0	100.0	97.3	92.1	80	95
3/8"	7.5	100.0	98.5	55.3	76.7	70	88
#4	1.2	99.5	33.4	6.7	57.3	49	65
#10	1.2	78.6	13.2	5.8	42.8	29	45
#40	1.1	38.8	10.9	4.8	22.3	14	25
#80	1.1	16.8	8.4	3.6	10.7	8	17
#200	0.8	8.5	4.5	2.6	5.56	4	8

Anexo F. Tabla 9. Grado de desempeño PG, de los asfaltos modificados formulados, a la temperatura alta según AASHTO T 315-12 (R2016) (Fuente propia)

Estándar 315	AASHTO T-	AM Látex	AM ELP	AM SBS	AM GCR	AM EVA	AM RCE	AM Acido	AM VAE	AM GCR PG
Temperatura pasa, (°C)		***	82.0	82.0	82.0	82.0	82.0	***	***	82.0
Angulo de fase, (°), 75° máx.		* **	59.9	64.8	74.3	74.8	55.8	***	***	69.6
G*/senδ @10 rad/seg, (kPa), 1.0 min.		***	1.19	1.61	1.23	1.27	1.18	***	***	1.32
Temperatura Falla, (°C)		***	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	***	***	88.0
Grado temperatura alta del PG AASHTO M-320		***	82.0	82.0	82.0	82.0	82.0	***	***	82.0
Grado específico de temperatura alta del PG AASHTO M-320		***	85.2	86.4	84.8	84.9	87.4	***	***	85.0
Rigidez en creep, S<300 a -22 °C(MPa)		***	60.18	38.02	114.43	52.17	22.5 a - 16°C	***	***	53.64
Valor de pendiente, m>0.3 a - 22°C		***	0.336	0.346	0.305	0.320	0.347 a - 16°C	***	***	0.374
Grado de desempeño PG (°C)		***	82-22	82-22	82-22	82-22	82-16	***	***	82-22

**Anexo G. Tabla 10. Especificaciones del asfalto modificado con polímeros (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013)**

Característica	Norma de ensayo INV	Tipo I	Tipo IIa	Tipo IIb	Tipo III	Tipo IV	Tipo V
<b>Asfalto original</b>							
Penetración (25°C, 100 g, 5s), 0.1 mm	E-706	55 a 70	40 a 70	55 a 70	55 a 70	80 a 130	15 a 40
Punto de ablandamiento, *C, mínimo	E-712	58	58	58	65	60	65
Ductilidad (5* C, 5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	15	15	15	30	-
Recuperación elástica por torsión a 25* C, %, mínimo	E-727	15	40	40	70	70	15
Estabilidad al almacenamiento (Nota 1) - Diferencia en el punto de ablandamiento, * C, máximo	E-726 y E-712	5	5	5	5	5	5
Contenido de agua, %, máximo	E-704	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland. *C, mínimo	E-709	230	230	230	230	230	230
<b>Residuo del ensayo de pérdida en calentamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo (INV E-720)</b>							
Pérdida de masa, %, máximo	E-720	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Penetración del residuo, en % de la penetración original, mínimo	E-706	65	50	65	65	60	70
Incremento en el punto de ablandamiento, *C, máximo	E-712	10	10	10	10	10	10
Ductilidad (5* C, 5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	8	8	8	15	-

