

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

**EFECTO DE LA TASA DE APLICACIÓN Y EL TIPO DE LIGANTE EN
LA ADHERENCIA DE CAPAS ASFÁLTICAS EVALUADAS POR MEDIO DEL
ENSAYO LCB**

GERARDO ANDRÉS DORADO JURADO

LAURA CAROLINA ROSERO PEPINOSA

DIRECTOR:

JAIME RAFAEL OBANDO ANTE, D.SC.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
AGOSTO DE 2018
POPAYÁN

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

GERARDO ANDRÉS DORADO JURADO
LAURA CAROLINA ROSERO PEPINOSA

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 EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

APROBADO POR:

ING. JAIME RAFAEL OBANDO ANTE, D.SC.
(DIRECTOR)

ING. MG. EFRAIN DE JESUS SOLANO FAJARDO
(JURADO INTERNO)

ING. MG. CIRA PIEDRAHITA CÉSPEDES
(JURADO EXTERNO)

POPAYÁN, AGOSTO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

DORADO, GERARDO ANDRÉS; ROSERO, LAURA CAROLINA

Efecto de la tasa de aplicación y el tipo de ligante en la adherencia de capas asfálticas evaluadas por medio del ensayo LCB, 2018.

XVI, 62 p., 279 mm

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

Departamento de Geotecnia.

- | | |
|------------------------|-------------------------------------|
| 1. Riego de adherencia | 2. Resistencia al corte entre capas |
| 3. Pavimento asfáltico | 4. Tasa de aplicación |

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Dorado, G. A. & Rosero, L. C. (2018). *Efecto de la tasa de aplicación y el tipo de ligante en la adherencia de capas asfálticas evaluadas por medio del ensayo LCB*. Trabajo de grado de Maestría, Universidad del Cauca, Popayán.

CESIÓN DE DERECHOS

NOMBRES DE LOS AUTORES: Gerardo Andrés Dorado Jurado, Laura Carolina Rosero Pepinosa.

TÍTULO: Efecto de la tasa de aplicación y el tipo de ligante en la adherencia de capas asfálticas evaluadas por medio del ensayo LCB.

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.

Gerardo Andrés Dorado Jurado
C.C. 1.032.446.834
Email: gerardojur@gmail.com

Laura Carolina Rosero Pepinosa
C.C. 1.085.297.426
Email: lauracarolinarp@gmail.com

Dedicatoria:

A Dios, quien ha sido el forjador de nuestro camino, que durante este proceso fue el encargado de acompañar, dar la fortaleza y persistencia necesaria para emprender y culminar con éxito y satisfacción esta etapa que hoy se convierte en un sueño cumplido.

Tu amor y sostén no tiene fin, este logro es resultado de tu ayuda

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres por mostrar el camino hacia la superación, por su orientación, comprensión y apoyo de manera incondicional durante todo el desarrollo del trabajo de grado, se han convertido en un soporte muy importante en esta etapa de la vida. Ustedes han sido los encargados de plantar los cimientos en nuestra formación, brindando aportes invaluable que servirán para la toda vida.

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. Un agradecimiento especial al ingeniero Jaime Obando Ante, como asesor de trabajo de grado, su acompañamiento durante este proceso tanto en la formulación como el desarrollo del proyecto fue de valiosa ayuda.

A aquellas empresas y laboratorios que prestaron una valiosa colaboración en el uso de equipos y suministro de materiales utilizados para el desarrollo de este trabajo de grado.

RESUMEN

El efecto de la aplicación del riego de liga en la adherencia de las capas asfálticas ha sido ampliamente abordado por los investigadores de la ingeniería de pavimentos en el mundo. Se han encontrado diversos factores que influyen en el grado de adhesión que se logra entre dos capas de mezcla asfáltica, entre los cuales se destaca el tipo de riego, la tasa de aplicación, la temperatura, la condición superficial de las capas, la humedad, entre otros. Dado que la resistencia al corte de la interfase adherida de las capas tiene gran importancia en la respuesta mecánica y durabilidad de los pavimentos asfálticos, se realizó el presente estudio con el fin de evaluar el efecto que tiene la tasa de aplicación y el tipo de ligante bituminoso en dicha propiedad, mediante la implementación del ensayo de corte del Laboratorio de Caminos de Barcelona. Dos tipos de emulsiones asfálticas denominadas CRL-1 y CRL-1hm (convencional y modificada con polímeros, respectivamente) fueron utilizadas como riego de liga en cinco tasas de aplicación residual (100, 200, 300, 400 y 500 g/m²) y las capas asfálticas se fabricaron con una mezcla densa en caliente tipo MDC-19. Los resultados indicaron que la resistencia a cortante desarrollada por el riego CRL-1hm es mayor que para el riego CRL-1, además, existió una variación en la resistencia con el aumento de la tasa de aplicación que permitió la obtención de una tasa óptima para la cual la resistencia al corte es máxima. Finalmente, se realizó una comparación teórica de repeticiones admisibles para fisuración por fatiga en los casos de adherencia total y parcial, empleando el módulo de reacción cortante calculado experimentalmente como parámetro de adherencia en el software BISAR.

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

ABSTRACT

The effect of tack coat application in the bonding of asphalt layers has been widely addressed by pavement engineering researchers around the world. Several factors have been found that influence the degree of bonding achieved between two asphalt layers, including type of tack coat, application rate, temperature, surface condition of layers, moisture, among others. Since interface shear strength of bituminous layers has great importance in the mechanical response and durability of asphalt pavements, the present study was carried out to evaluate the effect that application rate and type of binder have on that property, by the implementation of the Laboratorio de Caminos de Barcelona shear test. Two types of asphalt emulsions named CRL-1 and CRL-1hm (conventional and modified with polymers, respectively) were used as tack coat in five residual application rates (100, 200, 300, 400 and 500 g/m²) and the asphalt layers were made with a MDC-19 dense-graded hot asphalt mixture. The results indicated that shear strength developed by CRL-1hm tack coat is higher than for the CRL-1 one, moreover, there was a variation in strength with the increase of application rate that made possible to obtain an optimum rate for which the shear strength is maximum. Finally, a theoretical comparison of allowable number of repetitions for fatigue cracking was carried out in cases of total and partial bonding, using the experimentally calculated shear reaction modulus as bonding parameter in the BISAR software.

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

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Descripción del problema.....	3
3. Justificación.....	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Marco teórico	8
5.1. Adherencia entre capas asfálticas	8
5.2. Prácticas generales en riegos de liga.....	10
5.3. Factores que inciden en la adherencia entre capas asfálticas.....	12
5.3.1. Tasa de aplicación del ligante	12
5.3.2. Tipo de ligante bituminoso utilizado.....	14
5.4. Estudios realizados sobre adherencia entre capas de mezcla asfáltica	15
5.5. Caracterización de la adherencia mediante ensayo LCB.....	18
5.5.1. Descripción del ensayo de corte LCB	19
5.5.2. Variabilidad del ensayo LCB	20
5.6. Modelación de la interfase.....	21
6. Metodología	23
6.1. Materiales utilizados.....	23
6.1.1. Agregado pétreo	23
6.1.2. Cemento asfáltico.....	25
6.1.3. Mezcla asfáltica.....	27
6.1.4. Riego de liga	28
6.2. Elaboración de cuerpos de prueba	30
6.3. Descripción del equipo y ejecución del ensayo de adherencia.....	31
6.4. Análisis teórico de la adherencia de las capas asfálticas en la vida a fatiga del pavimento	35
6.4.1. Estructuras de pavimento estudiadas.....	36
6.4.2. Caracterización de los materiales	37
6.4.3. Cargas de tránsito analizadas	38
6.4.4. Puntos de análisis de respuesta crítica.....	38

7. Evaluación de la resistencia al corte en la interfase adherida de las capas asfálticas	41
7.1. Fuerza cortante de rotura	41
7.2. Resistencia al esfuerzo cortante.....	42
8. Efecto de la tasa de aplicación y el tipo de emulsión en la adherencia de las capas asfálticas	44
9. Tasas óptimas de aplicación de los riegos de liga utilizados	46
10. Influencia de la adherencia de las capas asfálticas en la vida a fatiga del pavimento....	47
10.1. Evaluación de la rigidez tangencial de la interfase adherida de las capas asfálticas	47
10.2. Análisis estructural para fisuración por fatiga	49
11. Conclusiones y recomendaciones.....	54
11.1. Conclusiones.....	54
11.2. Recomendaciones para futuras investigaciones.....	55
12. Referencias bibliográficas	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.	23
Tabla 2. Resultados de caracterización de agregado mineral.	25
Tabla 3. Resultados de caracterización de cemento asfáltico.	26
Tabla 4. Caracterización de emulsión asfáltica convencional CRL-1.	29
Tabla 5. Caracterización de emulsión asfáltica modificada CRL-1hm.	29
Tabla 6. Relación entre asfalto residual y emulsión por aplicar.	31
Tabla 7. Regiones climáticas establecidas en el manual de diseño INVIAS.....	36
Tabla 8. Categorías de tránsito establecidas en el manual de diseño INVIAS.	36
Tabla 9. Categorías de subrasante establecidas en el manual de diseño INVIAS.	36
Tabla 10. Estructuras de pavimento estudiadas.	37
Tabla 11. Propiedades elásticas de las capas de pavimento.....	38
Tabla 12. Configuración de semiejes de carga.	38
Tabla 13. Coordenadas horizontales de los puntos de análisis.	39
Tabla 14. Profundidad de los puntos de análisis.....	40

Tabla 15. Resultados de fuerza cortante de rotura con emulsión asfáltica CRL-1.	41
Tabla 16. Resultados de fuerza cortante de rotura con emulsión asfáltica CRL-1hm.	42
Tabla 17. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante con emulsión asfáltica CRL-1.	43
Tabla 18. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante con emulsión asfáltica CRL-1hm.	43
Tabla 19. Análisis estadístico del efecto del tipo de riego de liga sobre la REC.	44
Tabla 20. Análisis estadístico del efecto de la dosificación residual sobre la REC.	44
Tabla 21. Tasas óptimas de aplicación del ligante residual.	46
Tabla 22. Resultados de módulo de reacción cortante.	48
Tabla 23. Espesor de capas asfálticas y profundidad de puntos para análisis estructural.	49
Tabla 24. Resumen de resultados de deformación unitaria.	50
Tabla 25. Resumen de resultados de repeticiones admisibles.	51
Tabla 26. Resultados de análisis de las estructuras de pavimento.	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consecuencias de la falta de adherencia entre capas.	8
Figura 2. Interfase según tipos de mezcla de las capas: (a) densa – densa, (b) porosa – densa.	9
Figura 3. Tipos de material para riego de liga.	10
Figura 4. Emulsiones utilizadas como riego de liga.	11
Figura 5. Variación de la resistencia al corte de la interfase con la tasa de aplicación residual. ...	13
Figura 6. Dispositivo de corte ASTRA para evaluación de resistencia adherente.	16
Figura 7. Esquema del ensayo LPDS.	17
Figura 8. Esquema del dispositivo de resistencia adherente del NCAT.	18
Figura 9. Modos de deterioro en la interfase del pavimento bajo condiciones de servicio.	19
Figura 10. Diagrama de fuerzas actuando sobre el espécimen en el ensayo LCB.	19
Figura 11. Intervalos de confianza al 95% para diferentes niveles de resistencia al corte.	20
Figura 12. Esquema de desplazamiento relativo (Δu) entre dos superficies adheridas.	21
Figura 13. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.	24
Figura 14. Curva reológica del cemento asfáltico.	26
Figura 15. Coordenadas horizontales de los puntos de análisis.	39

Figura 16. Profundidad de los puntos de análisis.	40
Figura 17. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación y tipo de riego.	45
Figura 18. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación y tipo de riego.	46
Figura 19. Esquema de desplazamiento relativo entre las superficies adheridas.	48
Figura 20. Número de repeticiones admisibles adherencia parcial – adherencia total.	52

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Fisuración por deslizamiento de capas.....	12
Fotografía 2. Descascaramiento.....	12
Fotografía 3. Dispositivo LPDS.....	17
Fotografía 4. Caja de corte con espécimen preparado.	17
Fotografía 5. Caja de corte en Equipo Superpave.....	17
Fotografía 6. Tamización de agregado pétreo.....	27
Fotografía 7. Pesaje de agregado pétreo.	27
Fotografía 8. Distribución de cantidades de agregado.....	27
Fotografía 9. Adición de cemento asfáltico.	28
Fotografía 10. Mezclado homogéneo con agregado.	28
Fotografía 11. Compactación de capa inferior en molde Marshall.....	28
Fotografía 12. Conjunto de emulsiones adquiridas.....	28
Fotografía 13. Emulsión catiónica de rotura lenta (CRL-1).	28
Fotografía 14. Emulsión catiónica de rotura lenta modificada con polímeros (CRL-1hm).	28
Fotografía 15. Compactación primera capa de especímenes de prueba.	30
Fotografía 16. Aplicación de riego de liga.....	30
Fotografía 17. Especímenes en cámara termostática.	30
Fotografía 18. Moldes para compactación de segunda capa.....	31
Fotografía 19. Especímenes de prueba fabricados.....	31
Fotografía 20. Acondicionamiento de especímenes de prueba en cámara termostática.	33
Fotografía 21. Dispositivo de ensayo y cuerpo de prueba.	34
Fotografía 22. Prensa de carga HM-3000.....	34

Fotografía 23. Inicio de prueba de carga.	35
Fotografía 24. Finalización de prueba de carga.	35
Fotografía 25. Espécimen separado por su interfase.	35

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
a	Radio del área cargada	m
AK	Elasticidad de corte	m ³ /N
c _c	Coefficiente de curvatura	–
c _u	Coefficiente de uniformidad	–
E	Módulo dinámico de capa asfáltica	Pa
G	Módulo de corte	Pa
G*/senδ	Factor de ahuellamiento del cemento asfáltico	Pa
H	Altura sobre el nivel del mar	m
h	Espesor de la interfase	m
K	Módulo de reacción cortante	N/mm ³
M _a	Temperatura media ponderada del aire	°C
M _p	Temperatura media de la mezcla asfáltica	°C
N _f	Repeticiones admisibles para fisuración por fatiga	–
P	Carga máxima de rotura	N
pH	Potencial de hidrógeno	–
S	Área de la sección transversal	m ²
s	Desviación estándar	–
T	Temperatura media anual	°C
V _a	Proporción de volumen de aire en la mezcla asfáltica	–
V _b	Proporción de volumen de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica	–
x	Media aritmética	–
z	Profundidad bajo la superficie de pavimento	m

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
α	Coefficiente de deslizamiento	–

Símbolo	Término	Unidad SI
Δu	Desplazamiento relativo entre superficies	m
ϵ_t	Deformación unitaria por tracción	–
γ	Deformación unitaria tangencial	–
$\mu\epsilon$	Deformación unitaria $\times 10^{-6}$	–
ν	Relación de Poisson	–
τ	Esfuerzo cortante	Pa

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ANOVA	Analysis of Variance
AP	Adherencia parcial
API	American Petroleum Institute
AT	Adherencia total
BG	Base granular
CA	Carpeta asfáltica
CBR	California Bearing Ratio
CRL	Emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta
CRR	Emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida
CV	Coefficiente de variación
DE	Desviación estándar
FCR	Fuerza cortante de rotura
FHWA	Federal Highway Administration
IBEF	International Bitumen Emulsion Federation
INV	Instituto Nacional de Vías
LCB	Laboratorio de Caminos de Barcelona
LPDS	Layer-Parallel Direct Shear
MAGD	Mezcla asfáltica de gradación densa
MAP	Mezcla asfáltica porosa
MDC	Mezcla densa en caliente
NCAT	National Center for Asphalt Technology
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NP	No plástico

Abreviatura	Término
REC	Resistencia al esfuerzo cortante
RTFOT	Rolling thin film oven test
SBG	Subbase granular
STE	Subrasante
TRB	Transportation Research Board

1. Introducción

Con el fin de contribuir en los procesos de diseño, construcción y rehabilitación en obras de pavimentación se desarrolla la presente investigación, la cual tiene como punto fundamental de estudio la adherencia de las capas asfálticas de una estructura de pavimento y los factores que pueden influir en dicha propiedad. Para garantizar dicha adherencia y unir las capas del pavimento generalmente se utilizan materiales de origen bituminoso como las emulsiones asfálticas, que son dispersiones de partículas microscópicas de asfalto en agua, y a tales materiales se les conoce como riegos de liga.

