EFECTO DE LA VISCOSIDAD, TASA DE APLICACIÓN Y LA INCIDENCIA DEL POLVO EN LA ADHERENCIA DE UN RIEGO DE LIGA DE CAPAS ASFÁLTICAS EVALUADAS CON EL ENSAYO NLT-382/08.

JORGE LUIS ARGOTY BURBANO

DIRECTOR:

JAIME RAFAEL OBANDO ANTE, D.Sc.

CODIRECTOR:

GERARDO ANDRES DORADO JURADO, M.Sc.

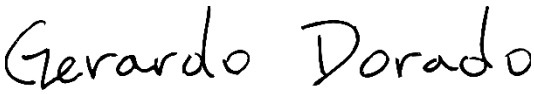
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
POPAYÁN
2023

JORGE LUIS ARGOTY BURBANO

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

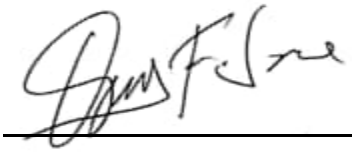
APROBADO POR:

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



ING. GERARDO ANDRES DORADO JURADO. M.Sc. (CODIRECTOR)

ING. MG. JURADO 1 ANDREA CAROLINA PAREDES CERÓN



ING. MG. JURADO 2 FERNANDO JOVE WILCHES

POPAYÁN, MAYO 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

ARGOTY, JORGE LUIS
Efecto de la viscosidad, tasa de aplicación y la incidencia del polvo en la adherencia de un riego de liga de capas asfálticas evaluadas con el ensayo NLT-382/08.
99 p., 279 mm
Trabajo de grado de Maestría – Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Geotecnia.

1. Emulsión asfáltica
2. Riego de liga
3. Polvo
4. Adherencia
5. Esfuerzo de corte

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Argoty, J. L. (2023). *Efecto de la viscosidad, tasa de aplicación y la incidencia del polvo en la adherencia de un riego de liga de capas asfálticas evaluadas con el ensayo NLT-382/08.* Trabajo de grado de Maestría, Universidad del Cauca, Popayán.

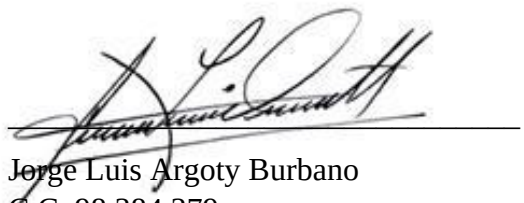
CESIÓN DE DERECHOS

NOMBRE DEL AUTOR: Jorge Luis Argoty Burbano

TÍTULO: Efecto de la viscosidad, tasa de aplicación y la incidencia del polvo en la adherencia de un riego de liga de capas asfálticas evaluadas con el ensayo NLT-382/08.

GRADO / AÑO: Magíster / 2023.

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. El autor se reserva otros derechos de publicación y ninguna copia de este trabajo puede ser reproducida sin la autorización por escrito del autor.



Jorge Luis Argoty Burbano
C.C. 98.384.379
Email: jlargoty@gmail.com

Dedicatoria:

A Dios a mi Abi, a mi Yiyi, a Hipo, a mi amada madre Esperanza y a mi querido hermano Juan Carlos, quienes hicieron posible esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad del Cauca por su colaboración y orientación que ha permitido obtener este título, a cada uno de los profesores que compartieron su conocimiento para hoy poder estar aquí. Al ingeniero Jaime Obando Ante un agradecimiento especial por su apoyo, orientación y valiosas sugerencias con las cuales he podido culminar este grado de formación, gracias por sus consejos y acompañamiento durante este proceso de construcción y desarrollo del proyecto.

Al laboratorio del Ing. Juan Carlos Trujillo y su empresa, quienes amablemente y con entera disposición me prestaron sus servicios, equipos y suministros para la ejecución de los ensayos de laboratorio con los cuales se desarrolló este trabajo de grado.

RESUMEN

El incremento de los niveles de tránsito en las vías del país exige estructuras de pavimento asfáltico robustas con carpetas de mayores espesores (Portillo, 2020) que en la mayoría de los casos deben construirse en más de una capa: requiriendo unirse mediante un riego de liga, siendo este quien proporciona la adherencia efectiva entre capas de pavimento (LanammeUCR,2019). El riego de liga es crítico para transferir los esfuerzos inducidos por las cargas de tránsito a la estructura, precisamente este concepto ha sido motivo de grandes investigaciones a lo largo del tiempo, para intentar establecer las correctas variaciones y mitigar los factores que influyan en su grado de adhesión (Dorado y Rosero, 2018). En los pavimentos asfálticos se producen diversos tipos de problemas, debido a la falta de adherencia entre las capas asfálticas de rodadura (González, 2018). Por esta razón, se estudió en laboratorio la resistencia de adherencia de la interfaz mediante el ensayo del Laboratorio de Caminos de Barcelona (LCB) de la norma española NLT 382/08, el cual evalúa la adherencia mediante un ensayo de corte entre capas ligadas. Se buscó identificar el comportamiento de la adherencia de capas bituminosas en un riego de liga, empleando emulsiones catiónicas de rotura rápida CRR-60 y CRR-65 y agregados pétreos del municipio de Pasto.