**Anexo H. Tabla 11. Ensayos de Caracterización de los asfaltos modificados (Fuente propia)**

Característica Evaluada	Norma de Prueba	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM
		Látex	ELP	SBS Lineal	GCR	EVA	RCE	Acido	VAE	GCR PG
Penetración a 25°C, 100g y 5 s, (0.1 mm)	INV-E-706	***	34.1	46.4	43.6	46.0	47.9	***	***	46.1
Punto de ablandamiento, (°C).	INV-E-712	***	66.8	87.6	59.3	71.8	71.0	***	***	60.3
Viscosidad aparente a 160°C, (Pa.s).	ASTM D-2196	***	593.6	591.3	580.0	748.1	580.7	***	***	573.0
Recuperación elástica por torsión a 25°C, (%)	INV-E-727	***	34.4	85.6	54.4	22.2	50.6	***	***	63.9
Contenido de agua, (%).	INV-E-704	***	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	***	***	0.0
Estabilidad al almacenamiento, (°C).	INV-E-726/712	***	2.0	1.5	1.0	1.4	0.4	***	***	0.6
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland, (°C).	INV-E-709	***	265	275	277	255	288	***	***	289
<b>RESIDUO DEL ENSAYO DE PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO EN PELÍCULA DELGADA ROTATORIA, NORMA DE ENSAYO (INV E- 720)</b>										
Pérdidas de masa, (%).	INV-E-720	***	0.19	0.63	0.82	0.70	0.55	***	***	0.59
Penetración del residuo, luego de la pérdida de masa por calentamiento (E-720), en (%).	INV-E-706	***	59.5	45.5	73.0	95.7	67.6	***	***	58.7
Incremento del punto de ablandamiento (°C), Máximo.	INV-E-712	***	10.2	2.0	12.8	6.2	6.8	***	***	9.0

\*\*\* No se puede calcular el valor, debido a que la incorporación de este agente modificador es justo en el momento de la emulsificación del asfalto.

**Anexo I. Tabla 12. Especificaciones de emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímeros (Normas y Especificaciones INVIAS, 2013)**

Ensayos sobre la emulsión	Unidad	Norma de ensayo INV	Rotura rápida				Rotura media		Rotura lenta	
			CRR – 1m		CRR – 2m		CRM-m		CRL – 1hm	
			Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Viscosidad:										
SayboltFurol a 25°C	\$	E-763	-	-	-	-	-	-	-	100
SayboltFurol a 50°C	\$		20	100	20	300	20	450	-	-
Contenido de agua en volumen	%	E-761	-	40	-	35	-	35	-	43
Estabilidad durante almacenamiento (24 h), sedimentación a los 5 días										
	%	E-764	-	1	-	1	-	1	-	1
				5		5		5		5
Destilación:	%	E-762	60	-	65	-	60	-	57	-
Contenido de asfalto residual	%		-	3	-	3	-	12	-	0
Contenido de disolventes										
Tamizado	%	E-765	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1
Retenido tamiz No. 20 (850 ?m)										
Rotura	%	E-766	40	-	40	-	-	-	-	-
Diocilsulfosuccinato sódico	%	E-770	-	-	-	-	-	-	-	2
Mezcla con cemento										
Carga de partícula		E-767	Positiva		Positiva		Positiva		Positiva	
pH		E-768	-	-	6	-	6	-	6	6
Recubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento:										
		E-769								
-Con agregado seco			-	-	Buena	-	-	-	-	-
-Con agregado seco y acción del agua			-	-	Satisfactoria	-	-	-	-	-
-Con agregado húmedo			-	-	Satisfactoria	-	-	-	-	-
			-	-	Satisfactoria	-	-	-	-	-

---

-Con agregado  
húmedo y acción del  
agua

---

Ensayos sobre el residuo de destilación		E-771									
Penetración 25°C, 100 g, 5 s	0.1 mm	E-706	60 100	100 250	60 100	100 250	100	250	60	100	
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	*C	E-712	55 45	-	55 45	-	40	-	55	-	
Ductilidad cm/min	25°C, 5 cm	E-702	10	-	10	-	10	-	10	-	
Recuperación elástica por torsión 25°C.	%	E-727	12	-	12	-	12	-	12	-	