En el medio colombiano la aplicación en obra de los riegos se ha llevado a cabo a través de los años de una forma bastante empírica, con un conocimiento muy somero de las características físicas y químicas que se involucran y por tal motivo no se ha podido asegurar un correcto desempeño de las estructuras de pavimento en este componente, desde esta perspectiva se motivó un interés por estudiar las emulsiones asfálticas que se fabrican en el país y conocer su comportamiento como riegos de liga, con el propósito adicional de conocer los distintos factores que influyen en la respuesta adherente de las capas bituminosas que conforman la estructura de un pavimento.

En el trabajo de grado se desarrolló un proyecto experimental con una metodología cuantitativa que permitió medir un parámetro de adherencia de capas bituminosas en diferentes condiciones, para tal fin se propuso llevar a cabo la fabricación de especímenes de prueba conformados por dos capas de mezcla asfáltica de uso común en la región de Nariño, adheridas en su interfase con emulsiones, ya que existe un interés adicional de producir conocimientos con alto grado de aplicabilidad al medio de la ingeniería de este departamento por lo cual se emplearán materiales de mezcla asfáltica y emulsión frecuentemente utilizados.

Tal proceso de fabricación se realizó teniendo como base los lineamientos de la norma española NLT 382/08 que evalúa la adherencia con un ensayo de corte, proceso al cual fueron sometidas los especímenes una vez fabricados con el objetivo de determinar el esfuerzo requerido para separar las capas bituminosas. El ensayo descrito en la norma referenciada es el ensayo de corte LCB desarrollado en el Laboratorio de Caminos de Barcelona, el cual presenta numerosas ventajas

en su implementación y ejecución que le han valido ser empleado en diferentes investigaciones relacionadas con adherencia.

Inicialmente se pretende determinar la resistencia al esfuerzo cortante de la superficie de unión de las capas asfálticas mediante el ensayo LCB. Para esto se llevó a cabo la fabricación de los especímenes de prueba con cinco dosificaciones diferentes y dos tipos de emulsiones asfálticas, los cuales posteriormente se sometieron al ensayo de corte con el fin de obtener los resultados primarios para su procesamiento y análisis.

Posteriormente fue evaluado el efecto de la tasa de aplicación y tipo de ligante en la adherencia de las capas asfálticas mediante un análisis de significación estadística, el cual permite establecer objetivamente la influencia que tienen estos factores en la respuesta de la interfase adherida dentro de las condiciones analizadas. Además, se proponen tasas óptimas de aplicación de las emulsiones asfálticas estudiadas, las cuales permiten obtener el máximo valor de resistencia al esfuerzo cortante y por tanto representan el logro de la mayor eficiencia en los riegos de liga.

Finalmente se llevó a cabo un análisis teórico de diferentes estructuras de pavimento en condición de adherencia parcial y adherencia total, con el fin de comparar el número de repeticiones admisibles para fisuración por fatiga existentes en cada caso. Como parámetro de caracterización de la interfase adherida de las capas asfálticas se utilizó el módulo de reacción cortante obtenido como resultado del ensayo experimental, el cual permite definir un grado de unión parcial en el software BISAR 3.0.

2. Descripción del problema

En el diseño de una estructura de pavimento flexible la adherencia entre las capas que la conforman es fundamental para garantizar una respuesta adecuada de la misma ante las diferentes sollicitaciones impuestas. Tales condiciones de adherencia del diseño deben ser reproducidas en la construcción del pavimento con un conocimiento suficiente de los materiales a emplear y de las prácticas apropiadas, como es el caso específico de construcción de carpetas asfálticas en varias capas, en cuya interfase debe colocarse un material ligante que asegure la adherencia necesaria para lograr un comportamiento monolítico de las mismas ya que no es posible en la mayoría de los casos construir la totalidad de la carpeta asfáltica en una sola capa, dada la eficiencia del proceso de compactación que ofrecen los equipos empleados en obra (Wheat, 2007). Este material ligante como cualquier otro que sea sometido a diversas condiciones de servicio está sujeto a muchos factores que influyen sobre su comportamiento, como es el caso de la cantidad presente del mismo en la superficie a ser adherida, la temperatura de aplicación, el tipo de material y el estado superficial de las mezclas asfálticas cuyas superficies intenta mantener unidas.

Siendo evidente la importancia de asegurar la condición de unión entre las capas bituminosas, el efecto que estos factores tienen en la capacidad adherente es desconocido en el medio de la ingeniería de pavimentos, por lo cual no existen parámetros adecuados en el diseño de los riegos ni tampoco se llevan a cabo procesos constructivos eficaces en el momento de su colocación en obra. Además, en la normatividad del país únicamente existen recomendaciones generales sobre la dosificación que debe colocarse y las demás consideraciones específicas se dejan a criterio de quienes intervengan en los proyectos.

En cuanto al desempeño que tienen los riegos de liga cuando se emplean en distintos proyectos de pavimentación, se desconoce la resistencia adherente que son capaces de desarrollar al someterse a esfuerzos mecánicos, dado que las propiedades de estos materiales no se evalúan ni previa ni posteriormente a la construcción de la estructura. Este hecho se explica en parte por la inexistencia de una especificación que establezca un control de calidad del riego de liga empleando algún parámetro de adherencia de las capas asfálticas. Por lo tanto, es necesario determinar cuál es la adherencia que las emulsiones asfálticas producidas en el país pueden aportar en la estructura de

pavimento para garantizar su comportamiento monolítico, y así, conocer las verdaderas posibilidades que ofrece su utilización.

3. Justificación

Existen en la comunidad científica de la ingeniería numerosos estudios realizados con el fin de conocer la influencia que tienen los distintos factores que rodean el fenómeno de la adherencia entre las capas bituminosas, los cuales han evaluado tal propiedad ante diferentes condiciones de temperatura, dosificaciones del ligante, tipos de materiales empleados como riego, condiciones de carga, entre otros; sin embargo, no se han llevado a cabo estudios de este tipo en el país y esto ha generado un desconocimiento del comportamiento de las emulsiones asfálticas. Por tal motivo, es muy importante generar un avance en el conocimiento de la influencia que tienen factores fundamentales como la cantidad de ligante residual en el desempeño de los riegos de liga, para contribuir en la identificación de criterios de ingeniería más apropiados dentro de los procesos de diseño y construcción de pavimentos, y a su vez, posibilitar un mayor grado de optimización de los recursos, una mayor eficacia en el desempeño de las capas adheridas y aportar una base investigativa sólida sobre la cual sea posible continuar desarrollando criterios a futuro.

Alrededor del mundo se han desarrollado e implementado múltiples y diferentes ensayos que evalúan la adherencia entre las capas asfálticas a través de sollicitaciones mecánicas de tracción, cizallamiento, torsión, entre otras, que permiten obtener un valor físico medible relacionado con dicha propiedad del pavimento. Este desarrollo se ha llevado a cabo con el fin de poder establecer especificaciones de construcción de pavimentos que aseguren la existencia de prácticas de ingeniería adecuadas dentro de las obras, específicamente aquellas que influyen directamente en lograr una adherencia eficaz entre las capas. En Colombia se ha establecido en la norma INV E-811-13 “Evaluación de la adherencia entre capas de un pavimento asfáltico mediante un ensayo de corte” un procedimiento para determinar la adherencia entre dos capas de mezcla asfáltica constitutivas de un pavimento, el cual permite obtener el esfuerzo cortante como parámetro de evaluación de la adherencia, planteando la posibilidad de su utilización como control de calidad de los riegos de imprimación y liga. Sin embargo, se ha optado por escoger para el presente trabajo de grado el ensayo LCB dada su facilidad en cuanto a fabricación del dispositivo e implementación.

A pesar de existir un ensayo de adherencia en la normatividad colombiana, no ha sido posible aún establecer requisitos para la construcción capas asfálticas adheridas, lo cual ha conducido a un

desconocimiento general del desempeño de los riegos de liga. Este hecho constituye otro de los motivos para realizar la presente investigación, ya que se plantea avanzar en el conocimiento de la calidad de los riegos de liga al determinar la resistencia al esfuerzo cortante que es capaz de desarrollar la interfase adherida de las capas asfálticas. Tal determinación va a permitir a la comunidad de la ingeniería de pavimentos abordar las verdaderas posibilidades que ofrecen las emulsiones asfálticas con una mayor seguridad y criterio ingenieril, ya que se pondrán de manifiesto posibles precauciones o limitaciones que deberán tenerse en cuenta para su utilización. De esta manera, la consecución de este objetivo constituye un enorme beneficio por contribuir al conocimiento de las propiedades de los materiales comúnmente utilizados en el país en la construcción de pavimentos.

Dado que en las estructuras de pavimento existen numerosas patologías que se encuentran asociadas a diferentes causas, es importante conocer las propiedades del pavimento y cómo su deficiente desempeño puede desencadenar un daño a futuro. Por tal razón, el aporte al conocimiento de la capacidad adherente de los riegos de liga traerá consigo a su vez un beneficio en la construcción de obras de mayor calidad, con la disposición de resistir por mayor tiempo la aparición de patologías relacionadas con la pérdida de adherencia. Serán entonces, los usuarios de las diferentes obras viales del país quienes perciban mejores condiciones de circulación en sus vehículos, con una sensación de comodidad y seguridad en un nivel superior al que actualmente poseen. Adicionalmente tendrá beneficios económicos para los diferentes entes gubernamentales encargados del mantenimiento de las redes viales del país, puesto que a largo plazo será requerido un menor número de intervenciones o reparaciones de estructuras de pavimento que presenten patologías por causa de adherencia entre las capas asfálticas.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la tasa de aplicación y el tipo de ligante bituminoso en la adherencia de capas asfálticas.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar la resistencia al esfuerzo cortante de la interfase adherida de las capas asfálticas mediante el ensayo LCB.
- Analizar la influencia de la tasa de aplicación y el tipo de ligante en la adherencia de las capas asfálticas.
- Proponer dosificaciones óptimas de las emulsiones asfálticas estudiadas dentro de su utilización como riegos de liga.
- Comparar teóricamente la vida a fatiga de estructuras de pavimento bajo los casos de adherencia parcial y total de las capas asfálticas.

5. Marco teórico

5.1. Adherencia entre capas asfálticas

Una de las principales propiedades que debe cumplir un pavimento en su estructura multicapa es la adherencia de las capas asfálticas que existan. Según la norma ASTM D907-15 que contiene la terminología estándar de adhesivos, la adherencia se define como “el estado en el cual dos superficies se mantienen unidas por fuerzas de interfase” (ASTM International, 2015), que para el caso de estudio las superficies están constituidas por mezclas asfálticas o concreto asfáltico. Adicionalmente, en la norma ASTM D8-17 sobre terminología estándar para materiales de carreteras y pavimentos se define un riego de adherencia como la aplicación de un material bituminoso sobre una superficie existente y relativamente no absorbente para proveer una unión total entre superficies antiguas y nuevas (ASTM International, 2017), en pavimentos flexibles el riego de adherencia se constituye en el encargado de asegurar que dos capas bituminosas se comporten mecánicamente como si sólo se tratase de una y es imperativo que esta condición exista ya que de no ser así la magnitud y ubicación de la deformación crítica será diferente (Figura 1), con lo cual el diseño no va a predecir correctamente el desempeño de la estructura y su duración se minimiza (Wheat, 2007).

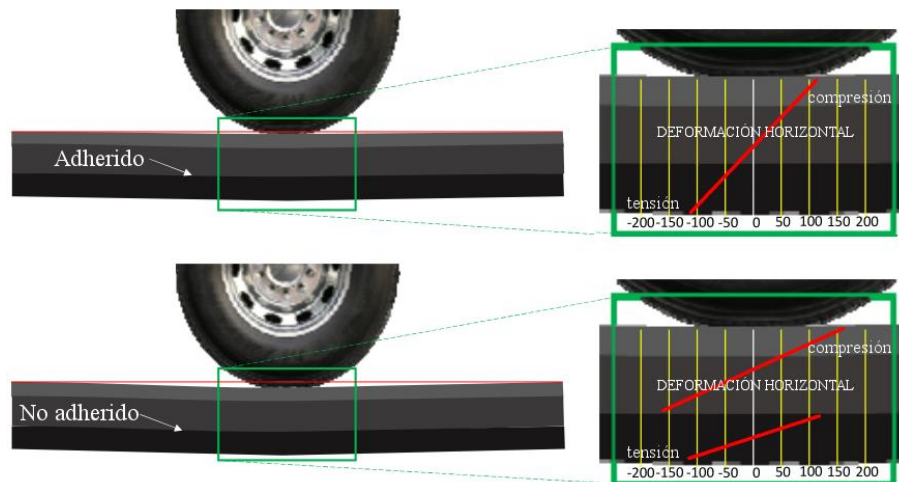


Figura 1. Consecuencias de la falta de adherencia entre capas.

Fuente: Kuennen, 2016.

La adherencia puede estudiarse con mayor profundidad haciendo énfasis en las razones o causas de la unión de las dos superficies: fuerzas de atracción fisicoquímica y fuerzas de entrelazado mecánico. Dentro del conjunto de capas bituminosas unidas en su interfase, el riego de liga es el

encargado de producir las fuerzas de atracción físico-química que ocurren por la composición química del asfalto; mientras que las fuerzas de entrelazado mecánico se desarrollan a partir de la rugosidad de las superficies involucradas en la unión, que a su vez se compone de la rugosidad de los agregados representada por la microtextura y de la rugosidad de la mezcla asfáltica cuyo parámetro es la macrotextura (Ricci, 2011).

Entre algunos de los términos importantes relacionados con el pavimento y los materiales que lo conforman se encuentra la macrotextura del pavimento, la cual se define en la norma ASTM E867-06 como “las desviaciones de la superficie de un pavimento respecto de una superficie completamente plana con dimensiones características de longitud de onda y amplitud desde 0.5 mm hasta valores que ya no afectan la interacción neumático-pavimento” (ASTM International, 2012). Este parámetro es de gran importancia ya que permite identificar el estado superficial de las capas bituminosas que se adhieren con el riego de liga y comprender posibles variaciones de la adherencia asociadas a componentes de fricción y trabamiento de la estructura mineral. La Figura 2 muestra la interfase producida entre dos mezclas asfálticas de gradación densa (MAGD) y entre una mezcla asfáltica porosa (MAP) y una densa. Se observa cómo en la primera interfase existe un área de contacto mayor entre las dos superficies, en comparación con la segunda interfase. De manera complementaria, se define en la misma norma la microtextura del pavimento como “las desviaciones de la superficie de un pavimento respecto de una superficie completamente plana con dimensiones características de longitud de onda y amplitud menores que 0.5 mm” (ASTM International, 2012), lo cual se traduce en el grado de aspereza que tienen los agregados en su superficie, siendo el número de caras fracturadas el parámetro que determina la existencia de esta condición.

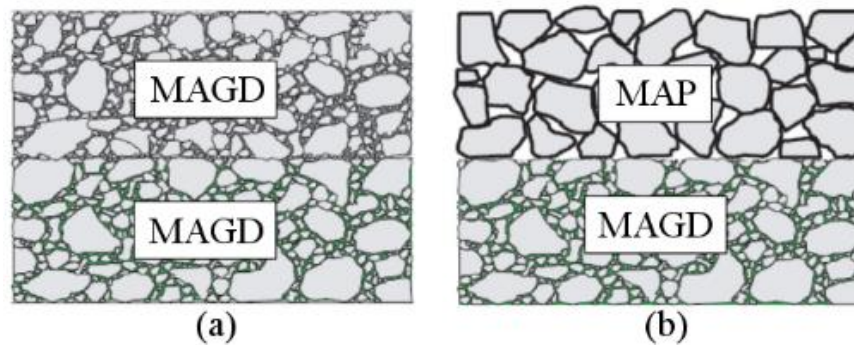


Figura 2. Interfase según tipos de mezcla de las capas: (a) densa – densa, (b) porosa – densa.
Fuente: Zhang, 2017.

5.2. Prácticas generales en riegos de liga

Una encuesta realizada por el Programa Cooperativo Nacional de Investigación en Carreteras de los Estados Unidos, NCHRP, programa a cargo de la Asociación Norteamericana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte, AASHTO, y administrado por la Junta de Investigación de Transporte, TRB, se llevó a cabo entre agosto del 2005 y enero del 2006 con la participación de la mayoría de los Departamentos de Transporte Estatales de los Estados Unidos, la Administración Federal de Carreteras del mismo país, FHWA, el Instituto Norteamericano del Asfalto, ingenieros de campo, contratistas y agencias de carreteras seleccionadas en Canadá, Europa y Suráfrica. El objetivo de este sondeo fue conocer las prácticas relacionadas con el riego de liga en el mundo, investigando los tipos de materiales empleados en los riegos, las tasas de aplicación residual y su variación respecto al tipo de superficie donde se aplica, métodos de distribución del riego y fallas en pavimentos relacionadas con el riego de liga (Mohammad, y otros, 2012). En cuanto a los tipos de materiales empleados como riego de liga, el sondeo indicó que la totalidad de las agencias consultadas registran la utilización de emulsiones asfálticas y en proporciones menores se encontraron el cemento asfáltico y asfalto líquido como lo muestra la Figura 3.