Este trabajo consideró las condiciones de viscosidad, tasa de aplicación y polvo como agente contaminante externo, asimismo, determinó la máxima carga y la resistencia al esfuerzo cortante generada por la emulsión asfáltica en la interfaz entre las capas asfálticas ligadas.

Finalmente, el estudio permitió establecer que las tasas de aplicación son similares. El ligante que presentó mejor desempeño es la emulsión catiónica de rotura rápida CRR-65, al igual que se presentó una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante con la presencia de polvo.

Palabras clave: Emulsión asfáltica, Riego de liga, Polvo, Adherencia, Esfuerzo de corte.

ABSTRACT

The increase in traffic levels on the country's roads requires robust asphalt pavement structures with thicker binders (Portillo, 2020) that in most cases must be built in more than one layer: requiring bonding by means of a bonding irrigation, which provides the effective adherence between pavement layers (LanammeUCR, 2019). The bond irrigation is critical to transfer the stresses induced by traffic loads to the structure, precisely this concept has been the subject of great research over time, to try to establish the correct variations and mitigate the factors that influence its degree of adhesion (Dorado and Rosero, 2018). Various types of problems occur in asphalt pavements, due to the lack of adhesion between the asphalt wearing courses (González, 2018). For this reason, the bond strength of the interface was studied in laboratory using the Laboratorio de Caminos de Barcelona (LCB) test of the Spanish standard NLT 382/08, which evaluates the adhesion by means of a shear test between bound layers. The aim was to identify the adhesion behavior of bituminous layers in a bonded irrigation, using CRR-60 and CRR-65 fast breaking cationic emulsions and stone aggregates from the municipality of Pasto.

This work considered the conditions of viscosity, application rate and dust as an external contaminant agent, and also determined the maximum load and shear strength generated by the asphalt emulsion at the interface between the bound asphalt layers.

Finally, the study established that the application rates are similar. The binder that presented the best performance was the CRR-65 fast breaking cationic emulsion, as well as a decrease in shear strength with the presence of dust.

Key words: Asphalt emulsion, Binder watering, Dust, Adhesion, Shear strength.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 7

ABSTRACT 8

TABLA DE CONTENIDO 9

1. Introducción 15

2. Descripción del problema 17

3. Justificación 20

4. Objetivos 22

4.1. Objetivo general 22

4.2. Objetivos específicos 22

5. Marco teórico 23

5.1. Antecedentes 23

5.2. Descripción del trabajo monolítico de la interfaz 24

5.3. Ligantes asfálticos empleados como riego de liga 27

5.4. Factores que afectan la adherencia 28

5.5. Efectos del riego de liga en el desempeño del pavimento 35

5.6. Ensayo de corte LCB 36

6. Metodología 41

6.1. Zona de estudio 41

6.2. Esquema del trabajo propuesto 41

6.3. Caracterización de los materiales 43

6.3.1. Agregado mineral 43

6.3.2. Cemento asfáltico 46

6.3.3. Emulsión Asfáltica como Riego de Liga 47

6.3.4. Polvo empleado como agente contaminante. 49

6.4. Elaboración de la Mezcla asfáltica 50
6.5. Elaboración de especímenes 53
6.6. Realización del Ensayo de LCB 59
6.6.1. Descripción del dispositivo para el Ensayo de LCB 59
6.6.2. Ejecución del Ensayo de LCB 60
6.7. Determinación de la tasa de aplicación óptima 62
6.8. Elaboración de especímenes con presencia de Polvo 62
7. Resultados y Análisis 68
7.1. Fuerza cortante de rotura 68
7.2. Resistencia al esfuerzo cortante 70
7.3. Determinación de la tasa óptima de aplicación de riego de liga 74
7.4. Evaluación de la incidencia del polvo en la adherencia del riego de liga 76
8. Conclusiones y Recomendaciones 83
8.1. Conclusiones 83
8.2. Recomendaciones 86
Referencias Bibliográficas 88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 *Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica*.....44