---

**Anexo J. Tabla 13. Ensayos de Caracterización de las emulsiones modificadas (Fuente propia)**

Característica	Especificación		EA	EAM	EAM	EAM						
	INVIAS	TDOT	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	EAM #8	EAM #9	EAM #10
Viscosidad Sayboltfurol 50°C (°)	20 - 100	50 - 150	64.34	75.38	70.33	69.59	76.90	54.78	55.80	58.25	54.47	78.59
Contenido de agua en volumen (%)	< 40	-	31.49	32.50	31.99	32.00	31.25	33.56	32.41	34.49	33.30	34.38
Estabilidad durante 24 horas (%)	< 1	< 1	0.59	0.50	0.61	0.53	0.90	0.16	0.25	0.20	0.42	0.87
Sedimentación a los 5 días (%)	< 5	-	3.1	2.6	3.2	2.8	4.6	0.9	1.4	1.1	2.2	4.5
Contenido de asfalto residual (%)	> 60	> 65	68.51	67.50	68.01	68.00	68.75	66.44	67.59	65.51	66.70	65.62
Contenido de disolventes (%)	< 3	< 3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09	0.09	0.04	0.03	0.07	0.07
Retenido en tamiz No. 20 (%)	< 0.1	< 0.1	0.010	0.005	0.007	0.011	0.079	0.084	0.031	0.022	0.059	0.064
Carga de partícula	Positiva		Positiva									
pH	> 6	-	6.16	6.34	6.25	6.56	6.21	5.82	6.3	6.87	6.36	6.61
<b>Ensayos sobre el residuo de destilación</b>												
Recuperación elástica por torsión 25°C (%)	> 12	> 45	12.89	25.33	18.49	12.78	13.12	18.33	33.65	17.77	17.88	27.78

Anexo K. Tabla 14. Evaluación del criterio de falla para definir la calidad de los tipos de riego de liga. (Fuente propia)

Emulsión PEN 60/70				
Magnitudes	Residuo asfáltico en el riego de liga auxiliar en grs/m <sup>2</sup>			
	100	200	300	400
Diámetro, mm	100,3	100,4	100,3	100,1
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7901,19	7916,96	7901,19	7869,72
Carga máxima de rotura, N	8430	8315	9226	10736
Deformación a la carga máxima, mm	0,60	0,95	2,20	2,57
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,44	0,46	0,50	0,68
Emulsión Látex				
Diámetro, mm	100,1	100,2	100,1	100,1
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7869,72	7885,45	7869,72	7869,72
Carga máxima de rotura, N	7222	10148	10448	10615
Deformación a la carga máxima, mm	0,98	1,58	2,39	1,17
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,46	0,64	0,66	0,67
Emulsión ELP				
Diámetro, mm	100,4	100,3	100,1	100,1
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7916,96	7901,19	7869,72	7869,72
Carga máxima de rotura, N	13163	15496	14331	12357
Deformación a la carga máxima, mm	0,81	1,60	1,14	1,99
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,83	0,98	0,91	0,79
Emulsión SBS Lineal				
Diámetro, mm	100,1	100,1	100,3	100,2
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7869,72	7869,72	7901,19	7885,45
Carga máxima de rotura, N	9042	10074	10497	10904
Deformación a la carga máxima, mm	0,85	1,70	2,29	2,55
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,57	0,64	0,66	0,69
Emulsión GCR Convencional				
Diámetro, mm	100,2	100,2	100,4	100,3
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7885,45	7885,45	7916,96	7901,19
Carga máxima de rotura, N	6585	6830	7459	7770
Deformación a la carga máxima, mm	0,97	1,53	1,92	2,02
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,42	0,43	0,47	0,49
Emulsión EVA				
Diámetro, mm	100,3	100,2	100,1	100,3
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7901,19	7885,45	7869,72	7901,19
Carga máxima de rotura, N	12755	13451	14392	15762
Deformación a la carga máxima, mm	0,90	1,11	1,25	1,28
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,81	0,85	0,91	1,00
Emulsión RCE				