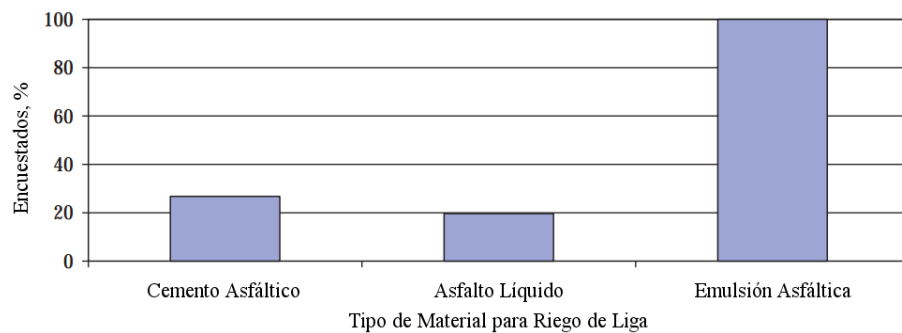


Figura 3. Tipos de material para riego de liga.

Fuente: Mohammad, y otros, 2012.

Aunque en esta encuesta no existió participación de Colombia ni de países latinoamericanos, es comúnmente conocido en el medio de la ingeniería colombiana que el único tipo de material permitido por la especificación como riego de liga es la emulsión asfáltica catiónica. Este hecho tiene correspondencia con los resultados obtenidos en otro sondeo realizado a nivel mundial en el año 1999, a cargo de la Federación Internacional de Emulsión Bituminosa, IBEF, que tuvo participación de países como España, Francia, Italia, Japón, Países Bajos, Reino Unido y los Estados Unidos. En este sondeo se reportó que las emulsiones catiónicas son el material de liga

más utilizado (West, Zhang, & Moore, 2005). A pesar de esto, en la encuesta del NCHRP apareció un hallazgo que contrasta con la especificación de rotura de la emulsión existente en la normatividad colombiana, la cual designa como CRR a la emulsión requerida para riegos de liga por tratarse de una emulsión catiónica de rotura rápida. El hallazgo fue que el tipo de emulsiones más comúnmente utilizadas son las de rotura lenta, SS por sus siglas en inglés (Slow Setting), como lo muestra la Figura 4.

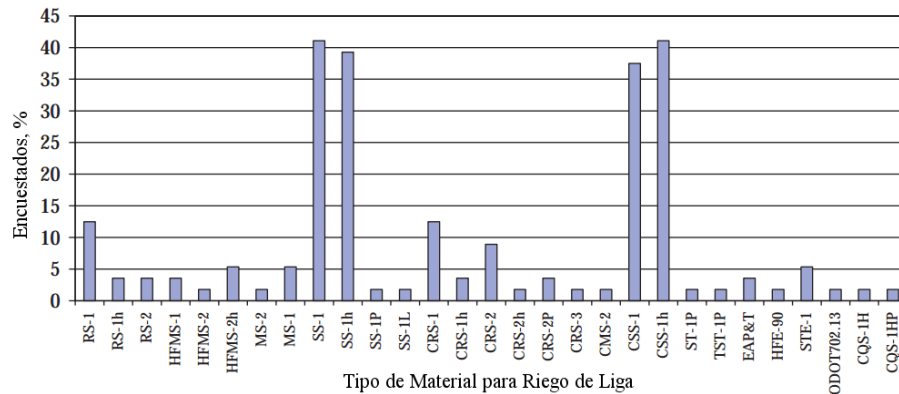


Figura 4. Emulsiones utilizadas como riego de liga.

Fuente: Mohammad, y otros, 2012.

Entre algunas de las ventajas que presentan las emulsiones de rotura lenta respecto a las de rotura rápida y que podrían explicar en parte su mayor uso está la posibilidad que tienen las primeras de ser diluidas, lo cual permite que el equipo de distribución que la contiene pueda moverse a una velocidad normal cuando se aplican pequeñas tasas de riego, esto por cargar un volumen más grande de la emulsión, además, las emulsiones diluidas pueden colocarse más fácilmente a temperatura ambiente con lo cual se obtiene una aplicación más uniforme (Tashman, Nam, & Papagiannakis, 2006).

En cuanto a los daños que se obtienen en los pavimentos flexibles por causa de incorrecto tipo o aplicación del riego de liga se han identificado principalmente algunos como la fisuración por deslizamiento de capas (Fotografía 1), que corresponde a fisuras en forma de semicírculo con curvaturas definidas en el sentido del frenado o aceleración de los vehículos, que ocurren esencialmente donde los vehículos pesados aceleran, frenan o giran; y el descascamiento (Fotografía 2), que denota el desprendimiento de parte de la capa asfáltica superficial sin afectación de las capas asfálticas subyacentes (Instituto Nacional de Vías, Universidad Nacional de

Colombia, 2006). Estos daños fueron a su vez los que en mayor número de agencias se reportaron dentro del sondeo del NCHRP, cuando se consultó sobre aquellos relacionados con tipo o aplicación inadecuada del riego de liga, con un 89% de los encuestados para deslizamiento y un 87% para descascaramiento. Otros daños reportados fueron fisuración por fatiga, fisuración top – down, ahuellamiento, entre otros (Mohammad, y otros, 2012).



Fotografía 1. Fisuración por deslizamiento de capas.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 2. Descascaramiento.
Fuente: Esta investigación.

A pesar de la importancia manifiesta que tiene el comportamiento monolítico de la estructura de pavimento, parece no ser una prioridad en las diferentes agencias viales y de transporte en el mundo comprobar el funcionamiento de los materiales colocados en la estructura de pavimento para alcanzar esta condición, prueba de ello es otro de los hallazgos del sondeo del NCHRP, el cual encontró que la inmensa mayoría de los encuestados, esto es un 92%, no llevan a cabo ningún tipo de ensayo de verificación de la adherencia entre las capas del pavimento (Mohammad, y otros, 2012).

5.3. Factores que inciden en la adherencia entre capas asfálticas

5.3.1. Tasa de aplicación del ligante

La dosificación, dotación, o tasa de aplicación del ligante se refiere a la cantidad gravimétrica o volumétrica de asfalto residual que debe aplicarse por unidad de superficie sobre la capa a ligar. El asfalto residual es aquel que debe permanecer sobre la superficie de la capa una vez se separe el agua de la fase asfáltica y se evapore. Existen diferentes condiciones superficiales de la capa donde se aplicará el riego, como es el caso de una capa nueva, una antigua o fresada, y en cada condición la dosificación del ligante debe ser distinta para lograr la adherencia entre las capas que

garantice una estructura monolítica (Mohammad, y otros, 2012). En Colombia el Artículo 421–13 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras precisa una cantidad de doscientos a trescientos gramos de ligante residual por metro cuadrado (200 a 300 g/m²) (Instituto Nacional de Vías, 2013), con lo cual se establece un rango de aplicación para *condiciones normales* como ahí se indica, sin embargo, no se menciona ningún parámetro cuantitativo o cualitativo para adoptar el valor definitivo a emplear.

El sondeo realizado por la Federación Internacional de Emulsión Bituminosa, IBEF, encontró que el contenido de asfalto residual para riegos de liga aplicados sobre capas asfálticas convencionales se encuentra entre los 0.02 y 0.09 gal/yd² (90 y 400 g/m²), además, el Instituto Norteamericano del Asfalto establece en las especificaciones para riego de liga una tasa de aplicación de ligante residual entre 0.02 y 0.05 gal/yd² (90 y 220 g/m²) (Mohammad, y otros, 2012). La Figura 5 muestra los resultados obtenidos en el estudio realizado por NCHRP para especímenes de laboratorio en condición limpia, seca, sin confinamiento y a 25°C, mostrando una variación significativa de la resistencia al corte de la interfase respecto a la dosificación y tipo de emulsión utilizada, aunque no fue posible encontrar una tasa óptima de aplicación.

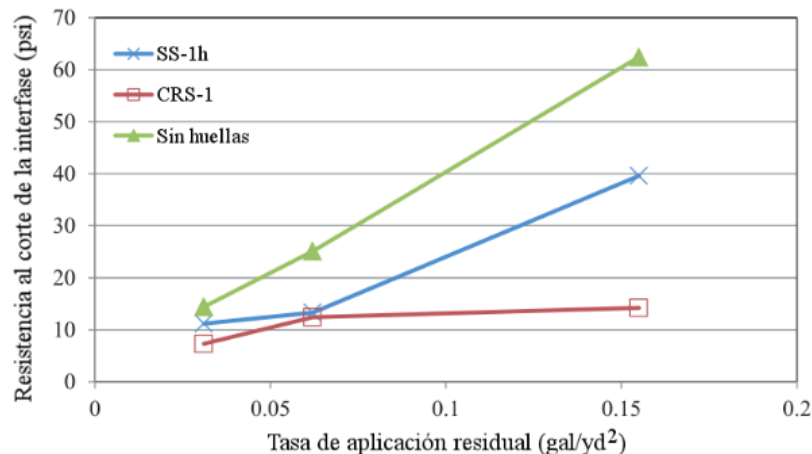


Figura 5. Variación de la resistencia al corte de la interfase con la tasa de aplicación residual.

Fuente: Mohammad, y otros, 2012.

Las tasas de aplicación más bajas se recomiendan para capas nuevas, valores intermedios son apropiados para pavimentos existentes con superficies relativamente lisas y los cercanos al límite superior son para pavimentos asfálticos envejecidos o fisurados y pavimentos de concreto

hidráulico. Los pavimentos que han sido fresados requieren una cantidad de ligante aún mayor debido a su mayor área de superficie específica (Mohammad, y otros, 2012).

Diversas investigaciones coinciden en afirmar que el exceso de riego de liga produce deslizamiento entre las capas y que la ausencia del mismo reduce cualquier respuesta mecánica de adhesividad, no obstante, algunos hallazgos particulares muestran que bajo ciertas condiciones puede existir una mayor adherencia sin la aplicación de un riego de liga, lo cual puede ser producido por una elevada temperatura de la mezcla asfáltica en el momento de su colocación, favoreciendo la adherencia generada por el bitumen propio de las mezclas; y por superficies de contacto con alto volumen de vacíos que desarrollan fricción por trabazón entre capas (Raposeiras, Castro-Fresno, Vega-Zamanillo, & Rodriguez-Hernandez, 2013).

5.3.2. Tipo de ligante bituminoso utilizado

Diversos estudios han concluido que el tipo de material utilizado como riego de liga es uno de los principales factores que influye en la capacidad de adherir las capas de un pavimento, ya que diferentes riegos de liga conducen a resistencias igualmente diferentes (Wang, Xiao, Chen, Li, & Amir Khanian, 2017). Dentro del grupo de las emulsiones asfálticas también es posible afirmar que según la afinidad eléctrica que presenten existe una variación en la resistencia al esfuerzo cortante de la interfase, usualmente se ha encontrado que las emulsiones catiónicas exhiben mayores resistencias y vidas a fatiga que otros tipos de emulsiones (Wang, Xiao, Chen, Li, & Amir Khanian, 2017).

Las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros muestran comportamientos diferentes a las emulsiones convencionales, ya que las modificadas pueden producir un sellado de la capa inferior y generar un elevado contenido de bitumen cerca a la interfase cuando se aplica en dosificaciones elevadas, esto se configura además en una reducción del contenido de vacíos que puede generar problemas en la capa de rodadura relacionados con las propiedades de fricción (Mohammad, y otros, 2012). No obstante, estas emulsiones modificadas incrementan la resistencia a la fisuración top-down del pavimento y disminuyen el esfuerzo transmitido en la interfase (Wang, Xiao, Chen, Li, & Amir Khanian, 2017).

Un estudio realizado por Bae y otros encontró que existe una relación entre la resistencia al esfuerzo cortante de la superficie de unión y el factor de ahuellamiento $G^*/\sin\delta$, el cual está ligado íntimamente al cemento asfáltico que tenga el riego de liga como base, por tal razón, sería conveniente llevar a cabo procesos de diseño en laboratorio que incluyan este parámetro para garantizar la utilización del más adecuado material bituminoso como riego de liga en campo junto con una tasa de aplicación óptima (como se cita en Wang, Xiao, Chen, Li, & Amirkhanian, 2017).

El riego de liga aplicado tiene una mayor influencia en capas de pequeños espesores, puesto que en estructuras de pavimento delgadas se han encontrado daños por fatiga para la mayoría de materiales y dosificaciones de riego, por lo cual valdría la pena garantizar un elevado grado de comportamiento monolítico de las capas; y por el contrario, en estructuras con mayores espesores se ha encontrado un comportamiento satisfactorio sin importar el grado de adherencia conseguido por el tipo y la dosificación del riego de liga (Raposeiras, Castro-Fresno, Vega-Zamanillo, & Rodriguez-Hernandez, 2013).

5.4. Estudios realizados sobre adherencia entre capas de mezcla asfáltica

Uzan, Livneh y Eshed en 1978 llevaron a cabo un estudio de las propiedades de adhesión de la interfase de capas asfálticas, empleando para ello un ensayo de corte de laboratorio y una mezcla asfáltica de 0.5 pulgadas, además de un ligante de penetración 60-70 el cual también se utilizó en el riego de liga aplicado (como se cita en Mohammad, y otros, 2012). Los ensayos se ejecutaron bajo dos temperaturas distintas y cinco tasas de aplicación del riego. La primera conclusión fue que la resistencia al corte de la interfase disminuyó con el aumento de la temperatura, la segunda conclusión fue que la resistencia al corte tuvo un pico en una tasa de aplicación óptima del riego de liga la cual depende de la temperatura del ensayo, por lo cual se propusieron tasas de 0.11 y 0.22 galones por yarda cuadrada (500 y 1000 g/m²) para 25°C y 55°C respectivamente (como se cita en Mohammad, y otros, 2012).

En Italia los investigadores Canestrari y Santagata utilizaron un dispositivo de ensayo de corte denominado ASTRA (Ancona Shear Testing Research and Analysis) para evaluar la resistencia adherente de la interfase (Figura 6) (como se cita en Mohammad, y otros, 2012). El objetivo del estudio fue conocer la influencia de diversas variables en el desempeño de los riegos de liga. Entre

las conclusiones se reportó que un incremento del esfuerzo normal causó un incremento en el esfuerzo cortante máximo; las muestras con riego de liga aplicado exhibieron esfuerzos cortantes de falla mayores que aquellas muestras sin riego en la interfase, para todas las temperaturas y niveles de esfuerzo; y un incremento de la resistencia al corte se observó como función de la disminución de la temperatura de ensayo (como se cita en Mohammad, y otros, 2012).

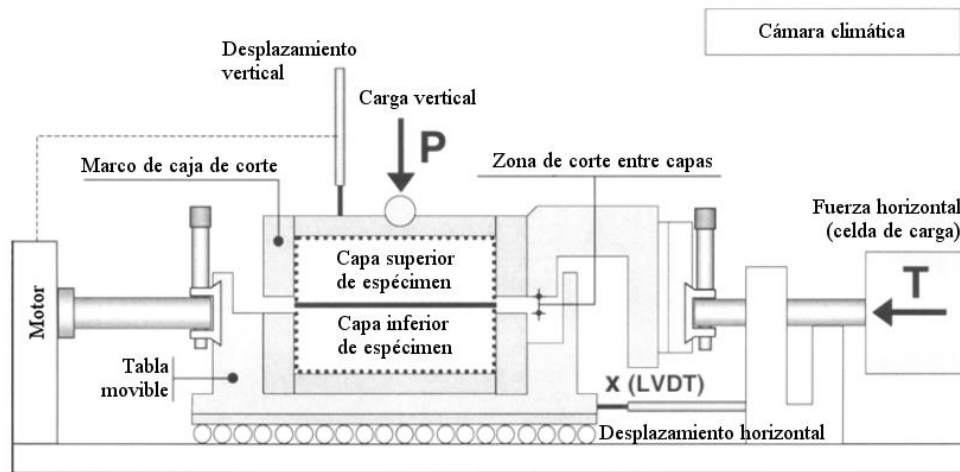


Figura 6. Dispositivo de corte ASTRA para evaluación de resistencia adherente.

Fuente: West, Zhang, & Moore, 2005.