Tabla 2 *Caracterización de agregado mineral.* 45

Tabla 3 *Resultados de caracterización de cemento asfáltico.* 46

Tabla 4 *Resultados de emulsión CRR-60.* 48

Tabla 5 *Resultados de emulsión CRR-65.* 49

Tabla 6 *Organización de grupos de especímenes de primera capa*.....55

Tabla 7 *Peso de emulsión por briqueta*.....55

Tabla 8 *Número de testigos por tipo de ligante empleado como riego de liga*.....62

Tabla 9 *Condiciones de polvo consideradas*.....63

Tabla 10 *Número de testigos por tipo de ligante empleado en presencia y ausencia de polvo*.....65

Tabla 11 *Resultados de la Fuerza Cortante de Rotura de la emulsión CRR-60*.....69

Tabla 12 *Resultados de la Fuerza Cortante de Rotura de la emulsión CRR-65*.....69

Tabla 13 *Resultados de la Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-60* 72

Tabla 14 *Resultados de la Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-65* 73

Tabla 15 *Tasa óptima de aplicación riego de liga*.....75

Tabla 16 *Resultados de la Fuerza Cortante de Rotura con y sin polvo emulsión CRR-60*.....77

Tabla 17 *Resultados de la Fuerza Cortante de Rotura con y sin polvo emulsión CRR-65*.....77

Tabla 18 *Resultados a Resistencia al esfuerzo cortante para emulsión CRR-60 con y sin polvo* 79

Tabla 19 *Resultados de la Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-65* 80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Perfil del pavimento multicapa.....25

Figura 2 *Distribución de tensiones en un pavimento. a) Bien adherido b) Sin adherir* 26

Figura 3 *Efecto en la fatiga del cambio en la adherencia de las capas de mezcla asfáltica* 36

Figura 4 *Esquema de carga sobre la probeta*.....37

Figura 5 *Dimensiones del dispositivo B*.....38

Figura 6 *Esquema Dispositivo de Ensayo B* 39

Figura 7 *Esquema de investigación propuesto* 42

Figura 8 *Granulometría del agregado mineral para MDC-19*.....44

Figura 9 *Comparación de la fuerza cortante obtenida con las emulsiones CRR-60 y CRR-65 en función de la tasa de aplicación del riego de liga*.....70

Figura 10 *Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-60* 72

Figura 11 *Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-65* 73

Figura 12 *Comparación de resistencias al esfuerzo cortante obtenidas con las emulsiones CRR-60 y CRR-65 en función de la tasa de aplicación del riego de liga* 74

Figura 13 *Comparación de resistencias al esfuerzo cortante obtenido con las emulsiones CRR-60 y CRR-65* 75

Figura 14 *Incidencia del polvo en la Fuerza Cortante obtenida para emulsión CRR-60 y CRR-65*.....78

Figura 15 *Incidencia del polvo en Resistencia esfuerzo cortante liga con emulsión CRR-60*.....79

Figura 16 *Incidencia del polvo en Resistencia al esfuerzo cortante liga emulsión CRR-65* 80

Figura 17 *Comparación de la incidencia del polvo sobre la REC de las emulsiones CRR-60 y CRR-65*..81

Figura 18 *Incidencia del polvo sobre la REC de las emulsiones CRR-60 y CRR-65* 82

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Muestra emulsión CRR 65 47

Fotografía 2 Muestra emulsión CRR 65 48

Fotografía 3 *Proceso de tamizado polvo como agente contaminante. a) Planta de producción, b) Material tamizado N°40, c) Pasante N°40, d) Retenido N°40, e) Tamizado N°200, f) Pasante N°200* 50

Fotografía 4 *Proceso de tamizado y pesaje a) Gradación 1/2", b) Gradación 3/8", C) Pesaje*..... 51

Fotografía 5 *a) Adición de Cemento Asfáltico b) Mezclado agregados y asfalto*..... 52

Fotografía 6 *Compactación manual de briquetas primera capa* 52

Fotografía 7 *Elaboración de primera capa del espécimen de prueba con MDC-19* 53

Fotografía 8 *Primera capa compactada organización y etiquetado*..... 54

Fotografía 9 *Proceso de aplicación del riego de liga a) Aplicación con brocha, b) Verificación del peso de la emulsión, c) Peso final alcanzado de emulsión asfáltica*..... 56

Fotografía 10 *a) Horno a 20 °C b) Curado emulsión en el horno*..... 56

Fotografía 11 *Molde para compactar segunda capa. a) Medición de altura, b) Medición de diámetro*... 57