Diámetro, mm	100,3	100,4	100,3	100,2
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7901,19	7916,96	7901,19	7885,45
Carga máxima de rotura, N	11037	11592	14072	15022
Deformación a la carga máxima, mm	0,90	1,36	1,95	2,17
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,70	0,73	0,89	0,95
Emulsión Acido				
Diámetro, mm	100,1	100,3	100,1	100,2
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7869,72	7901,19	7869,72	7885,45
Carga máxima de rotura, N	10340	11815	14666	14940
Deformación a la carga máxima, mm	0,66	0,93	1,29	1,52
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,66	0,75	0,93	0,95
Emulsión VAE				
Diámetro, mm	100,2	100,2	100,3	100,3
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7885,45	7885,45	7901,19	7901,19
Carga máxima de rotura, N	11569	11926	12289	13903
Deformación a la carga máxima, mm	0,78	0,83	0,96	1,10
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,73	0,76	0,78	0,88
Emulsión GCR PG				
	100,3	100,2	100,4	100,3
Superficie, S, mm <sup>2</sup>	7901,19	7885,45	7916,96	7901,19
Carga máxima de rotura, N	10383	11771	12718	15296
Deformación a la carga máxima, mm	0,75	0,89	0,97	1,28
Resistencia a esfuerzo cortante, MPa	0,66	0,74	0,80	0,97

Nota: En color **amarillo** los valores que no cumple para 8.2 Ton. En **verde**, los valores que cumplen 8.2 Ton pero no para los valores de 13 Ton. En **negrita-rojo-gris**, los valores que cumplen 13 Ton.

Anexo L. Figura 15. Ubicación de las cargas en la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia)

TIPO DE EJE	MAGNITUD CARGA EJE (Ton)	MAGNITUD CARGA LLANTA (Kgrs)	MAGNITUD CARGA LLANTA (KN)	PRESION DE INFLADO (Kgrs/cm2)	PRESION DE INFLADO (KPa)	RADIO DE CARGA (cm)
Simple Rueda	8,2	2050,0	20,11	5,63	552,11	10,77
Doble (SRD)	13,0	3250,0	31,88	6,33	620,76	12,78

Posición de las cargas (Llantas) en cm. para los dos ejes 8.2 y 13.0 Toneladas.		
Id. de la llanta	Eje X (Dirección transversal)	Eje Y (Dirección tránsito)
A	0,0	0,0
B	32,4	0,0

Ubicación espacial en el plano cartesiano de los puntos de evaluación estructural

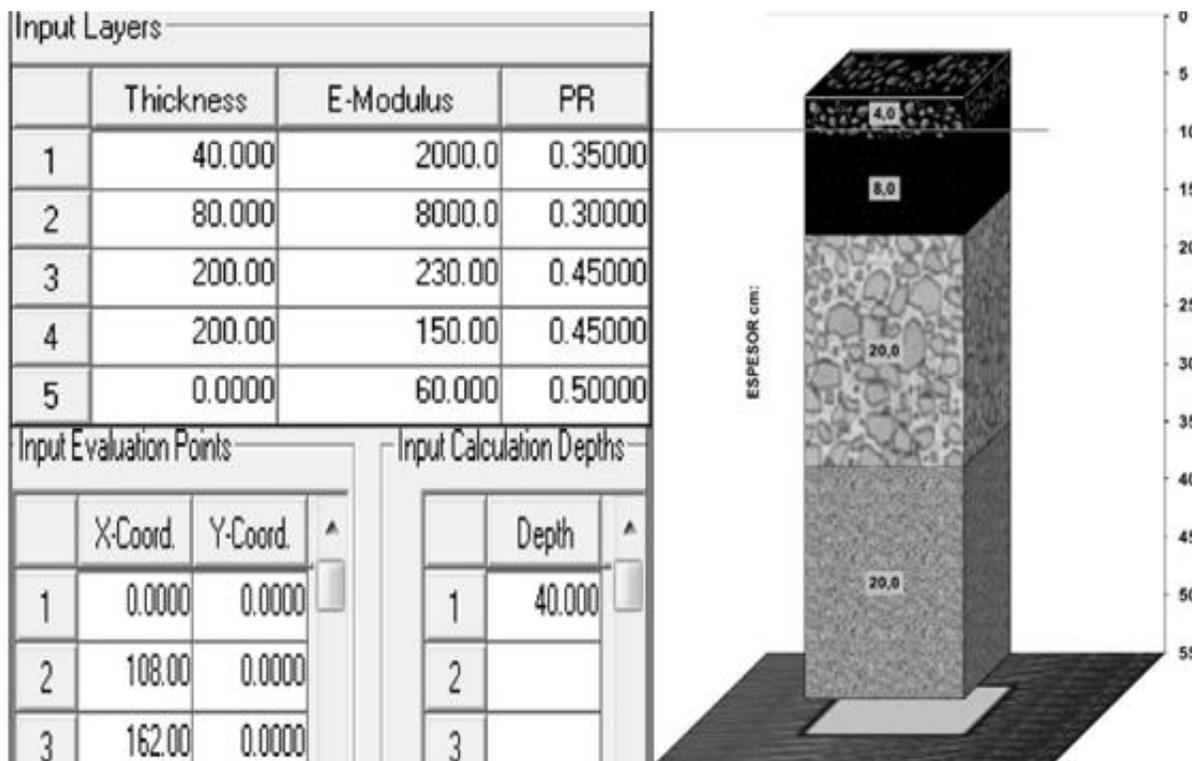
Id. del punto	Eje Equivalente Simple Rueda Doble (SRD) de 8.2 Ton.			Eje Equivalente Simple Rueda Doble (SRD) de 13.0 Ton.		
	Eje X (Transversal) (cm)	Eje Y (Tránsito) (cm)	Eje Z (Profundidad) (cm)	Eje X (Transversal) (cm)	Eje Y (Tránsito) (cm)	Eje Z (Profundidad) (cm)
1	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	4,00
2	10,77	0,00	4,00	12,78	0,00	4,00
3	16,20	0,00	4,00	16,20	0,00	4,00