Los investigadores Raab y Partl de Suiza en 2004 indagaron sobre el efecto de los riegos de adherencia en la adhesión de capas asfálticas con el ensayo de corte directo paralelo a la capa, LPDS (Figura 7 y Fotografía 3) (como se cita en Mohammad, y otros, 2012). Utilizaron 20 tipos diferentes de riegos de liga, condiciones superficiales lisa y rugosa, y también evaluaron la influencia de la humedad, el agua y la temperatura. Entre los resultados encontraron que todos los especímenes con superficies lisas experimentaron fuerzas de corte más altas que aquellos con superficies rugosas, debido a una mayor interfase de contacto entre las superficies lisas. Además, los hallazgos mostraron que la utilización de riegos de liga conduce a obtener mejores propiedades de adherencia cuando existen superficies húmedas (como se cita en Mohammad, y otros, 2012).

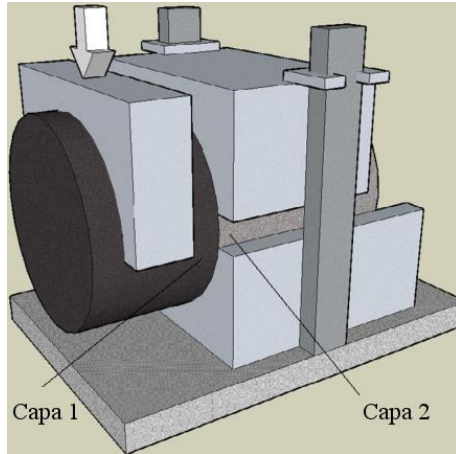


Figura 7. Esquema del ensayo LPDS.

Fuente: Raposeiras, Castro-Fresno, Vega-Zamanillo, & Rodríguez-Hernandez, 2013.



Fotografía 3. Dispositivo LPDS.

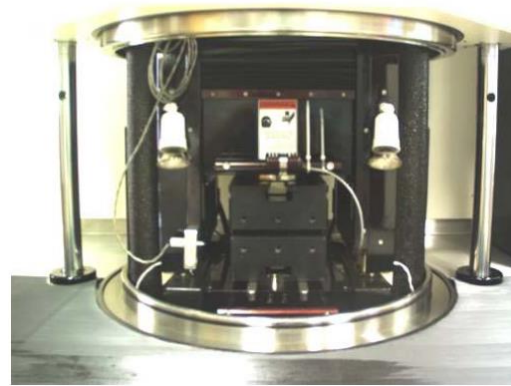
Fuente: West, Zhang, & Moore, 2005.

Los autores Mohammad, Raqib y Huang en 2002 evaluaron el efecto de la utilización de distintos tipos de material de riego de liga y su tasa de aplicación en la resistencia adherente de las capas bituminosas, empleando un dispositivo de corte directo en el Equipo de Corte Superpave (Fotografías 4 y 5) (como se cita en Tashman, Nam, & Papagiannakis, 2006). Se evaluaron cuatro emulsiones y dos cementos asfálticos con tasas de aplicación residual de 0.00, 0.02, 0.05, 0.10 y 0.20 gal/yd² (0, 90, 225, 450 y 900 g/m²), con temperaturas de ensayo de 25°C y 54°C. Los resultados indicaron que la tasa de aplicación óptima fue de 0.02 gal/yd² (90 g/m²), además, se encontró que aplicar ciertos tipos de materiales como riego ciertamente mejora la adherencia en la interfase de las dos capas asfálticas en comparación con la no aplicación de riego (como se cita en Tashman, Nam, & Papagiannakis, 2006).



Fotografía 4. Caja de corte con espécimen preparado.

Fuente: West, Zhang, & Moore, 2005.



Fotografía 5. Caja de corte en Equipo Superpave.

Fuente: West, Zhang, & Moore, 2005.

West y otros autores en el año 2005 desarrollaron el Ensayo de Resistencia de Adherencia del Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT) (Figura 8) con el cual ensayaron como riego un cemento asfáltico, una emulsión de rotura rápida y otra de rotura lenta, empleando tres tasas de aplicación residual de 0.02, 0.05 y 0.08 gal/yd² (90, 225 y 360 g/m²) y dos tipos de mezcla, una fina y otra gruesa (West, Zhang, & Moore, 2005). Las temperaturas de ensayo fueron de 10, 25 y 60°C. Una de las conclusiones fue que con el aumento de temperatura ocurrió una disminución de la resistencia adherente, otra conclusión fue que para las tasas de aplicación estudiadas en la mezcla fina las tasas más bajas proporcionaron mejor adherencia, sin embargo, en la mezcla gruesa la adherencia no varió significativamente con la tasa de aplicación (West, Zhang, & Moore, 2005).

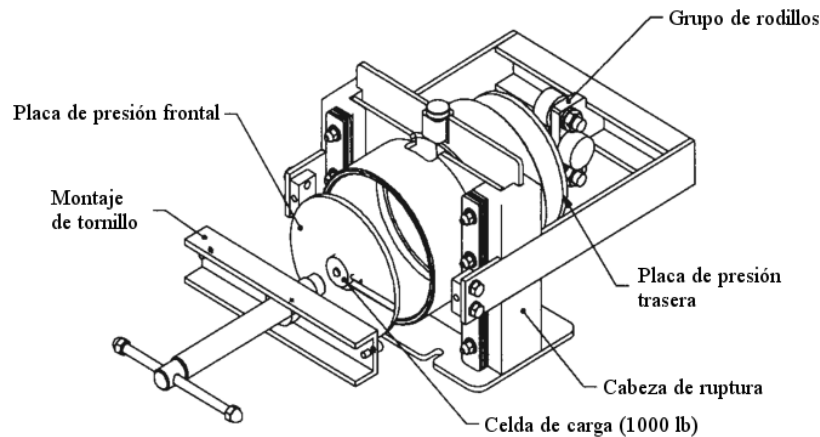


Figura 8. Esquema del dispositivo de resistencia adherente del NCAT.

Fuente: West, Zhang, & Moore, 2005.

5.5. Caracterización de la adherencia mediante ensayo LCB

En el mundo no existe ningún método de ensayo que sea ampliamente aceptado por las agencias de transporte y comunidad científica para medir el grado de adherencia entre las capas del pavimento, por tal razón, existen diversos procedimientos y equipos desarrollados para la consecución de tal objetivo y según el tipo de sollicitación aplicada sobre el espécimen se dividen en ensayos de tracción, corte y torsión. La falla del pavimento en su interfase adherida se atribuye principalmente a sollicitaciones de corte y tracción las cuales ocurren por cizallamiento entre las capas bituminosas y separación de las mismas como lo muestra la Figura 9.

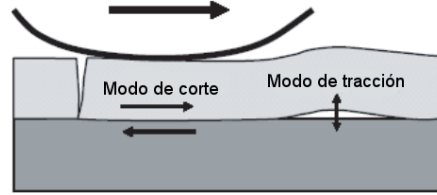


Figura 9. Modos de deterioro en la interfase del pavimento bajo condiciones de servicio.
Fuente: Mohammad y otros, 2012.

5.5.1. Descripción del ensayo de corte LCB

El ensayo de corte LCB fue desarrollado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña, en Barcelona, España, con el fin de medir de manera simplificada la resistencia a las tensiones tangenciales producidas por una fuerza cortante en la interfase de dos capas bituminosas, que pueden o no adherirse con un riego de liga. Este ensayo consiste en generar un esfuerzo cortante en la superficie de unión de las capas que produzca la separación de las mismas, empleando para ello una disposición del espécimen como viga con dos apoyos, con la superficie de unión muy próxima a uno de los puntos de apoyo para garantizar que en esta zona el momento flector sea de muy pequeña magnitud y únicamente exista fuerza cortante (Miró, Martínez, & Pérez, 2005). En la Figura 10 se muestra el análisis de las fuerzas producidas en el ensayo LCB que sustentan su utilización.

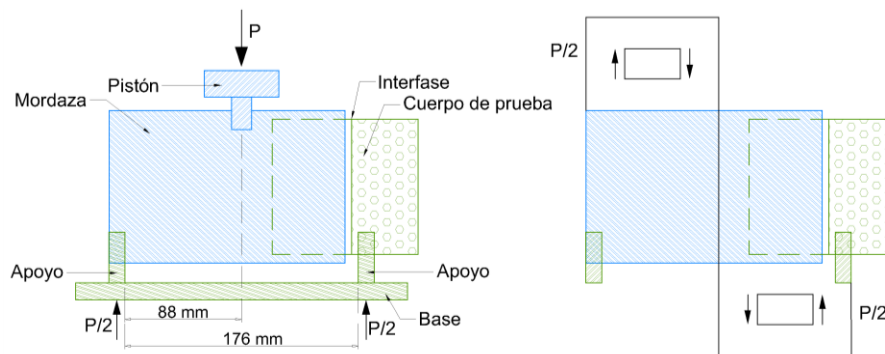


Figura 10. Diagrama de fuerzas actuando sobre el espécimen en el ensayo LCB.
Fuente: Miró, Martínez, & Pérez, Assessing heat-adhesive emulsions for tack coats, 2005.

La resistencia al esfuerzo cortante que desarrolla la interfase adherida de las dos capas queda definida de la siguiente forma (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2008):

$$REC = (P/2)/S \quad (1)$$

Donde,

- REC = Resistencia al esfuerzo cortante, N/mm² o MPa
 P = Carga máxima de rotura, N
 S = Superficie de la sección transversal, mm²

Este ensayo puede ser utilizado en especímenes fabricados en laboratorio, así como en testigos obtenidos de pavimentos ya construidos. En el primer caso el objetivo puede ser el estudio de la influencia de las diferentes variables involucradas en la adherencia de capas asfálticas, mientras que en el segundo caso se emplearía en control de calidad de la adherencia producida.

5.5.2. Variabilidad del ensayo LCB

La variabilidad o dispersión de los resultados obtenidos en la aplicación del ensayo LCB fue ampliamente estudiada por los autores del mismo, teniendo en cuenta diferentes condiciones para el ensayo como el tipo de emulsión utilizada, temperatura, rotura en seco o después de inmersión, entre otras (Miró, Martínez, & Pérez, 2005). En la Figura 11 se observan los intervalos de confianza del 95% para distintos resultados de resistencia obtenidos con el ensayo al aplicarse sobre especímenes de laboratorio, los cuales fueron obtenidos a partir de la media aritmética, \bar{x} , y la desviación estándar, s ($\bar{x} \pm 1.96 s$) de un total de tres resultados individuales (Miró, Martínez, & Pérez, 2005).

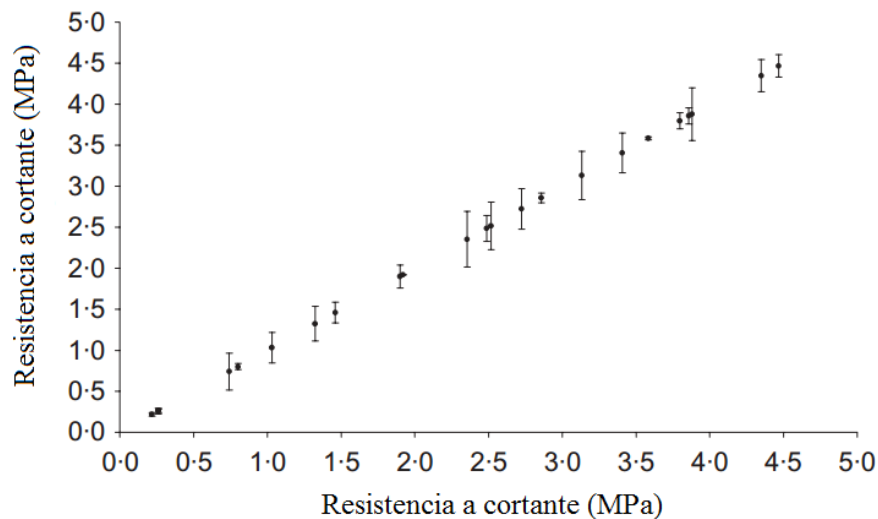


Figura 11. Intervalos de confianza al 95% para diferentes niveles de resistencia al corte.

Fuente: Miró, Martínez, & Pérez, 2005.

En este estudio de variabilidad se encontraron coeficientes de variación entre 1% y 9%, valores que se pueden considerar como bajos y que denotan un buen grado de agrupación de los resultados obtenidos para tres especímenes de laboratorio (Miró, Martínez, & Pérez, 2005).

5.6. Modelación de la interfase

Uno de los principales modelos existentes para representar las condiciones de la interfase y su efecto en la respuesta del pavimento es de tipo lineal y asume la interfase como una capa de espesor finito 'h' en la cual un esfuerzo cortante ' τ ' es aplicado (Figura 12) (Roque, Hernando, Park, Zou, & Waisome, 2017).

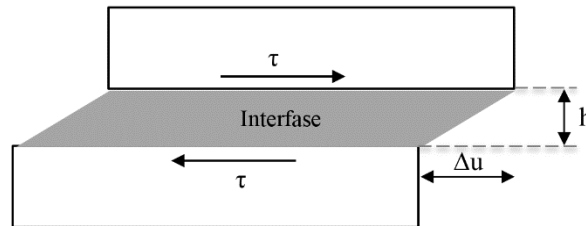


Figura 12. Esquema de desplazamiento relativo (Δu) entre dos superficies adheridas.

Fuente: Roque, Hernando, Park, Zou, & Waisome, 2017.

La relación entre esfuerzo cortante ' τ ' y la deformación tangencial ' γ ' para un material elástico es de la siguiente forma (Roque, Hernando, Park, Zou, & Waisome, 2017):

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2)$$

Donde G es el módulo de corte del material de la interfase. Para pequeños desplazamientos la deformación tangencial se define así:

$$\gamma = \frac{\Delta u}{h} \quad (3)$$

Siendo ' Δu ' el desplazamiento relativo entre los dos costados de la interfase y ' h ' el espesor de la interfase. Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (2) se obtiene:

$$\tau = G \cdot \frac{\Delta u}{h} = K \cdot \Delta u \quad (4)$$

Donde 'K' se define como el módulo de reacción cortante de la interfase (Roque, Hernando, Park, Zou, & Waisome, 2017).

En el programa elástico lineal multicapa BISAR (Bitumen Stress Analysis in Roads) desarrollado por Shell, la interfase entre dos capas de pavimento está representada por una capa infinitamente delgada cuya resistencia se define con un parámetro llamado elasticidad de corte 'AK' (shear spring compliance), el cual describe el desplazamiento horizontal inducido por esfuerzos cortantes en la interfase, de la siguiente forma (Roque, Hernando, Park, Zou, & Waisome, 2017):

$$AK = \frac{\text{Desplazamiento horizontal relativo}}{\text{Esfuerzo cortante de la interfase}} = \frac{\Delta u}{\tau} \quad (5)$$

Obsérvese que la elasticidad de corte 'AK' es inversa al módulo de reacción cortante 'K'.

A partir del anterior parámetro también es posible obtener el coeficiente de deslizamiento 'α' cuyos valores oscilan entre 0 (adherencia completa) y 1 (deslizamiento completo). Se define de la siguiente forma (Roque, Hernando, Park, Zou, & Waisome, 2017):

$$\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1 + \nu}{E} \cdot a} \quad (6)$$

Donde,

- E : Módulo de elasticidad de la capa superior a la interfase, Pa
- ν : Relación de Poisson de la capa superior a la interfase
- AK : Elasticidad de corte, m³/N
- a : Radio del área cargada, m

6. Metodología

6.1. Materiales utilizados

Los materiales que fueron empleados en el desarrollo de la investigación están relacionados con las capas de mezcla asfáltica en caliente y con el ligante bituminoso que actúa como riego de liga entre ellas. Por tal motivo, se llevó a cabo la consecución y acopio del cemento asfáltico, agregado pétreo y emulsión asfáltica convencional y modificada con el fin de elaborar en laboratorio los especímenes de prueba requeridos para el estudio. Todas las características fundamentales de cada uno de estos insumos y su concordancia con lo exigido por las especificaciones actuales del Instituto Nacional de Vías son garantizadas por los proveedores de dichos insumos.

6.1.1. Agregado pétreo

El agregado pétreo está conformado por una mezcla de cuatro tipos distintos de material de trituración denominados de la siguiente forma: pasante 3/4" y retenido 1/2" del río Guáitara, pasante 3/4" y retenido 1/2" del río Téllez, pasante 1/2" del río Guáitara y pasante 1/2" del río Téllez. Las proporciones de cada uno en la mezcla fueron 10%, 21%, 9% y 60% respectivamente. El material conformado presenta la distribución de tamaños de las partículas que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.

Tamiz (in)	Tamiz (mm)	Fracción pasante (%)	Puntos de control INV Art. 450 (%)	
			Superior	Inferior
3/4	19.00	100.00	100	100
1/2	12.50	84.67	95	80
3/8	9.50	77.02	88	70
N.º 4	4.75	60.02	65	49
N.º 10	2.00	43.35	45	29
N.º 40	0.425	17.34	25	14
N.º 80	0.180	9.12	17	8
N.º 200	0.075	5.26	8	4

Lo anterior se puede observar gráficamente en la Figura 13.