Fotografía 12 *Proceso de compactación de la segunda capa. a) Molde empleado, b) Inicio de la compactación, c) Finalización del proceso de compactación del espécimen*..... 58

Fotografía 13 *Proceso desmoldado del espécimen. a) Apertura molde con Tornillos, b) Desmoldado espécimen, c) Espécimen obtenido*..... 58

Fotografía 14 *Molde empleado en el proyecto. a) Sección transversal, b) Molde y soporte base* 59

Fotografía 15 *Medición y acondicionamiento de testigos, a) Medición dimensiones, b) Acondicionamiento térmico de testigos en el horno* 60

Fotografía 16 *Proceso Ejecución. a) Carga espécimen en la prensa, b) Plano falla del espécimen* 61

Fotografía 17 *100% tasa de polvo 2.7 g* 63

Fotografía 18 *50% tasa de polvo 1.35 g* 64

Fotografía 19 *Tasa de polvo 1.0 g* 64

Fotografía 20 *Tasa de polvo 0.50 g* 65

Fotografía 21 *Testigos con ausencia y presencia de polvo* 66

1. Introducción

El crecimiento de Colombia exige la modernización y el incremento de la capacidad de su infraestructura vial, el Plan de Desarrollo 2018-2022 menciona que “el incremento en la productividad y las potencialidades de los territorios aumentan al conectar territorios para la competitividad y el desarrollo logístico sostenible” (Departamento Nacional de Planeación, 2019). Dicha modernización está centrada en el modo carretero donde se desarrollan proyectos de construcción, mejoramiento y mantenimiento de la red vial (Consejo Privado de competitividad, 2022) y al igual que otros países, Colombia construye ampliamente pavimentos asfálticos por sus características, ventajas y versatilidad (H.Jahanbakhsh et al.,2017), en la construcción de vías y pavimentos predomina la preocupación actual de propender por una menor contaminación ambiental y el ahorro de energía, por ello se emplean emulsiones asfálticas (Archila y Aparicio, 2018).

El incremento de la población y desarrollo económico de los centros poblados genera mayor consumo de bienes y servicios, ocasionando un aumento de los niveles de tránsito pesado, traducidos en mayores espesores de las estructuras de pavimento. La calidad de los materiales, al igual que el espesor de las capas que conforman un pavimento flexible, juega un papel importante en el comportamiento durante su servicio (Sandoval y Orobio, 2013). Las capas con espesores considerables, pueden llegar a presentar dificultades durante el proceso constructivo, originado por problemas de compactación (Xu y Huang, 2012). Por esta razón, la construcción de carpetas asfálticas nuevas con espesores considerables, es uno de los desafíos que afronta el diseño y construcción de pavimentos, lo que obliga a la instalación en una o más capas para alcanzar las dimensiones y grado de compactación requeridos. Algo similar sucede en la construcción de capas asfálticas de refuerzo; la unión de una o más capas asfálticas requiere el empleo de un riego

de liga. La unión generada en la interfaz de las capas asfálticas, tiene una elevada importancia, ya que influye de manera directa en el desempeño y durabilidad del pavimento asfáltico (Vargas, 2008). King y May (2003), realizaron una investigación sobre la simulación de la estructura del pavimento, en la que demostraron que la disminución del estado de adherencia desde una adherencia total (sin deslizamiento), hasta un nivel del 90 % (deslizamiento parcial), aumentó significativamente los valores de tensión y deformación en el pavimento y disminuyó la vida útil final alrededor del 50 % (King y May 2003).

El riego de liga, o *tack coat*, es un procedimiento que se lleva a cabo con el uso de una emulsión asfáltica y se emplea para garantizar una buena adherencia entre la superficie existente y una nueva aplicación de asfalto (Asphalt Institute, 2008). Para evaluar la adherencia entre capas asfálticas, se han desarrollado diversos ensayos que permiten verificar la dosificación definitiva de ligante, estos ensayos son UNE-EN 12697-48 SBT o NLT-382 (Instituto Nacional de Vías, 2022). Otros métodos de prueba para determinar la resistencia de unión entre una capa de asfalto y otras capas de construcción de nueva construcción o sustratos existentes en pavimentos de carreteras o aeródromos son la Prueba de unión de par (TBT), generalmente aplicable a cualquier espesor de capa; el ensayo de unión cortante (SBT), generalmente aplicable a espesores de capa > 15 mm; el ensayo de adhesión a la tracción (TAT) (Salazar et al., 2014), generalmente aplicable a espesores de capa ≤ 15 mm. Además, existen otros métodos de ensayo no normativos como el Ensayo de unión por cizallamiento comprimido (CSBT); el ensayo alternativo de unión cortante (ASBT); la medición de la adhesión por capas (LAMI) (UNE-EN 12697-48, 2022).