**Anexo M. Tabla15. Características de la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia)**

Características de la estructura de pavimento a modelar						
Espesor		Tipo de capa	Módulo elástico a 21°C			
cm	pulg		Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>	PSI	
4,0	1,6	Rodadura de Mezcla Asfáltica Densa en Caliente Tipo MDC-19 Artículo 450-13, Tabla 450-6 con Asfalto 60/70 Artículo 410-13, Tabla 410-1	2000,0	20394,4	2,9 E+05	
8,0	3,1	Base de Mezcla Asfáltica Densa en caliente Tipo MSC-25, Artículo 450-13, Tabla 450-6 con Asfalto 60/70 Artículo 410-13, Tabla 410-1	8000,0	81577,6	1,2 E+06	
20,0	7,9	Base Granular, Clase A, NT3, Tabla 330-1, Tipo BG-40, Tabla 330-3, Artículo 330-13. Clasificada como A-1-a (AASHTO).	230,0	2345,4	3,3 E+04	
20,0	7,9	Subbase Granular, Clase A, NT3, Tabla 320-1, Tipo SBG-38, Tabla 320-3, Artículo 320-13. Clasificada como A-2-4 (AASHTO).	150,0	1529,6	2,2 E+04	
Semi infinita		Sub-rasante clasificada como A-5 (AASHTO) CBR 6,8%. Para encontrar el Módulo resiliente se usa la correlación planteada en la Tabla 2.2 50 de MEPDG, $M_r = 2555$ (CBR), 0,64(TRL), psi	60,0	611,8	8,7 E+03	

Nota: todos los artículos están referidos al Capítulo 3-Afirmados, Subbases y Bases Capítulo 4- Pavimentos Asfálticos, de las especificaciones generales de Construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013).