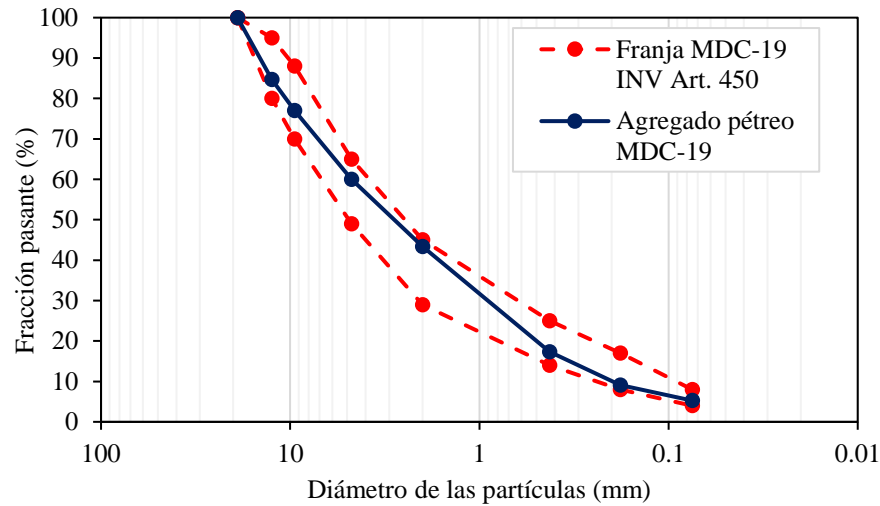


Figura 13. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.

Fuente: Esta investigación.

Teniendo en cuenta la granulometría del material se puede observar que está constituido en un 40% por gravas, 55% por arenas y 5% por llenante mineral. Adicionalmente se encontró un coeficiente de uniformidad $c_u = 23.8$ y un coeficiente de curvatura $c_c = 0.9$, con lo cual se clasifica como una arena pobremente gradada SP-SM o A-1-a (0). No obstante, se observa que la granulometría del agregado se encuentra dentro de la franja de control permitida por las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías para una mezcla densa en caliente MDC-19.

Es fundamental conocer las propiedades de dureza, durabilidad, limpieza, geometría, adhesividad y relaciones de masa y volumen del agregado mineral. Tales propiedades se muestran en la Tabla 2 junto con el requisito correspondiente de la Especificación INV Art. 450.

Tabla 2. Resultados de caracterización de agregado mineral.

Propiedad	Norma de ensayo INV	Resultado	Unidad	Requisito
Desgaste L.A.				
500 revoluciones	E-218	22	%	≤ 25
100 revoluciones		4	%	≤ 5
Abrasión Micro-Deval	E-238	12.0	%	≤ 20
Resistencia 10% finos				
Valor en seco	E-224	200	kN	≥ 110
Relación húmedo/seco		85	%	≥ 75
Solidez en sulfato de magnesio	E-220	Grueso: 4 Fino: 7	%	≤ 18
Impurezas en agregado grueso	E-237	0.3	%	≤ 0.5
Índice de plasticidad	E-125 y E-126	NP	–	NP
Equivalente de arena	E-133	63	%	≥ 50
Azul de metileno	E-235	N/A	–	≤ 10
Partículas planas y alargadas	E-240	2	%	≤ 10
Caras fracturadas				
Una cara	E-227	87	%	≥ 85
Dos caras		80	%	≥ 70
Angulosidad de la fracción fina	E-239	48.2	%	≥ 45
Adhesividad				
Agregado fino	E-774	8	–	≥ 4
Gravedad específica aparente				
Agregado grueso	E-223	2.75	–	–
Agregado fino	E-222	2.78	–	–
Absorción				
Agregado grueso	E-223	2.2	%	–
Agregado fino	E-222	2.2	%	–

6.1.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico seleccionado en la investigación es de tipo 60/70 (grados de penetración en décimas de milímetro) de la refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL, el cual se adiciona en una proporción de 5.4% en masa total de la mezcla según el diseño Marshall. Además, según la variación de la viscosidad del cemento asfáltico en función de la temperatura, para llevar a cabo la mezcla con los agregados pétreos la temperatura es de $149\pm 1^\circ\text{C}$ y la de compactación en laboratorio es de $139\pm 1^\circ\text{C}$. Entre los ensayos de caracterización realizados a este material se

destaca la curva reológica (Figura 14). En la Tabla 3 se presentan los resultados de los ensayos de caracterización.

Tabla 3. Resultados de caracterización de cemento asfáltico.

Propiedad	Norma de ensayo	Resultado	Unidad	Requisito
Viscosidad a 60°C	ASTM D 4402	242000	cP	Reportar
Viscosidad a 80°C	ASTM D 4402	20375	cP	Reportar
Viscosidad a 100°C	ASTM D 4402	3450	cP	Reportar
Viscosidad a 135°C	ASTM D 4402	355	cP	Reportar
Viscosidad a 150°C	ASTM D 4402	176.1	cP	Reportar
Ductilidad	INV E-702-13	140	cm	≥ 100
Gravedad API	ASTM D 4052	6.9	Grados API	Reportar
Densidad a 15°C	ASTM D 4052	1021.7	kg/m ³	Reportar
Penetración 25°C	INV E-706-13	64	0.1 mm	60 – 70
Índice de penetración	-	-7		Reportar
Pérdida de masa (RTFOT)	INV E-720-13	0.329	g/100g	≤ 1.0
Punto ablandamiento	INV E-712-13	49.4	°C	45 – 55
Punto de inflamación	ASTM D 92	276	°C	≥ 232
Solubilidad en tricloroetileno	INV E-713-13	99.9	%	≥ 99

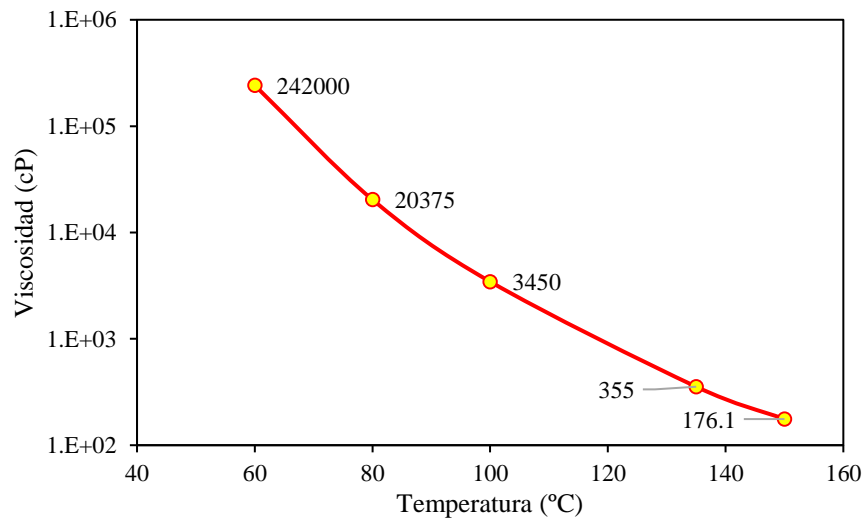


Figura 14. Curva reológica del cemento asfáltico.

Fuente: Esta investigación.

6.1.3. Mezcla asfáltica

El tipo de mezcla asfáltica que conforma las dos capas adheridas es una mezcla densa en caliente tipo MDC-19, cuyas proporciones se obtuvieron a partir del diseño suministrado por la empresa Panavías Ingeniería y Construcciones S.A. ubicada en la ciudad de Pasto, Departamento de Nariño. La cantidad de mezcla necesaria para fabricar los cuerpos de prueba se dosifica previamente en laboratorio mediante el tamizado, secado y pesaje del agregado pétreo requerido por la granulometría (Fotografías 6 a 8), junto con un calentamiento de este material en un horno termostático a una temperatura de 160°C (11°C por encima de la temperatura de mezcla del ligante).



Fotografía 6. Tamización de agregado pétreo.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 7. Pesaje de agregado pétreo.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 8. Distribución de cantidades de agregado.
Fuente: Esta investigación.

El cemento asfáltico se calienta a la temperatura de 149°C apropiada para mezcla, y posteriormente se adiciona a los agregados pétreos en la proporción adecuada según el diseño Marshall (Fotografía 9). Una vez obtenida la mezcla asfáltica con la homogeneidad adecuada, es decir garantizando el recubrimiento total de todas las partículas y agregado pétreo con el asfalto (Fotografía 10), se deja

enfriar hasta que la mezcla asfáltica adquiriera la temperatura de compactación, es decir la temperatura de 139°C para proceder a la compactación (Fotografía 11).



Fotografía 9. Adición de cemento asfáltico.

Fuente: Esta investigación.



Fotografía 10. Mezclado homogéneo con agregado.

Fuente: Esta investigación.



Fotografía 11. Compactación de capa inferior en molde Marshall.

Fuente: Esta investigación.

6.1.4. Riego de liga

En el desarrollo del presente trabajo se emplearon dos tipos de ligantes bituminosos como riego de liga, a saber, una emulsión catiónica de rotura lenta CRL-1 y una emulsión catiónica de rotura lenta modificada con polímeros CRL-1hm (Fotografías 12 a 14).



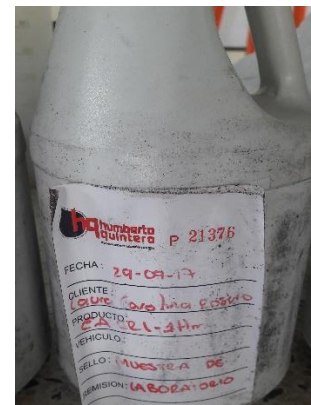
Fotografía 12. Conjunto de emulsiones adquiridas.

Fuente: Esta investigación.



Fotografía 13. Emulsión catiónica de rotura lenta (CRL-1).

Fuente: Esta investigación.



Fotografía 14. Emulsión catiónica de rotura lenta modificada con polímeros (CRL-1hm).

Fuente: Esta investigación.

Los resultados de caracterización de las dos emulsiones suministradas por la empresa Humberto Quintero O y Cía. SCA, se encuentran consignados en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Caracterización de emulsión asfáltica convencional CRL-1.

Propiedad	Norma de ensayo INV	Resultado	Unidad	Requisito INV Art. 411-13
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	E-763	27.67	s	20 – 200
Contenido volumétrico de agua	E-761	38.52	%	≤ 43
Estabilidad en almacenamiento (24 horas)	E-764	0.9	%	≤ 1
Sedimentación a los 5 días		4.53	%	≤ 5
Destilación				
Contenido de asfalto residual	E-762	60.13	%	≥ 57
Contenido de disolventes		0.0	%	-
Tamizado				
Retenido tamiz n.º 20	E-765	0.0270	%	≤ 0.10
pH	E-768	2.43		≤ 6
Ensayos sobre residuo de destilación				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	E-706	64.7	0.1 mm	60 – 100
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	E-702	>100	cm	≥ 40
Solubilidad en tricloroetileno	E-713	99.99	%	≥ 97.5

Tabla 5. Caracterización de emulsión asfáltica modificada CRL-1hm.

Propiedad	Norma de ensayo INV	Resultado	Unidad	Requisito INV Art. 415-13
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	E-763	27.80	s	≤ 100
Contenido volumétrico de agua	E-761	38.89	%	≤ 43
Estabilidad en almacenamiento (24 horas)	E-764	0.87	%	≤ 1
Sedimentación a los 5 días		2.23	%	≤ 5
Destilación				
Contenido de asfalto residual	E-762	61.11	%	≥ 57
Contenido de disolventes		0.0	%	0
Tamizado				
Retenido tamiz n.º 20	E-765	0.0971	%	≤ 0.10
pH	E-768	1.93		≤ 6
Ensayos sobre residuo de destilación				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	E-706	68.9	0.1 mm	60 – 100
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	E-712	63.1	°C	≥ 55
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	E-702	>100	cm	≥ 10
Recuperación elástica por torsión 25°C	E-713	20	%	≥ 12

6.2. Elaboración de cuerpos de prueba

El cuerpo de prueba para determinar la resistencia al corte de la interfase adherida de las capas asfálticas consistió en un espécimen con forma cilíndrica, cuyas dimensiones fueron 101.6 milímetros de diámetro (4 pulgadas) y 11 centímetros de altura. El elemento estaba constituido por dos capas de mezcla asfáltica cuyos espesores fueron de 6 y 5 centímetros, adheridas en su superficie de contacto por un riego de adherencia bituminoso. La primera capa de 6 centímetros fue compactada en el molde Marshall empleando el martillo de impactos estándar de este método, con una energía de compactación específica igual a la establecida en la norma española NLT-382/08 “Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte” que corresponde a $34\,928\text{ lb}\cdot\text{ft}/\text{ft}^3$, la cual se desarrolla de manera equivalente para la primera capa con una cantidad de 60 golpes por cara (Fotografía 15). Una vez ha enfriado esta primera capa del espécimen, se procede a la aplicación de la emulsión asfáltica en la dotación que se haya escogido (Fotografía 16) y se dejó en un horno a una temperatura comprendida entre 20 y 25°C por un tiempo de 24 horas, con el fin de asegurar la rotura y evaporación total del agua presente en la dispersión (Fotografía 17).



Fotografía 15. Compactación primera capa de especímenes de prueba.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 16. Aplicación de riego de liga.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 17. Especímenes en cámara termostática.
Fuente: Esta investigación.

Para llevar a cabo la aplicación de la emulsión como riego de liga en cada una de las muestras se tuvo en cuenta que el diámetro de los cuerpos de prueba es de 101.6 mm y que el contenido de asfalto residual de los riegos es de 60% para la emulsión CRL-1 (Tabla 4) y 61% para la emulsión CRL-1hm (Tabla 5). Así pues, las tasas de emulsión aplicadas para lograr la dotación de asfalto residual deseada se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Relación entre asfalto residual y emulsión por aplicar.

Asfalto residual (g/m ²)	100	200	300	400	500
Emulsión CRL-1 (g)	1.3	2.7	4.0	5.3	6.7
Emulsión CRL-1hm (g)	1.3	2.6	3.9	5.3	6.6

Para la segunda capa, se empleó el molde de especímenes para resistencia a la compresión simple de mezclas asfálticas (Fotografía 18), que con su forma cilíndrica, igual diámetro y altura de 17.78 cm (7 pulgadas), permite encofrar la primera capa del espécimen con el asfalto residual de la emulsión y compactar sobre ella la segunda capa de mezcla bituminosa de 5 centímetros, con una energía de compactación específica igual a la establecida en la norma NLT-382/08 y que por ser posible su compactación solamente por una cara, se desarrolló con una cantidad de 100 golpes. Después del enfriamiento del conjunto bicapa de mezcla asfáltica adherida con emulsión preparado de esta forma, se obtuvo el espécimen de prueba para estudio de la adherencia (Fotografía 19).

**Fotografía 18. Moldes para compactación de segunda capa.**

Fuente: Esta investigación.

**Fotografía 19. Especímenes de prueba fabricados.**

Fuente: Esta investigación.

6.3. Descripción del equipo y ejecución del ensayo de adherencia

El equipo de corte es el descrito como “Dispositivo B” en la norma española NLT 382/08 “Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte”, también denominado por sus desarrolladores como “Ensayo de corte LCB”. Este dispositivo se compone de una mordaza cilíndrica desmontable en dos mitades según un plano que corte a dos generatrices opuestas, en cuyo interior se coloca el cuerpo de prueba cilíndrico fabricado a partir de las dos capas de mezcla bituminosa adheridas (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2008). El diámetro interior de la mordaza es de 101.6 milímetros (4 pulgadas), su altura es de 177.8

milímetros (7 pulgadas) y presenta además un montaje de platinas y tornillos para encofrar firmemente el cuerpo de prueba. Un segundo elemento del equipo es la base metálica con apoyos ubicados a 188 milímetros de separación.