En Colombia, el empleo de ensayos para evaluar la adherencia entre capas asfálticas, ha sido muy exiguo, esta actividad se ha realizado de manera empírica con un conocimiento superficial de las características físicas y químicas que se involucran (Dorado y Rosero, 2018).

En la actualidad, existe normatividad incipiente sobre la dosificación establecida de ligante. Esta investigación se desarrolló a escala de laboratorio y busca identificar el comportamiento de la adherencia de capas bituminosas, empleando Emulsiones Catiónicas de Rotura Rápida CRR-60 y CRR-65 en un riego de liga en el que se modificaron condiciones de viscosidad, tasa de aplicación y la incidencia del polvo como agente externo en la adherencia entre capas asfálticas, elaboradas con mezclas de uso común en el municipio de Pasto. Para determinar la resistencia al cizallamiento de la interfaz, se empleó el ensayo descrito en la norma española NLT-382/08, en la que se evaluó la adherencia con un ensayo de corte, el cual se ha empleado en diferentes estudios relacionados con adherencia (Dorado y Rosero, 2018).

2. Descripción del problema

Los pavimentos de concreto asfáltico se construyen en varias capas, con diferentes propiedades físicas y características particulares, debido a consideraciones técnicas y económicas (Diakhaté et al. 2011). Asimismo, se consideran como un sistema multicapa con espesores y características específicas, en las que se asume una perfecta liga entre las distintas capas. Se supone que estas se comportan de manera monolítica, para soportar los factores externos de tránsito y clima; sin embargo, esto no ocurre en la realidad (Ontiveros, 2013). El riego de liga es el responsable de garantizar que la estructura funcione como un sistema único, esta es una aplicación delgada y uniforme de material asfáltico, por lo general, una emulsión asfáltica diluida con agua, que se aplica normalmente a una superficie de pavimento existente o una nueva capa de asfalto en caliente antes de colocar una nueva capa de hormigón asfáltico (Mohammad et al, 2012). Este riego garantizará la durabilidad y el desempeño durante la vida útil del pavimento. Diferentes investigadores que estudiaron este tema, determinaron que los bajos niveles de liga se traducen en aparición de grietas, fisuras prematuras, deformación transversal y, además,

aseguraron que el exceso de liga genera ondulaciones. Comúnmente, el deslizamiento de las capas del pavimento se conoce por ser el mayor deterioro que ocurre por la débil unión entre las capas del pavimento (Biglari, 2018) (Ziari and Khabiri, 2007). Generalmente, este tipo de deterioro ocurre en lugares donde existe una significativa aceleración/declaración de tráfico. También es común en las curvas y los giros en U (West et al., 2005).

Teniendo en cuenta lo anterior, es crucial para el buen desempeño de la estructura de pavimento, estudiar los factores que influyen en la adherencia para que el riego de liga desarrolle una adecuada fuerza de adhesión y resistencia a la adherencia de la interfaz entre las capas del pavimento (Dorado y Rosero, 2018). Dichos factores, que tienen mayor influencia en la adherencia y que se pretende estudiar, son: la viscosidad, la tasa de aplicación y el polvo como agente contaminante externo.

Así pues, es de vital importancia asegurar la adherencia de la interfaz entre las capas bituminosas y, también, conocer el efecto de diversos factores sobre la capacidad de adherencia (Delbono, 2019). Es fundamental mencionar que, en los últimos años, este tema se ha investigado a nivel mundial y nacional, no obstante, se requiere particularizar sobre los materiales que se emplean en las regiones e identificar la incidencia de varios parámetros que influyen en el desempeño de la adherencia del riego de liga (Andaluz, 2019).

En cuanto a la normatividad de este tipo de riegos, para Colombia, solo en las especificaciones generales de construcción de carreteras del año 2022, en el artículo 421-22 Riego de Liga, se mencionan los ensayos de adherencia entre capas UNE-EN 12697-48 SBT o NLT-382, que permite establecer la dosificación definitiva del ligante. En la actualidad, las normas previamente existentes, se basan principalmente en la experiencia, la conveniencia, el juicio empírico, las recomendaciones generales sobre los tipos de ligantes y la dosificación a

aplicar. Sumado a lo anterior, rara vez se realizan pruebas de control y calidad en laboratorio, ni del proceso de construcción de las capas de adherencia, lo que puede repercutir en baja durabilidad e incluso, el fallo prematuro de la estructura de pavimento. (Mohammad et al., 2002).