**Anexo N. Figura 16. Entrada de datos estructurales al programa WinJULEA y esquema de espesores de la estructura de pavimento a modelar (Fuente propia)**

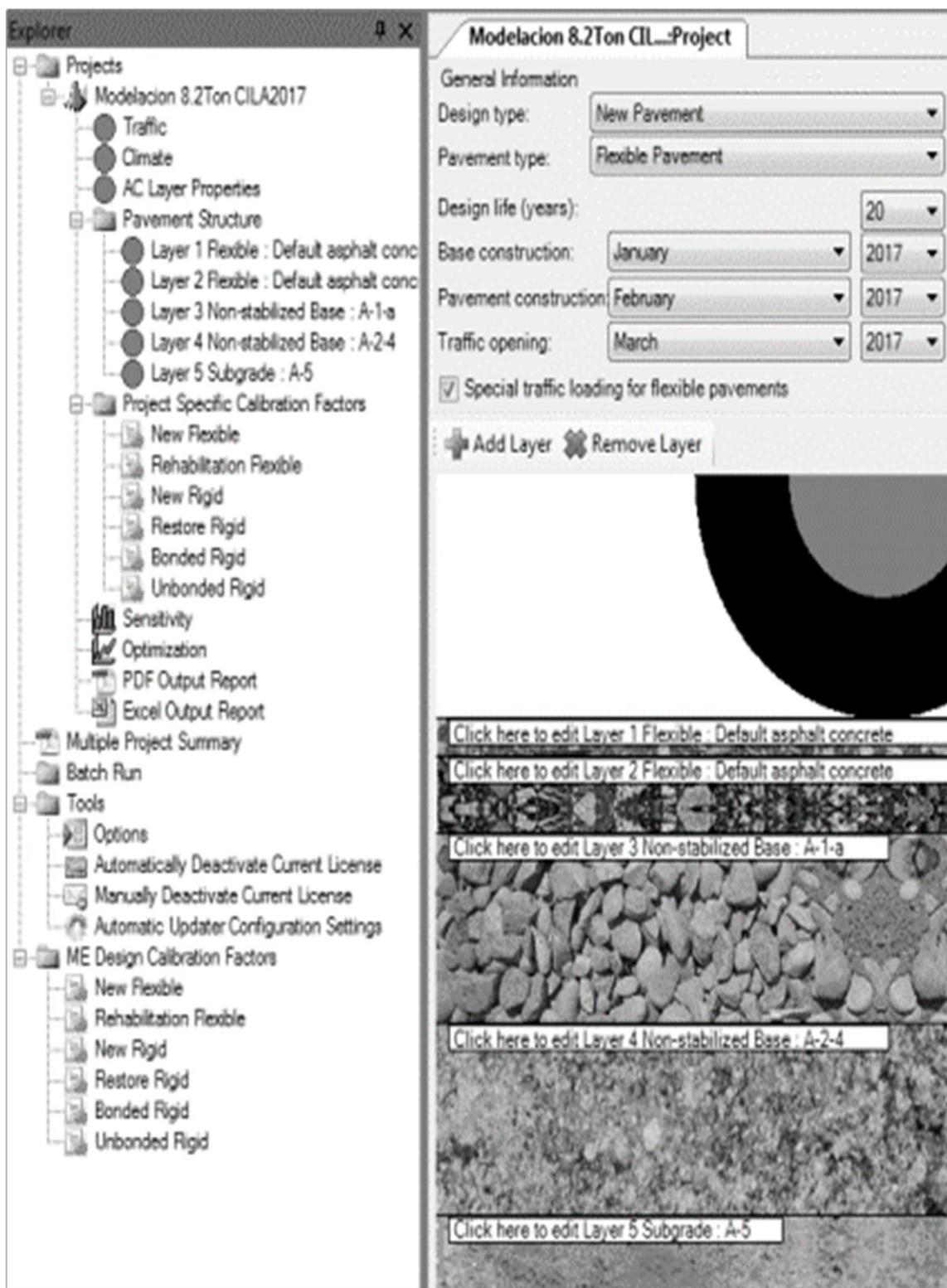


**Anexo O. Figura 17. Estado de esfuerzos mecánicos en la interface de enlace entre capas bituminosas para los ejes de carga de 8.2 y 13.0 toneladas (Fuente propia)**

En la figura se muestra la ventana de salida, correspondiente al estado de esfuerzos, de la estructura de pavimento definida en el Anexo M. Tabla 15, según los puntos de verificación estructural propuestos en Anexo L. Figura 15. En la parte superior se resalta el esfuerzo máximo cortante para el Eje de carga SRD de 8.2 Ton. y en la inferior para el Eje de carga SRD de 13.0 Ton.