La temperatura del ensayo se estableció teniendo en cuenta la temperatura media anual del Municipio de San Juan de Pasto en el Departamento de Nariño, ya que éste es el lugar de utilización de los materiales de análisis y aplicación del presente estudio. Dicha temperatura se obtuvo a partir de la altitud media de la ciudad y haciendo uso de la siguiente expresión (Sánchez & Campagnoli, 2016):

$$T = 30 - \frac{6.3H}{1000} \quad (7)$$

Siendo,

- T = Temperatura media anual, °C
 H = Altura sobre el nivel del mar, m

Dado que la altitud media es de 2527 msnm (Alcaldía de Pasto, s.f.) se tiene lo siguiente:

$$T = 30 - \frac{6.3 \times 2527}{1000} = 14.1^{\circ}C = 57.4^{\circ}F$$

Con este resultado es posible calcular la temperatura media de la mezcla asfáltica con la siguiente expresión (Huang, 2004):

$$M_p = M_a \left(1 + \frac{1}{z + 4} \right) - \frac{34}{z + 4} + 6 \quad (8)$$

Siendo,

- M_p = Temperatura media de la mezcla, °F
 M_a = Temperatura media ponderada del aire, °F
 z = Profundidad bajo la superficie, pulgadas

Entonces la temperatura de la mezcla a la profundidad de 50 mm es:

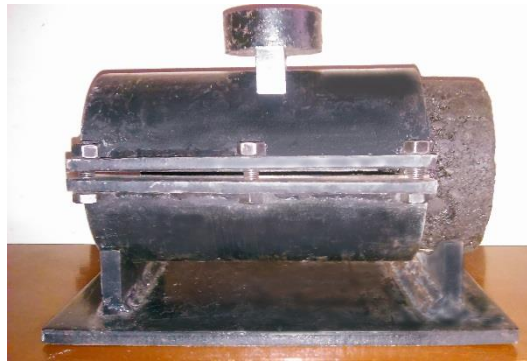
$$M_p = 57.4 \left(1 + \frac{1}{50/25.4 + 4} \right) - \frac{34}{50/25.4 + 4} + 6 = 67.3^{\circ}F = 19.6^{\circ}C \approx 20^{\circ}C$$

Teniendo en cuenta lo anterior y dado que la temperatura de los materiales que conforman la superficie de unión y la mezcla asfáltica es un factor importante en la adherencia que se produce (Raposeiras, Castro-Fresno, Vega-Zamanillo, & Rodriguez-Hernandez, 2013), los especímenes de prueba fueron acondicionados en una cámara termostática regulada a 20°C por 3 horas, antes de proceder con el ensayo (Fotografía 20).



Fotografía 20. Acondicionamiento de especímenes de prueba en cámara termostática.
Fuente: Esta investigación.

La disposición del cuerpo de prueba debe ser tal que la segunda capa quede por fuera de la mordaza sustentándose en uno de los apoyos y la interfase de las capas se ubique a 5 milímetros del borde de la mordaza y a 5 milímetros del borde del apoyo, descansando el otro extremo de la mordaza sobre el segundo apoyo. La razón de la separación entre la junta y el apoyo es que ésta debe ser lo suficientemente grande para compensar la falta de ortogonalidad del plano de la junta respecto al eje en el caso de testigos, y a su vez, debe ser pequeña para que no se produzca momento flector en la interfase. Además, debe colocarse el conjunto de cuerpo de prueba y mordaza metálica en posición horizontal sobre la base (Fotografía 21). Una vez conseguido este arreglo en los elementos, se prosigue con la aplicación de carga en un punto sobre la mordaza que se encuentre equidistante de cada uno de los apoyos de la base (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2008).



Fotografía 21. Dispositivo de ensayo y cuerpo de prueba.

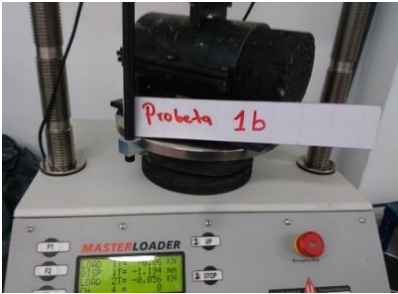
Fuente: Esta investigación.

Para la aplicación de carga se empleó una prensa Humboldt tipo marco digital de prueba a compresión serie HM-3000 (Fotografía 22) cuyo pistón avanza verticalmente hacia abajo sobre la mordaza a una velocidad constante de desplazamiento de 1.27 milímetros por minuto (0.05 pulgadas por minuto) que corresponde a la velocidad del ensayo de CBR y que en general es una velocidad baja que permite apreciar mejor los efectos de la adherencia. De esta forma se procedió hasta lograr la falla en la superficie de unión del cuerpo de prueba (Fotografías 23 a 25). La fuerza máxima de rotura es el parámetro que se estableció para caracterizar la adherencia desarrollada por la superficie de unión y a partir de éste la resistencia al esfuerzo cortante.



Fotografía 22. Prensa de carga HM-3000.

Fuente: Esta investigación.



Fotografía 23. Inicio de prueba de carga.

Fuente: Esta investigación.



Fotografía 24. Finalización de prueba de carga.

Fuente: Esta investigación.



Fotografía 25. Espécimen separado por su interfase.

Fuente: Esta investigación.

6.4. Análisis teórico de la adherencia de las capas asfálticas en la vida a fatiga del pavimento

Muchos de los métodos actuales de análisis de pavimentos se basan en el supuesto de la existencia de un comportamiento continuo, homogéneo, isotrópico y linealmente elástico de los materiales que conforman las capas del pavimento y además asumen que se desarrolla una adherencia completa entre las capas, lo cual las obligaría a actuar de manera monolítica ante las solicitaciones. Sin embargo, en la realidad los materiales se comportan de una forma muy distinta y en el caso de la superficie de unión de las capas bituminosas solo existe un grado parcial de adherencia que es capaz de proporcionar el riego de liga, por tal motivo, es de gran importancia garantizar eficiencia en la aplicación de un riego para que la adherencia conseguida sea la óptima y la más cercana a la condición monolítica. También es importante asegurar una buena unión de las capas para que agentes como el agua no puedan ingresar y quedar atrapados en la interfase, lo cual causaría deterioros adicionales (Khweir & Fordyce, 2002).

Con el fin de evaluar la influencia de la adherencia parcial de las capas asfálticas en la vida a fatiga de las mismas se llevó a cabo una comparación teórica de la cantidad de repeticiones admisibles de carga en estructuras con capas completamente adheridas y en estructuras con capas asfálticas parcialmente adheridas, partiendo del cálculo de las deformaciones horizontales por tracción en las fibras inferiores y su transferencia hacia repeticiones admisibles mediante la ley de fatiga del Instituto Norteamericano del Asfalto. El parámetro que permite estudiar la adherencia parcial es la elasticidad de corte (shear spring compliance) que existe como parámetro de entrada en el software BISAR 3.0.

6.4.1. Estructuras de pavimento estudiadas

El Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito del año de 1998 presenta en el capítulo 8 un catálogo de estructuras de pavimento según regiones climáticas, categorías de tránsito y categorías de subrasante (Tablas 7, 8 y 9 respectivamente). Por haber sido estudiados materiales originados en el Departamento de Nariño y de frecuente utilización en la ciudad de Pasto, se optó por establecer las características de esta ciudad para escoger la región climática. De tal forma, ya que la temperatura media anual según el resultado del numeral 6.3 es de 14.1°C y la precipitación media anual es menor a 2000 mm (IDEAM, 2014) se obtuvo la región climática R2. Dicha categoría establece la utilización de la carta de diseño N°2 que contiene diferentes estructuras para categorías de tránsito T1 a T9 y categorías de subrasante S1 a S5, de las cuales se seleccionaron aleatoriamente 8 estructuras con carpeta asfáltica de 10 cm, 8 estructuras con carpeta asfáltica de 12 cm y 8 estructuras con carpeta asfáltica de 15 cm, todas con capas de material granular no modificado. Las estructuras escogidas se muestran en la Tabla 10.

El módulo resiliente de la subrasante se estableció como el límite inferior del rango establecido en las diferentes categorías de subrasante.

Tabla 7. Regiones climáticas establecidas en el manual de diseño INVIAS.

Fuente: Instituto Nacional de Vías, 1998.

Región	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Temperatura media (°C)	< 13	13–20	20–30	13–20	20–30	20–30
Precipitación media (mm/año)	< 2000	< 2000	< 2000	2000–4000	2000–4000	> 4000

Tabla 8. Categorías de tránsito establecidas en el manual de diseño INVIAS.

Fuente: Instituto Nacional de Vías, 1998.

Categoría	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Ejes equivalentes ($\times 10^6$)	0.5–1	1–2	2–4	4–6	6–10	10–15	15–20	20–30	30–40

Tabla 9. Categorías de subrasante establecidas en el manual de diseño INVIAS.

Fuente: Instituto Nacional de Vías, 1998.

Categoría	S1	S2	S3	S4	S5
Módulo resiliente (kg/cm^2)	300–500	500–700	700–1000	1000–1500	> 1500

Tabla 10. Estructuras de pavimento estudiadas.

Fuente: Instituto Nacional de Vías, 1998.

N.º	Combinación	CA (cm)	BG (cm)	SBG (cm)	M _r STE (MPa)
1	R2-T1-S1	10	20	30	30
2	R2-T2-S1	10	20	40	30
3	R2-T3-S5	10	15	15	150
4	R2-T4-S2	10	20	40	50
5	R2-T4-S4	10	15	25	100
6	R2-T5-S1	12	30	45	30
7	R2-T5-S5	10	15	20	150
8	R2-T6-S1	12	35	45	30
9	R2-T6-S2	12	25	45	50
10	R2-T6-S4	10	20	30	100
11	R2-T6-S5	10	15	25	150
12	R2-T7-S2	15	20	40	50
13	R2-T7-S3	12	20	40	70
14	R2-T7-S4	12	20	30	100
15	R2-T7-S5	12	15	25	150
16	R2-T8-S1	15	40	45	30
17	R2-T8-S2	15	25	40	50
18	R2-T8-S3	15	20	35	70
19	R2-T8-S4	15	15	30	100
20	R2-T8-S5	12	15	30	150
21	R2-T9-S2	15	25	45	50
22	R2-T9-S3	15	25	35	70
23	R2-T9-S4	15	15	35	100
24	R2-T9-S5	12	15	30	150

6.4.2. Caracterización de los materiales

Debido a que el manual previamente mencionado emplea el método AASHTO 93 para el diseño de las estructuras, en el capítulo 8 se establecen los coeficientes de aporte estructural de la carpeta asfáltica y capas granulares considerados en el diseño. A partir de los coeficientes se calcularon los módulos dinámicos de las capas con las siguientes expresiones (Ullidtz, 1998):

$$\text{Concreto asfáltico:} \quad a_1 = 0.40 \times \log\left(\frac{E}{3000 \text{ MPa}}\right) + 0.44 \quad (9)$$

$$\text{Base granular:} \quad a_2 = 0.25 \times \log\left(\frac{E}{160 \text{ MPa}}\right) + 0.11 \quad (10)$$

$$\text{Subbase granular:} \quad a_3 = 0.23 \times \log\left(\frac{E}{160 \text{ MPa}}\right) + 0.15 \quad (11)$$

Adicionalmente, se establecieron los valores de relación de Poisson típicamente utilizados en el análisis elástico de las capas de pavimento. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Propiedades elásticas de las capas de pavimento.

Capa	CA	BG	SBG	STE
Coefficiente de aporte	0.37 *	0.14	0.12	–
Módulo (MPa)	2000	210	120	Variable
Relación de Poisson	0.35	0.40	0.40	0.45

*Correspondiente a la región climática R2.

6.4.3. Cargas de tránsito analizadas

Para evaluar la influencia de la adherencia parcial en la vida a fatiga de las capas asfálticas se empleó el eje sencillo estándar rueda doble con un peso de 80 kN, una presión de contacto de 690 kPa (100 psi) y una separación transversal de 343 mm. La configuración del semieje de carga se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Configuración de semiejes de carga.

Semieje	Peso (kN)	Rueda	Esfuerzo vertical (kPa)	Carga vertical (kN)	X (m)	Y (m)	Radio (m)
Sencillo	80	1	690.0	20.0	0.000	0.000	0.0961
		2	690.0	20.0	0.343	0.000	0.0961

6.4.4. Puntos de análisis de respuesta crítica

Las coordenadas horizontales de los puntos para análisis de deformación unitaria horizontal por tracción en las capas asfálticas se escogieron teniendo en cuenta que: “En los pavimentos

asfálticos, las respuestas críticas se producen bien a lo largo del eje vertical bajo el centro del neumático interior de la rueda doble o bien en el eje vertical simétrico a los dos neumáticos, ...” (Sánchez & Campagnoli, 2016, pág. 353). La ubicación de estos puntos corresponde al número 1 y número 3 de la Figura 15, en la cual además se encuentra el punto número 2 que corresponde al borde del área de contacto del neumático que también se tuvo en cuenta debido a su frecuente consideración en el medio de la ingeniería de pavimentos. Las coordenadas de los tres puntos se encuentran en la Tabla 13.

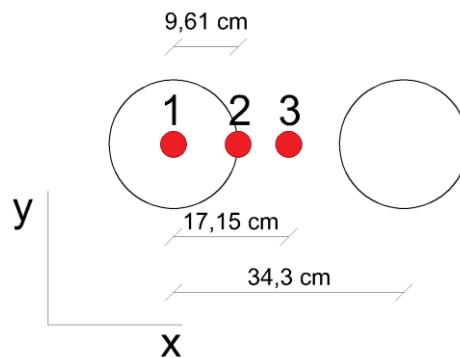


Figura 15. Coordenadas horizontales de los puntos de análisis.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Coordenadas horizontales de los puntos de análisis.

Puntos	X (m)	Y (m)
1	0.0000	0.0000
2	0.0961	0.0000
3	0.1715	0.0000

Para escoger la profundidad de los puntos se tuvo en cuenta que en el proceso de diseño de un pavimento asfáltico una de las respuestas críticas que se evalúan es la deformación de tensión en la parte inferior de las capas asfálticas (Sánchez & Campagnoli, 2016, pág. 353). Por lo cual, para el análisis de la carpeta conformada por una sola capa se consideró una profundidad igual al espesor menos 0.2 mm, y para el análisis de la carpeta conformada por dos capas adheridas se consideró primero una profundidad igual al espesor de la capa superior menos 0.2 mm y segundo la profundidad de la parte inferior de la capa subyacente menos 0.2 mm, como se muestra en la Figura 16. La profundidad de los puntos de análisis se resume en la Tabla 14.

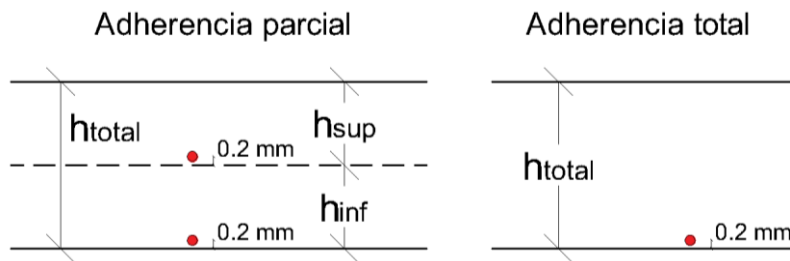


Figura 16. Profundidad de los puntos de análisis.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Profundidad de los puntos de análisis.

Espesor total carpeta asfáltica (mm)	Adherencia parcial		Adherencia total
	Capa superior (mm)	Capa subyacente (mm)	Carpeta (mm)
100.0	49.8	99.8	99.8
120.0	59.8	119.8	119.8
150.0	74.8	149.8	149.8

7. Evaluación de la resistencia al corte en la interfase adherida de las capas asfálticas

El ensayo de corte LCB fue ejecutado con cada uno de los especímenes de prueba fabricados a partir de una misma mezcla bituminosa, dos tipos de riego de liga y cinco tasas de aplicación del mismo. Las tasas de aplicación se escogieron teniendo en cuenta el requisito presente en la especificación INV Art. 421-13 que establece una dosificación de ligante residual del orden de 200 a 300 g/m², con lo cual se escogieron tales límites establecidos junto con dos valores adicionales superiores de 400 y 500 g/m² y un valor adicional inferior al rango especificado de 100 g/m² como se explicó anteriormente. Tal decisión obedeció a la necesidad de cubrir un rango mucho más amplio de aplicación del ligante que permitiese valorar su efecto en la adherencia de las capas asfálticas y obtener una dosificación óptima.

7.1. Fuerza cortante de rotura

Fueron fabricados tres especímenes para cada condición de prueba definida por la dosificación de ligante residual y el tipo de riego de liga. La fuerza cortante de rotura (FCR) se calculó como la mitad de la máxima carga ejercida por el pistón de la prensa sobre el dispositivo durante el ensayo, tal como se explica en la Figura 10. Las Tablas 15 y 16 muestran los resultados de la FCR obtenida junto con la desviación estándar y coeficiente de variación para emulsión asfáltica convencional y modificada respectivamente.

Tabla 15. Resultados de fuerza cortante de rotura con emulsión asfáltica CRL-1.

Riego de liga	CRL-1				
Tasa de aplicación (g/m ²)	100	200	300	400	500
FCR (kN)	1.58	2.47	3.19	3.07	2.40
	1.92	2.68	2.93	3.35	2.80
	1.70	2.93	3.51	3.13	2.32
Media	1.73	2.69	3.21	3.18	2.50
DE	0.17	0.23	0.29	0.15	0.26
CV	9.8%	8.6%	9.0%	4.7%	10.4%

Tabla 16. Resultados de fuerza cortante de rotura con emulsión asfáltica CRL-1hm.