Se evidencia un desarrollo incipiente en el estudio de la resistencia de adherencia que es capaz de desarrollar una emulsión asfáltica en un riego de liga, al someterse a esfuerzos mecánicos (Elizondo et al., 2017). Por tal motivo, es necesario determinar cuál es la influencia sobre la resistencia de adherencia en un riego de liga, de factores como la viscosidad, la tasa de aplicación y el polvo como agente contaminante externo, empleando emulsiones asfálticas catiónicas de rotura rápida, establecidas en la normatividad del país.

3. Justificación

En el diseño y construcción de estructuras de pavimento flexible, una alternativa comúnmente empleada es la instalación de sobrecarpetas y la construcción de carpetas asfálticas en más de una capa (Rodriguez, 2004) (Marín, 2019). La interfase generada entre la unión de capas asfálticas, se somete a esfuerzos mecánicos que dependen de diversos factores como la naturaleza de las cargas, profundidad de la interface, módulo de reacción horizontal de la interfase, estructura del firme, propiedades elásticas de sus capas, velocidad de circulación, superficie de contacto neumático-pavimento, temperatura del pavimento, textura de las capas a ligar, viscosidad del ligante, tasa de aplicación del ligante empleado y afectación de agentes contaminantes (Ortiz et al., 2020). Estos factores influyen en el comportamiento y la resistencia de la adherencia, la cual es desarrollada por la emulsión asfáltica en un riego de liga (Coleri et al., 2020).

Para diseñar estructuras de pavimento que cumplan con las expectativas de durabilidad y calidad es necesario conocer el comportamiento de dichos factores sobre el riego de liga (LanammeUCR,2019). La unión adecuada entre las interfaces de las capas del pavimento es esencial para que los pavimentos soporten diferentes tensiones, mientras que una unión débil puede causar deterioros en la capa de rodadura (Anguas et al., 2002). En muchas ocasiones se presentan patologías asociadas a un inadecuado riego de liga por ello es necesario investigar más a fondo sobre la capacidad adherente de los riegos de liga establecidos en la normatividad vigente para en el futuro tener estructuras con mejor comportamiento donde se reduzca la aparición de patologías tempranas asociadas al riego de liga (Miranda, 2010), al contar con estudios sobre la correcta dosificación de los diferentes tipos de riegos de liga se pretende tener un parámetro de control de esta actividad generando menos gastos a nivel de rehabilitación o construcción de los

mismos traduciéndose en durabilidad y comodidad para los usuarios de las estructuras durante la vida útil del pavimento (Amado y Gil,2017).

Algunos estudios que se realizaron sobre las fallas de capas de rodadura en la estructura del pavimento, determinaron, que una de las causas se debe, a la deficiente adherencia entre capas, lo que evidenció la necesidad de ampliar las investigaciones sobre los factores que influyen en la obtención del monolitismo de la carpeta en este medio (Romero, 2017). En ese orden de ideas, esta investigación pretende contribuir a la ampliación del conocimiento sobre el comportamiento de la adherencia que desarrolla la emulsión asfáltica en la interfaz de dos capas asfálticas, para materiales empleados en la elaboración de mezclas asfálticas que se realizan en el municipio de Pasto. Lo anterior se llevará a cabo, con la implementación de una prueba de laboratorio desarrollada y aplicada a nivel mundial, con el objetivo de proporcionar criterios unificados que permitan seleccionar contenidos óptimos, tipos de ligantes y tasas de aplicación, según lo estipulado en la norma existente (Cornejo, 2014).

Sin embargo, en el país, la normatividad relacionada con el riego de liga es limitada y se reduce a proponer un rango de tasas de aplicación del orden de doscientos a trescientos gramos de ligante residual por metro cuadrado (200 g/m² - 300 g/m²); en el caso de riegos de liga sobre mezclas drenantes o microaglomerados en caliente, la dotación no podrá ser menor de doscientos cincuenta gramos de ligante residual por metro cuadrado (250 g/m²). Este parámetro es muy ambiguo, lo que conlleva a ignorar los efectos de otros factores que intervienen en el desempeño físico y mecánico del riego (Paba y Vásquez, 2018).

Por consiguiente, este trabajo se desarrolla a escala de laboratorio empleando el ensayo LCB para estudiar los factores que influyen en la resistencia de adherencia en un riego de liga,

con variación de las condiciones de viscosidad, tasa de aplicación y el polvo como agente contaminante externo, para materiales que se emplean en el municipio de San Juan de Pasto.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Estudiar la adherencia de capas asfálticas a escala de laboratorio a través del ensayo LCB evaluando la viscosidad, tasa de aplicación del ligante y la incidencia del polvo como agente contaminante externo.