PrincStrain_3	-0.38618E-04	-0.62146E-04	-0.74335E-04
MaxShear	0.47741	0.55697	0.59996
OctNormStress	1.0364	0.84163	0.72314
OctShearStress	0.40555	0.47018	0.50276
PrincStrain_3	-0.65125E-04	-0.87784E-04	-0.99757E-04
MaxShear	0.71584	0.79445	0.83503
OctNormStress	1.4188	1.1286	0.95675
OctShearStress	0.60921	0.66187	0.68962

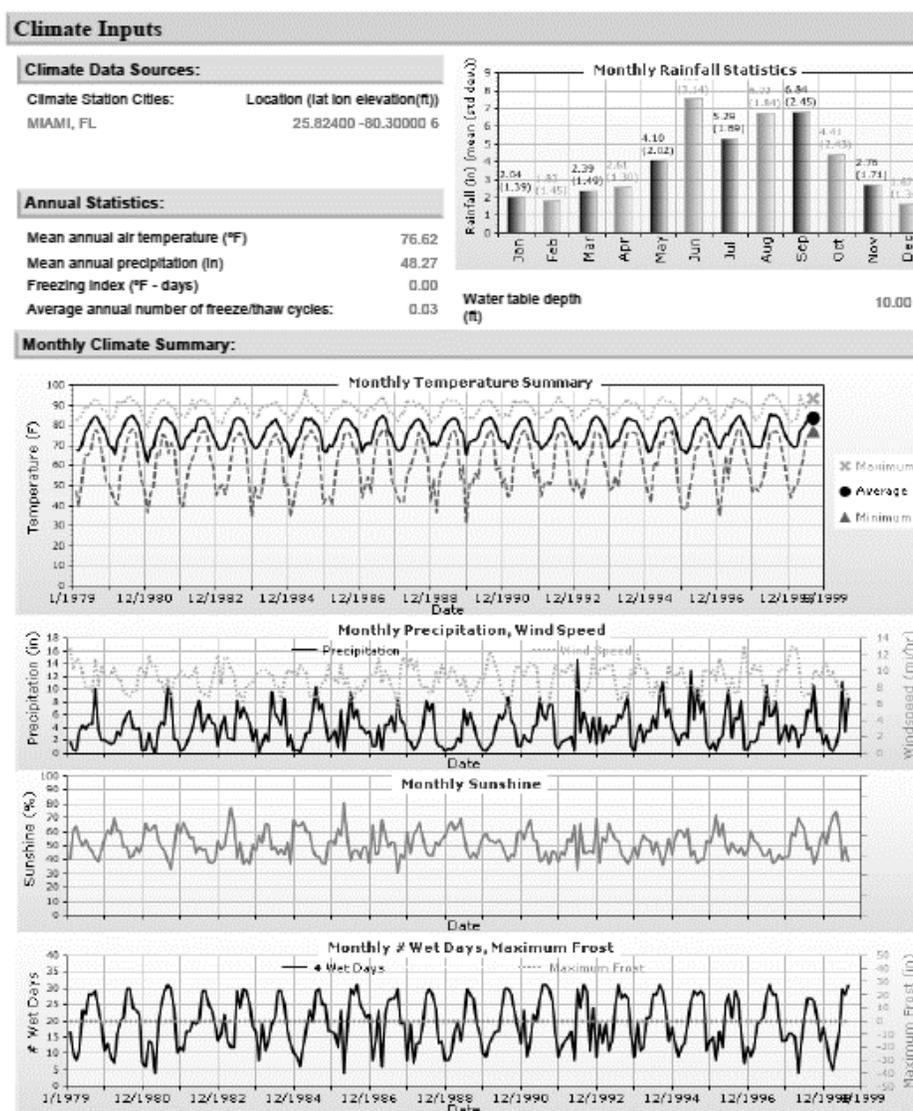
Anexo P. Figura 18. Interfaz de entrada de datos al Nivel 2 de precisión de diseño en el programa AASHTOWare® Versión 2.2 (Fuente propia)