Riego de liga	CRL-1hm				
	100	200	300	400	500
Tasa de aplicación (g/m ²)	3.32	4.33	4.16	3.45	3.06
FCR (kN)	4.01	4.95	4.83	3.83	3.49
	3.51	5.02	4.96	3.20	2.91
Media	3.61	4.77	4.65	3.49	3.15
DE	0.36	0.38	0.43	0.32	0.30
CV	10.0%	7.9%	9.2%	9.1%	9.6%

7.2. Resistencia al esfuerzo cortante

A partir de los resultados de fuerza cortante de rotura se obtuvo la resistencia al esfuerzo cortante que se produce en la superficie de unión, utilizando para ello la ecuación (1) previamente descrita que es equivalente a la siguiente:

$$REC = FCR/S$$

Donde,

- REC = Resistencia al esfuerzo cortante
- FCR = Fuerza cortante de rotura
- S = Área de la sección transversal

Con la magnitud del diámetro de los especímenes de prueba se calculó el área de la sección transversal, y con la fuerza cortante de rotura media obtenida en cada condición (Tablas 15 y 16) se obtuvo la resistencia al esfuerzo cortante que se produce en cada caso. Los resultados se muestran en las Tablas 17 y 18.

Tabla 17. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante con emulsión asfáltica CRL-1.

Riego de liga		CRL-1				
Tasa de aplicación (g/m ²)	100	200	300	400	500	
REC (MPa)	0.19	0.30	0.39	0.38	0.30	
	0.24	0.33	0.36	0.41	0.35	
	0.21	0.36	0.43	0.39	0.29	
Media	0.21	0.33	0.40	0.39	0.31	
DE	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	
CV	9.8%	8.6%	9.0%	4.7%	10.4%	

Tabla 18. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante con emulsión asfáltica CRL-1hm.

Riego de liga		CRL-1hm				
Tasa de aplicación (g/m ²)	100	200	300	400	500	
REC (MPa)	0.41	0.53	0.51	0.43	0.38	
	0.49	0.61	0.60	0.47	0.43	
	0.43	0.62	0.61	0.39	0.36	
Media	0.45	0.59	0.57	0.43	0.39	
DE	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	
CV	10.0%	7.9%	9.2%	9.1%	9.6%	

8. Efecto de la tasa de aplicación y el tipo de emulsión en la adherencia de las capas asfálticas

Las Tablas 19 y 20 muestran los análisis estadísticos realizados sobre los efectos del tipo de riego de liga y las dosificaciones aplicadas respecto a la resistencia al esfuerzo cortante de la interfase adherida. El primer análisis consiste en una prueba con estadístico 'T' teniendo como hipótesis que la resistencia media es mayor para el riego de liga CRL-1hm (una cola) y el segundo es una prueba de análisis de la varianza 'ANOVA', en ambos casos con un nivel de confianza del 90%.

Se puede observar que tanto el tipo de riego de liga como la dosificación de ligante asfáltico residual tienen un efecto significativo en la resistencia al corte de la superficie de unión para los dos riegos de liga analizados y el rango de cinco dosificaciones estudiado.

Tabla 19. Análisis estadístico del efecto del tipo de riego de liga sobre la REC.

Dosificación	Prueba estadística	Valor-P	Resultado
100	Tipo de riego	0.0006	Significativo
200	Tipo de riego	0.0006	Significativo
300	Tipo de riego	0.0042	Significativo
400	Tipo de riego	0.0985	Significativo
500	Tipo de riego	0.0242	Significativo

Tabla 20. Análisis estadístico del efecto de la dosificación residual sobre la REC.

Riego de liga	Prueba estadística	Valor-P	Resultado
CRL-1	Dosificaciones	6.9×10^{-5}	Significativo
CRL-1hm	Dosificaciones	7.1×10^{-4}	Significativo

La Figura 17 presenta la variación de la resistencia al corte frente al tipo de riego de liga y su dosificación residual. Se observa que para todo el rango de dosificaciones estudiadas el riego de liga CRL-1hm presenta la mayor resistencia al esfuerzo cortante, además revela una variación de dicha magnitud con el aumento de la dosificación de ligante residual presente en la interfase adherida de las capas bituminosas.

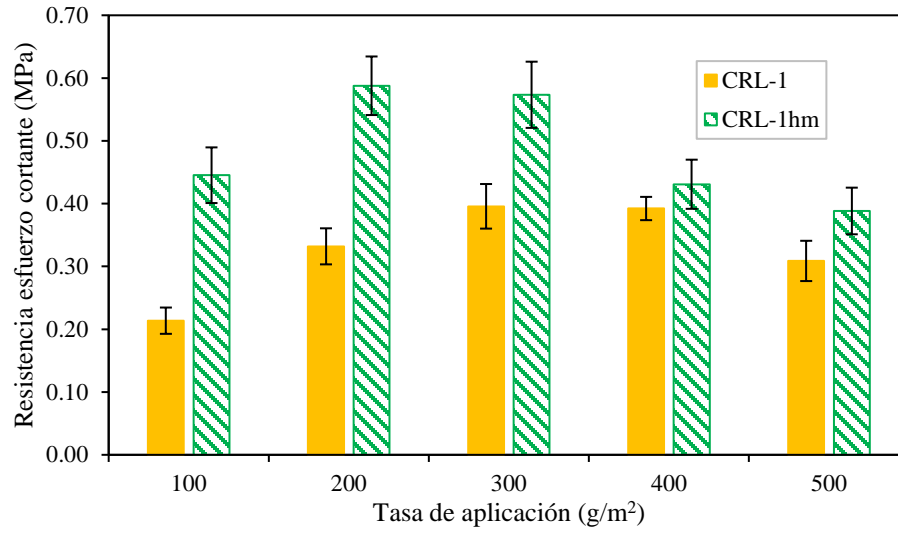


Figura 17. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación y tipo de riego.
Fuente: Esta investigación.

9. Tasas óptimas de aplicación de los riegos de liga utilizados

La Figura 18 presenta cada uno de los resultados individuales calculados para la resistencia al esfuerzo cortante (Tablas 17 y 18) junto con una curva de regresión polinómica de grado 3 obtenida para cada grupo de resultados según el tipo de riego.

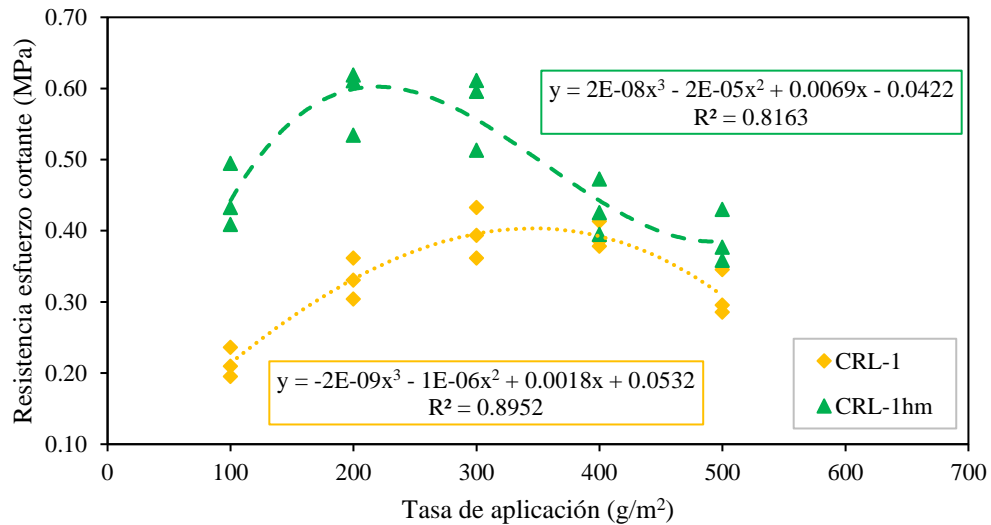


Figura 18. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación y tipo de riego.

Fuente: Esta investigación.

A partir del comportamiento observado de la resistencia al esfuerzo cortante con respecto a la tasa de aplicación de ligante residual se encuentra que en los dos grupos de especímenes analizados según el tipo de riego existe una dosificación para la cual se produce un valor máximo de resistencia, dicha dosificación puede considerarse como óptima, ya que asegura una mayor aproximación al comportamiento monolítico que se requiere para las capas asfálticas. La Tabla 21 muestra las tasas óptimas de aplicación calculadas utilizando las curvas de regresión polinómicas de tercer grado de la Figura 18.

Tabla 21. Tasas óptimas de aplicación del ligante residual.

Tipo de emulsión	Tasa óptima de aplicación de ligante residual (g/m²)	Resistencia al esfuerzo cortante (MPa)
CRL-1	350	0.40
CRL-1hm	220	0.60

10. Influencia de la adherencia de las capas asfálticas en la vida a fatiga del pavimento

Para llevar a cabo el análisis teórico de la respuesta del pavimento bajo condiciones de adherencia parcial de las capas asfálticas fue necesario calcular inicialmente el parámetro de rigidez que caracteriza la unión de las superficies.

10.1. Evaluación de la rigidez tangencial de la interfase adherida de las capas asfálticas

Existe otro parámetro que se puede obtener a partir del ensayo realizado y es el módulo secante o módulo de reacción cortante. Éste se define como la relación entre el esfuerzo cortante máximo y el desplazamiento correspondiente (Miró, Martínez, & Pérez, 2005), por lo cual, representa la rigidez que desarrolla la interfase adherida ante desplazamientos tangenciales relativos de las dos superficies que la conforman.

Dado que durante la ejecución del ensayo se registraron los valores de carga a intervalos uniformes de desplazamiento, es posible conocer el desplazamiento correspondiente al valor pico de carga. Sin embargo, el desplazamiento del pistón de la prensa no corresponde al desplazamiento relativo entre las dos superficies bituminosas del espécimen de prueba, para encontrar tal magnitud es necesario realizar el cálculo siguiente:

$$\Delta_r = \Delta_p \times \frac{D_i}{D_a} \quad (12)$$

Donde,

- Δ_r = Desplazamiento relativo entre las superficies
- Δ_p = Desplazamiento del pistón
- D_i = Distancia del apoyo más lejano a la interfase = 171 mm
- D_a = Distancia al punto de aplicación de la carga = 88 mm

La fórmula anterior proviene de la aplicación del principio de semejanza de triángulos, el cual se ilustra en la Figura 19. La interfase adherida se encuentra a 5 milímetros del apoyo, por lo cual la distancia al apoyo más lejano es 5 milímetros menor a la distancia entre los apoyos que es de 176 milímetros.

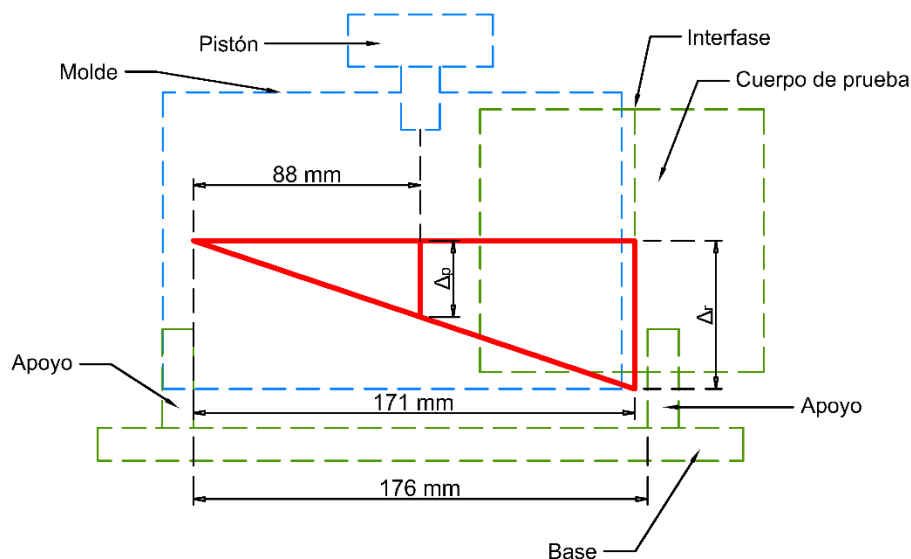


Figura 19. Esquema de desplazamiento relativo entre las superficies adheridas.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior se determinó el desplazamiento perteneciente a la carga máxima, el cual corresponde a su vez con los valores promedio de resistencia al esfuerzo cortante de las Tablas 17 y 18. El cociente entre esfuerzo y desplazamiento es el módulo de reacción cortante y el recíproco de este cociente es la elasticidad de corte (shear spring compliance). La Tabla 22 muestra los resultados del cálculo de estos parámetros.

Tabla 22. Resultados de módulo de reacción cortante.

Tasa de aplicación (g/m^2)		100	200	300	400	500
E.A. CRL-1	Desplazamiento (mm)	2.47	2.47	2.47	2.96	2.47
	Módulo de reacción cortante (N/mm^3)	0.087	0.135	0.160	0.132	0.125
	Elasticidad de corte ($\times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{N}$)	11.6	7.43	6.24	7.55	7.99
E.A. CRL-1hm	Desplazamiento (mm)	2.47	3.45	2.96	2.47	2.47
	Módulo de reacción cortante (N/mm^3)	0.180	0.170	0.194	0.175	0.157
	Elasticidad de corte ($\times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{N}$)	5.54	5.88	5.16	5.73	6.35

El parámetro de elasticidad de corte fue calculado con el fin de ser utilizado en el software BISAR 3.0, el cual ofrece la posibilidad de considerar una fricción parcial o intermedia entre las capas a partir de este valor, que describe las condiciones de contacto entre las superficies unidas. La

interfase de dos capas de pavimento, en este caso asfálticas, está representada por una capa infinitamente delgada cuya rigidez se caracteriza en términos de la elasticidad de corte, físicamente representa una proporcionalidad entre los esfuerzos de corte actuantes en la interfase y el desplazamiento relativo que se presenta entre las dos capas unidas (Wu, Chen, Zhang, & Zhang, 2017). Un mayor grado de rigidez en la interfase está representado por un módulo de corte mayor o por una elasticidad de corte menor, por tratarse de parámetros inversos.

El valor utilizado fue aquel que dentro del grupo de resultados obtenidos representó la mayor rigidez tangencial de la superficie de unión, es decir, la menor elasticidad de corte obtenida para el riego de liga CRL-1hm en una tasa de aplicación residual de 300 g/m^2 cuyo resultado fue de $5.16 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{N}$ (Tabla 22).

10.2. Análisis estructural para fisuración por fatiga

El análisis de las estructuras de pavimento seleccionadas se realizó en el software BISAR 3.0. La Tabla 23 muestra los espesores de las capas asfálticas y la profundidad de los puntos críticos para el cálculo de la deformación, tanto para el caso de análisis con adherencia total como para el caso de análisis con adherencia parcial.

Tabla 23. Espesor de capas asfálticas y profundidad de puntos para análisis estructural.

Adherencia total		Adherencia parcial		
Carpeta asfáltica (cm)	Profundidad punto de análisis (cm)	Capa superior (cm)	Capa subyacente (cm)	Profundidad punto de análisis (cm)
10	9.98	5	5	4.98
12	11.98	6	6	5.98
15	14.98	7.5	7.5	7.48

Una vez realizados los cálculos de deformación unitaria horizontal por tracción en las fibras inferiores de las capas asfálticas en cada estructura bajo los dos casos de adherencia planteados, se encontró que la deformación crítica siempre se localizó en la capa superior, demostrando un cambio de ubicación respecto a la condición de adherencia total. Además, se observó que dentro del estudio la característica fundamental que influyó sobre la deformación obtenida es el espesor de la carpeta asfáltica, ya que para estructuras con igual espesor en esta capa la deformación

obtenida fue bastante similar sin importar el espesor de las capas granulares ni el módulo resiliente de la subrasante. El resumen de resultados se encuentra en la Tabla 24 y la totalidad de resultados se muestra en la Tabla 26.

Tabla 24. Resumen de resultados de deformación unitaria.

	Condición	Adherencia parcial			Adherencia total		
		10	12	15	10	12	15
E=2000 MPa	Espesor CA	10	12	15	10	12	15
	$\mu\epsilon$ media	477.4	438.4	388.8	352.1	298.3	239.3
	DE	5.4	8.8	7.0	4.2	7.0	5.4
	CV	1.1%	2.0%	1.8%	1.2%	2.3%	2.2%

Una vez obtenida esta deformación unitaria se procedió a calcular las repeticiones admisibles para fisuración por fatiga (N_f), empleando el criterio del Instituto Norteamericano del Asfalto:

$$N_f = 0.00432 \cdot 18.4 \cdot C \cdot (\epsilon_t)^{-3.291} \cdot (E)^{-0.854} \quad (13)$$

Donde,

- ϵ_t : Deformación unitaria por tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica.
- E : Módulo dinámico de la capa asfáltica en psi.
En todos los casos es 290000 psi (2000 MPa).