4.2. Objetivos específicos

- Obtener la tasa de aplicación óptima con la que se alcanza la mayor resistencia al deslizamiento, que permitan medir la resistencia al cizallamiento de la interfaz.

- Identificar la incidencia de la viscosidad en la adherencia del riego de liga entre capas asfálticas de los materiales que se usan en el municipio de Pasto.

- Establecer la incidencia de material fino (polvo) en la resistencia al esfuerzo cortante simulando la presencia de un material externo contaminante como condición típica presente en obra.

5. Marco teórico

5.1. Antecedentes

Los pavimentos asfálticos están constituidos por una capa de rodadura consistente en un tratamiento o mezcla de materiales granulares y asfalticos que se construye sobre una capa de base granular o estabilizada y una capa de subbase (Méndez y Ramírez, 2017), son el principal tipo de estructuras empleadas en las carreteras en Colombia (Gamboa, 2019). Han sido seleccionados principalmente por su rapidez en la construcción y sus buenas propiedades de funcionalidad y durabilidad (Cornejo, 2014). Las exigencias a las que se someten los pavimentos debido al crecimiento del parque automotor requieren investigaciones que busquen garantizar mayor durabilidad y un alto desempeño durante su vida útil (Sepúlveda, 2019).

Las variaciones en la carpeta asfáltica comprometen la durabilidad del pavimento, aun cuando estas variaciones se encuentren dentro de las tolerancias permitidas por las especificaciones generales de construcción (Sandoval y Orobio, 2013), por esta razón es importante garantizar las condiciones de calidad de esta capa para un correcto desempeño estructural y funcional del pavimento (Quintero y Bohórquez, 2020). En la mayor parte de riegos de liga se emplean emulsiones asfálticas, cuya función es asegurar la adhesión entre las capas y proporcionar una transición suave entre ellas, funcionando monolíticamente, lo que ayuda a prolongar la vida útil del pavimento y mejorar su resistencia a la deformación y los daños por carga (Morales, 2005). La carencia de importancia que se asigna al riego de liga en la etapa de diseño y construcción, puede ocasionar una mala adherencia de las capas ligadas, lo que se traduce en una falla prematura de la carpeta asfáltica.

Diversos estudios evaluaron el efecto de la adherencia en el desempeño de pavimentos usando diferentes modelos mecanicistas. King y May (2003), presentaron un análisis del efecto de la adherencia entre capas en carpetas asfálticas y encontraron una disminución de la vida útil del pavimento cuando la adherencia se reduce considerablemente. Una adherencia adecuada entre las capas ayuda a distribuir las cargas de manera uniforme a través del pavimento, lo que reduce la deformación y el deterioro (Van Dam et al ,.2005) de las capas: así mismo, ayuda a prevenir la separación de las capas y el agrietamiento debido a los movimientos térmicos y los cambios en las condiciones climáticas, sin embargo, si la adherencia entre las capas es insuficiente, pueden ocurrir problemas como ondulaciones, baches, agrietamiento y deslizamiento de las capas, lo que puede reducir significativamente la vida útil del pavimento y aumentar el riesgo de accidentes (Manual para inspección visual pavimentos flexibles, 2006). Por lo tanto, es importante asegurar una adherencia adecuada entre las capas, mediante la utilización de materiales de alta calidad y procesos de construcción adecuados (West et al., 2005). Por su parte, Roffe y Roffe (2002) realizaron un estudio similar y demostraron que una baja adherencia entre las capas del pavimento puede reducir la vida útil del mismo, de veinte a siete años

5.2. Descripción del trabajo monolítico de la interfaz

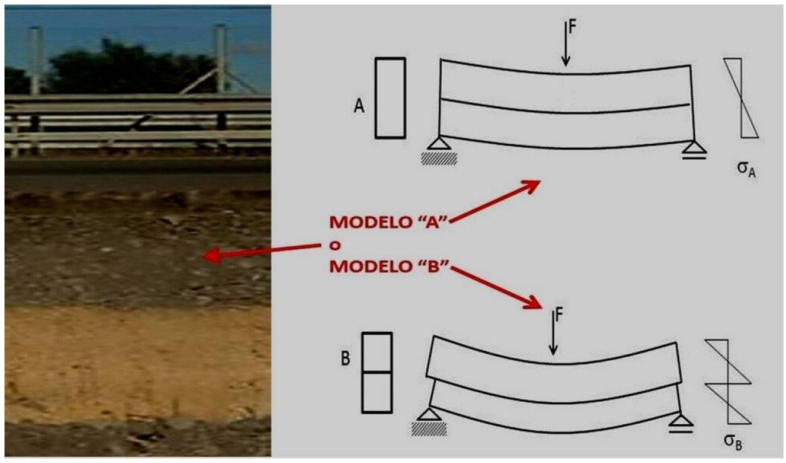
El crecimiento de las ciudades modernas exige el desarrollo de infraestructura vial, capaz de soportar mayor número de repeticiones y carga, esto se traduce en la necesidad de mayores espesores en la capa de rodadura. Dichas carpetas se construyen en muchas ocasiones en dos o más capas, con el fin de garantizar el grado de compactación exigido en las especificaciones, la carpeta asfáltica se considera monolítica en el cálculo estructural y se asume que existe una perfecta adherencia entre las distintas capas instaladas, sin embargo, esto no ocurre en la realidad