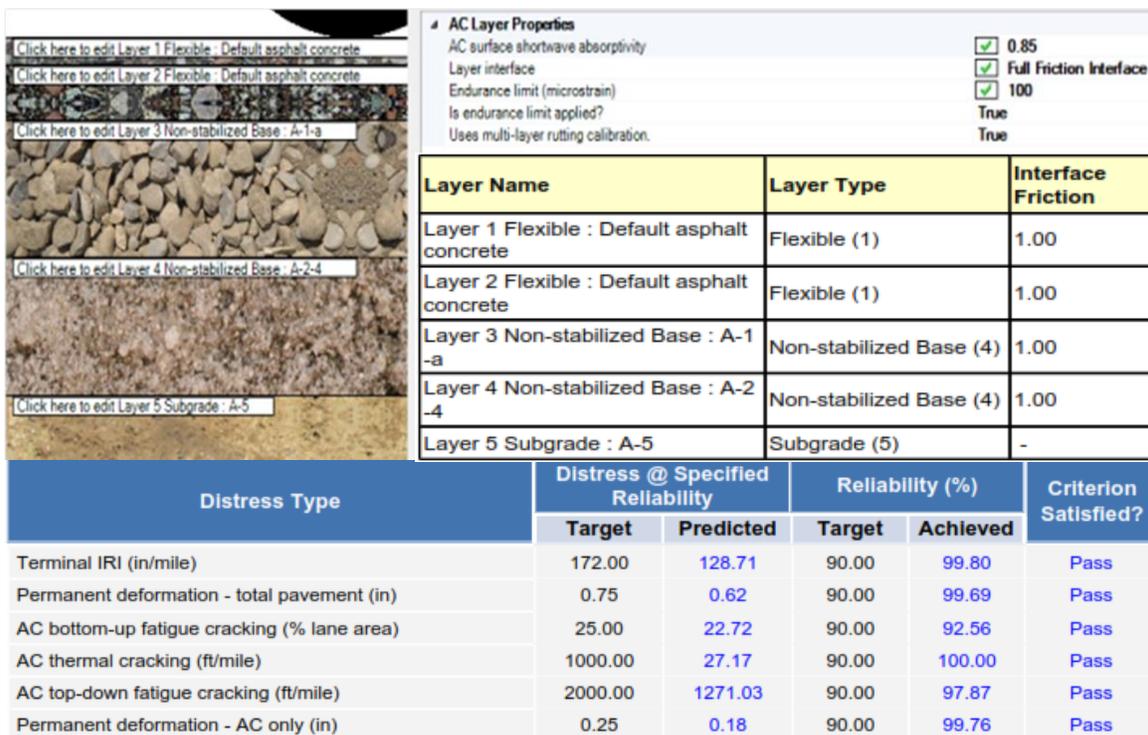
Anexo Q. Figura 19. Interfaz de entrada de los criterios de desempeño, AASHTOWare® Versión 2.2 (Fuente propia)

Performance Criteria	Limit	Relability
IRI (ft/mile)	63	
Terminal IRI (ft/mile)	172	90
AC top-down fatigue cracking (ft/mile)	2000	90
AC bottom-up fatigue cracking (% lane area)	25	90
AC thermal cracking (ft/mile)	1000	90
Permanent deformation – total pavement (n)	0.75	90
Permanent deformation – AC only (n)	0.25	90

Anexo R. Figura 20. Modelo Climático seleccionado para la modelación estructural en AASHTOWare® Versión 2.2 (Fuente propia)



Anexo S. Figura 21. Modelación de interfaz con total fricción (Fuente propia)



Anexo T. Figura 22. Modelación de interfaz con 22% de afectación (Fuente propia)