Además,

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.6875 \right)$$

A partir de las proporciones del diseño de la mezcla de estudio se tiene:

- V_a : Proporción de aire en volumen de la mezcla, 4.5%.
- V_b : Proporción de asfalto en volumen de la mezcla, 10.9%

La Tabla 25 muestra el resumen de los resultados obtenidos de repeticiones admisibles en los casos de adherencia parcial (AP) y adherencia total (AT) comparados, junto con el cálculo de una relación entre dichas repeticiones $\left(\frac{N_{fAP}}{N_{fAT}} \right)$. En todos los casos los valores mostrados son el promedio del conjunto de datos correspondiente al espesor de carpeta asfáltica considerado. La totalidad de los resultados de repeticiones admisibles se encuentra en la Tabla 26.

Tabla 25. Resumen de resultados de repeticiones admisibles.

Espesor CA		10	12	15
E=2000 MPa	N _f AP ($\times 10^6$)	0.18	0.24	0.36
	N _f AT ($\times 10^6$)	0.50	0.87	1.79
	Relación	37%	28%	20%

Tabla 26. Resultados de análisis de las estructuras de pavimento.

Número	Combinación	Adherencia parcial			Adherencia total		Relación
		$\mu\epsilon$ capa superior	$\mu\epsilon$ capa subyacente	Repeticiones admisibles	$\mu\epsilon$ carpeta	Repeticiones admisibles	
1	R2-T1-S1	473.2	355.9	188784	354.7	487466	38.7%
2	R2-T2-S1	470.7	355.8	192104	357.8	473704	40.6%
3	R2-T3-S5	480.9	374.6	179017	355.4	484314	37.0%
4	R2-T4-S2	472.2	359.6	190103	355.8	482524	39.4%
5	R2-T4-S4	484.2	373.1	175033	349.7	510782	34.3%
6	R2-T5-S1	427.8	316.8	263102	346.8	524974	50.1%
7	R2-T5-S5	481.7	374.8	178041	347.7	520515	34.2%
8	R2-T6-S1	425.1	315.3	268642	290	945771	28.4%
9	R2-T6-S2	433.1	322	252654	349.1	513677	49.2%
10	R2-T6-S4	473.8	364.6	187998	287.4	974222	19.3%
11	R2-T6-S5	482.2	374.9	177434	294.3	901050	19.7%
12	R2-T7-S2	391.1	276.6	353442	241.7	1722559	20.5%
13	R2-T7-S3	439.7	328.2	240386	299.8	847783	28.4%
14	R2-T7-S4	440.2	329.9	239489	300	845925	28.3%
15	R2-T7-S5	446.8	338.5	228042	304.6	804605	28.3%
16	R2-T8-S1	376.3	264.1	401287	229.3	2048556	19.6%
17	R2-T8-S2	385.7	271.9	369990	237.3	1829923	20.2%
18	R2-T8-S3	391.2	277.4	353145	241.4	1729615	20.4%
19	R2-T8-S4	397.6	284.9	334780	245.7	1631978	20.5%
20	R2-T8-S5	447.1	338.6	227539	305	801137	28.4%
21	R2-T9-S2	385.2	271.6	371573	236.7	1845233	20.1%
22	R2-T9-S3	386	272.8	369045	237.1	1835008	20.1%
23	R2-T9-S4	397.2	284.6	335891	245.3	1640752	20.5%
24	R2-T9-S5	447.1	338.6	227539	305	801137	28.4%

La Figura 20 muestra gráficamente el resumen de resultados de la Tabla 25. Los valores entre paréntesis de la abscisa corresponden a los espesores de la capa superior y subyacente en el análisis de adherencia parcial, respectivamente.

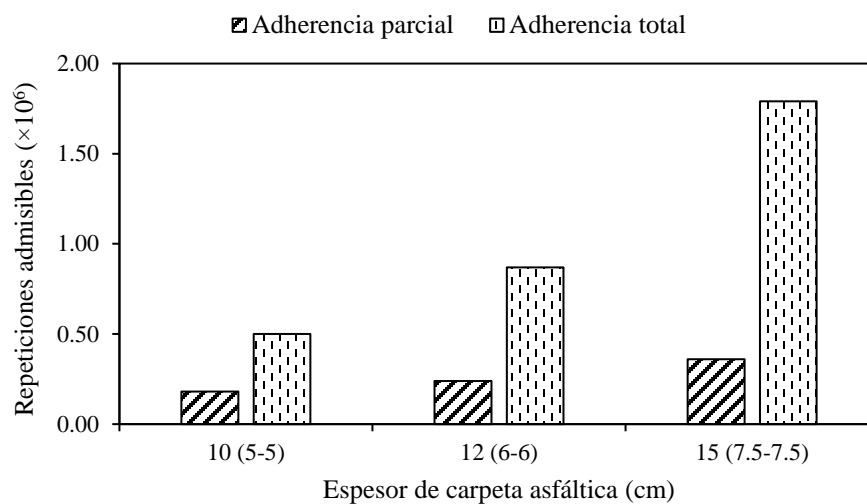


Figura 20. Número de repeticiones admisibles adherencia parcial – adherencia total.

Fuente: Esta investigación.

La relación de repeticiones está en un rango del 37% al 20%, lo cual demuestra que para el caso de estudio y los materiales utilizados la vida a fatiga a considerar para la carpeta asfáltica bajo el análisis de adherencia parcial es mucho menor que la considerada bajo el análisis de adherencia total entre las capas, puesto que el módulo de reacción cortante desarrollado por la interfase adherida como resultado del estudio experimental no permite la existencia de un alto grado de comportamiento monolítico en todo el espesor de la carpeta asfáltica, produciendo un cambio de ubicación de la deformación unitaria horizontal por tracción que pasa a localizarse en la fibra inferior de la capa superior y no en la capa subyacente, como sí lo considera el análisis de adherencia total. Por lo tanto, la vida a fisuración por fatiga de las estructuras de pavimento consideradas estará controlada por la capa bituminosa superior.

Un importante estudio realizado en 1976 propuso que valores del módulo de reacción menores a 1 N/mm^3 podrían generar comportamientos de la interfase similares a la ausencia de adherencia (Roque, Hernando, Park, Zou, & Waisome, 2017), otros autores sugieren en estudios más recientes de 1997 que la ausencia de adherencia corresponde a un valor de módulo inferior a 0.1 N/mm^3 , y que entre 0.1 y 10 N/mm^3 se encuentra el caso intermedio (Khweir & Fordyce, 2002). Teniendo

en cuenta esta última referencia, el módulo de reacción cortante obtenido del ensayo y utilizado en el análisis representa una condición intermedia (0.194 N/mm^3), sin embargo, se encuentra bastante cercano a la ausencia de adherencia, lo cual podría explicar la gran diferencia obtenida en las repeticiones admisibles y el cambio en la localización de la deformación crítica.

También se puede observar que la relación de repeticiones disminuye con el aumento del espesor total de la carpeta asfáltica, esto debido a que en las estructuras de pavimento analizadas un mayor espesor de la carpeta asfáltica con adherencia total produjo un enorme aumento de las repeticiones admisibles, mientras que el grado de aumento de las mismas en la condición de adherencia parcial fue menor.

11. Conclusiones y recomendaciones

11.1. Conclusiones

El presente trabajo de grado estudió el efecto de la tasa de aplicación de ligante residual en conjunto con dos tipos de emulsiones asfálticas dentro de su utilización como riegos de liga, llevando a cabo una prueba de esfuerzo cortante que actúa en la unión de las capas asfálticas y permite obtener parámetros de caracterización de la adherencia. Tal ensayo fue implementado desde la normatividad española para incorporar nuevos métodos de análisis y control de las propiedades mecánicas de las estructuras de pavimento. Además, se realizó un análisis teórico sobre el efecto de la adherencia parcial sobre la vida a fatiga de la carpeta asfáltica. A partir de los resultados conseguidos se presentan a continuación las conclusiones obtenidas:

- El tipo de riego de liga tiene un efecto considerable sobre la resistencia al esfuerzo cortante que desarrolla la superficie de unión de las capas asfálticas, en el presente trabajo de grado se encontró que la emulsión asfáltica modificada CRL-1hm es capaz de desarrollar una resistencia superior en comparación con la emulsión asfáltica convencional CRL-1. Además, se observó que para las dosificaciones menores a 300 g/m^2 inclusive, el efecto del tipo de riego es mucho más pronunciado que para las tasas de 400 y 500 g/m^2 , lo cual indica que para las condiciones del presente estudio el aumento en la tasa de aplicación redujo el efecto que tiene el tipo de ligante asfáltico sobre la resistencia al esfuerzo cortante.
- La tasa de aplicación o dosificación residual del riego de liga tiene un efecto importante sobre la resistencia al esfuerzo cortante que desarrolla la interfase adherida de las capas asfálticas, siendo posible además obtener una dosificación óptima de 350 y 220 g/m^2 para los riegos CRL-1 y CRL-1hm respectivamente.
- La resistencia al esfuerzo cortante estimada para la dosificación óptima del riego tipo CRL-1hm es un 50% mayor que la correspondiente al riego tipo CRL-1, lo cual demuestra las grandes ventajas que se obtendrían de la aplicación de esta emulsión asfáltica modificada frente a la convencional en la búsqueda del comportamiento monolítico deseado en la carpeta asfáltica.

- En las condiciones del presente estudio la vida a fatiga de la carpeta asfáltica mostró una gran variación cuando se analizó bajo las dos condiciones de adherencia de las capas, existiendo una gran disminución de la misma bajo la condición de adherencia parcial en comparación con la condición de adherencia total, siendo esta última normalmente considerada en los análisis de modelos multicapa elásticos.
- Una adecuada determinación del módulo de reacción cortante de la interfase adherida de las capas asfálticas es muy importante para su correcta utilización como parámetro de adherencia parcial entre las mismas, ya que existen diversos factores de manejo en laboratorio que influyen en su magnitud y estos deben corresponder con las condiciones esperadas en servicio.

11.2. Recomendaciones para futuras investigaciones

A partir de los resultados obtenidos se pueden realizar las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras:

- Evaluar como tipos de riegos de liga otras emulsiones asfálticas con diferentes viscosidades y modificadores, así como cementos asfálticos, con el propósito de determinar el comportamiento desarrollado por estos materiales en la resistencia al corte.
- Estudiar diferentes tipos de capas asfálticas en cuanto a la gradación de la mezcla, como es el caso de mezclas semidensas y gruesas, ya que esta propiedad determina la textura superficial de las capas a adherir y se conjuga con los demás factores en la adherencia desarrollada por la interfase.
- Evaluar los efectos de adherencia entre capas asfálticas y capas de concreto hidráulico, ya que por presentarse interacciones mecánicas y químicas diferentes, constituyen un amplio panorama de análisis de la unión de las capas de un pavimento.

- Analizar las propiedades reológicas de los materiales utilizados como riego de liga, para identificar la relación que pueda existir con el desempeño y resistencia de los mismos en la unión de capas de pavimento.
- Estudiar las propiedades de adherencia entre capas asfálticas con especímenes de laboratorio y testigos extraídos de campo, puesto que es necesario conocer la eficiencia de los riegos de liga bajo condiciones reales de construcción, y así poder predecir su desempeño de manera más apropiada.
- Analizar diferentes niveles de adherencia parcial a partir del módulo de reacción cortante, para establecer condiciones de desempeño de la carpeta asfáltica más aproximadas a la realidad y así poder predecir satisfactoriamente los diferentes deterioros que se relacionan con esta propiedad.

12. Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Pasto. (s.f.). *Información General - Pasto - Nariño - Colombia*. Obtenido de <http://www.pasto.gov.co/>
- ASTM International. (2012). *ASTM E867-06(2012) Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/E0867-06R12>
- ASTM International. (2015). *ASTM D4402/D4402M-15 Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. Obtenido de https://doi.org/10.1520/D4402_D4402M-15
- ASTM International. (2015). *ASTM D907-15 Standard Terminology of Adhesives*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D0907-15>
- ASTM International. (2016). *ASTM D4052-16 Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D4052-16>
- ASTM International. (2016). *ASTM D92-16b Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D0092-16B>
- ASTM International. (2017). *ASTM D8-17 Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D0008-17>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2008). NLT-382/08 Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte. En *Normas NLT - Ensayos de Carreteras*. España.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Kentucky: Pearson Prentice Hall.
- IDEAM. (2014). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/>
- Instituto Nacional de Vías. (1998). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito*.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Art. 411-13 Suministro de emulsión asfáltica. En *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C.

- Instituto Nacional de Vías. (2013). Art. 415-13 Suministro de emulsión asfáltica modificada con polímeros. En *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Art. 421-13 Riego de liga. En *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Art. 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico). En *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-125-13 Determinación del límite líquido de los suelos. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-126-13 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-133-13 Equivalente de arena de suelos y agregados finos. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-213-13 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-218-13 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de Los Angeles. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-220-13 Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-222-13 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-223-13 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.

- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-224-13 Determinación del valor del 10% de finos. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-227-13 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-235-13 Valor de azul de metileno en agregados finos. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-237-13 Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-238-13 Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-239-13 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría). En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-240-13 Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-702-13 Ductilidad de los materiales asfálticos. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-706-13 Penetración de los materiales bituminosos. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-712-13 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola). En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.

- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-713-13 Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-720-13 Efecto del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-761-13 Contenido de agua en una emulsión asfáltica. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-762-13 Destilación de emulsiones asfálticas. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-763-13 Viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-764-13 Sedimentación y estabilidad de las emulsiones asfálticas durante el almacenamiento. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-765-13 Tamizado de las emulsiones asfálticas. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-768-13 pH de las emulsiones asfálticas. En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-774-13 Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (Método Riedel-Weber). En *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Vías, Universidad Nacional de Colombia. (2006). *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. Bogotá D.C.
- Khweir, K., & Fordyce, D. (2002). Influence of layer bonding on the prediction of pavement life. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 156, 73-83.
- Kuennen, T. (5 de Diciembre de 2016). *A tack for the battle*. Obtenido de Roads & Bridges: <https://www.roadsbridges.com/tack-battle>

- Miró, R., Martínez, A., & Pérez, F. (2005). Assessing heat-adhesive emulsions for tack coats. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 158, 45-51.
- Mohammad, L. N., Elseifi, M. A., Bae, A., Patel, N., Button, J., & Scherocman, J. A. (2012). *Optimization of Tack Coat for HMA Placement*. NCHRP Report 712, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., EE.UU.
- Raposeiras, A. C., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., & Rodriguez-Hernandez, J. (2013). Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers. *Construction and Building Materials*, 372-381.
- Ricci, L. A. (2011). *Evaluación de la Adherencia entre Capas Asfálticas con Intercapa de Geosintético*. Tesis de Maestría, La Plata.
- Roque, R., Hernando, D., Park, B., Zou, J., & Waisome, J. (2017). *Evaluation of Asphalt Pavement Interface Conditions for Enhanced Bond Performance*. Final Report, Florida Department of Transportation, Research Center, Tallahassee.
- Sánchez, F., & Campagnoli, S. X. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras: guía práctica para los estudios y diseños*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Tashman, L., Nam, K., & Papagiannakis, T. (2006). *Evaluation of the Influence of Tack Coat Construction Factors on the Bond Strength Between Pavement Layers*. WCAT Report 06-002, Washington Center for Asphalt Technology.
- Ullidtz, P. (1998). *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*. Lyngby: Polyteknisk Forlag.
- Wang, J., Xiao, F., Chen, Z., Li, X., & Amirhanian, S. (2017). Application of tack coat in pavement engineering. *Construction and Building Materials*, 856-871.
- West, R. C., Zhang, J., & Moore, J. (2005). *Evaluation of Bond Strength Between Pavement Layers*. NCAT Report 05-08, National Center for Asphalt Technology, Auburn, EE.UU.
- Wheat, M. (2007). *Evaluation of Bond Strength at Asphalt Interfaces*. A Report, Kansas State University, Department of Civil Engineering, Manhattan, EE.UU.

-
- Wu, S., Chen, H., Zhang, J., & Zhang, Z. (2017). Effects of interlayer bonding conditions between semi-rigid base layer and asphalt layer on mechanical responses of asphalt pavement structure. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 274-281.
- Zhang, W. (2017). Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: A state-of-the-art review based on application in the United States. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 434-445.