(Álvarez, C, 2007). Para lograr una buena adherencia, se emplea un riego de adherencia o “riego de liga”, la cual es una aplicación con espesor delgado y cubrimiento uniforme del área a ser pavimentada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado sobre un pavimento existente, para asegurar la adherencia entre la superficie de las capas asfálticas que se superpon (Alvarez, C, 2007).

Los pavimentos flexibles son un ejemplo de una viga simplemente apoyada, la cual puede estar formada por varias capas de espesor delgado, colocadas unas sobre otras, donde sería menos resistente a la flexión que una viga monolítica de igual altura total, o que la misma viga de delgadas capas, pero con ellas adheridas fehacientemente entre sí. Esto puede demostrarse con la teoría básica de la flexión, que dice que la tensión debida a ella en cualquier sección es directamente proporcional a la relación entre el momento flector y su módulo resistente. Como este último es, a su vez, directamente proporcional al cuadrado de la altura en una sección rectangular (como modelo simplificado), se evidencia la importancia de poseer espesores de capa considerables y netamente adheridos entre sí, como se presenta en la Figura 1 (Rivera, J. 2022).

Figura 1

Perfil del pavimento multicapa



Nota. Por J. Rivera, 2022. La adherencia entre capas de un pavimento flexible. Tecnología Ingeniería Construcciones N° 008 de 2022. https://dolmen.com.ar/la-adherencia-entre-capas-de-un-pavimento-flexible

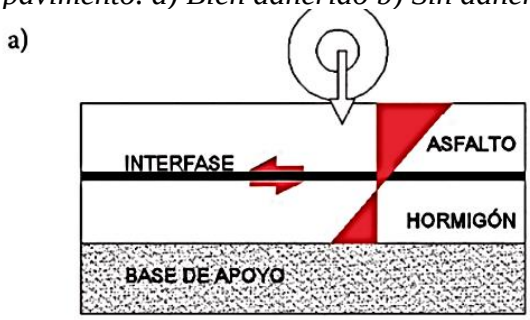
La adherencia entre capas garantiza el buen desempeño del pavimento, haciendo que este trabaje solidariamente. La falta de adhesión entre capas se traduce en una mala distribución de las tensiones generadas por el tránsito, en el espesor total del pavimento. (Ricci, 2011).

Respecto a problemas sobre la aplicación del riego de liga, algunos autores mencionan que la falta de liga entre capas ocasiona problemas como fisuras y desplazamientos entre capas que se pueden prevenir asegurando la calidad de los materiales, así como una correcta fase constructiva (Ontiveros, 2013). Otros autores informaron, que incluso un ligero deslizamiento de una superposición provoca una redistribución de las tensiones dentro de un pavimento y pueden causar grandes deformaciones por tracción en la parte inferior debido a ese deslizamiento (Cornejo, 2014).

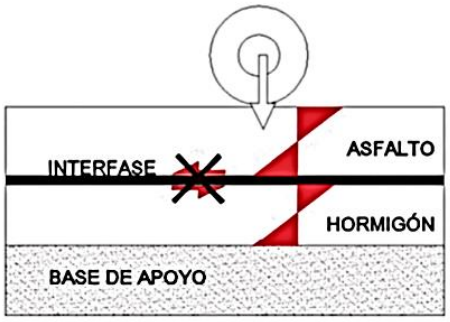
Cuando dos capas trabajan monolíticamente, siendo su interfase ligada rígidamente por el efecto de la adherencia, una única línea neutra pasa a gobernar el comportamiento mecánico del pavimento. El que la línea neutra baje, dependerá de las propiedades elásticas y espesores de las capas. Cuanto mayor es el espesor o más rígida es la capa de base, mayor es lo que descenderá la línea neutra y menores serán las tensiones de tracción producidas por la flexión en la base de la primera capa. La distribución de esfuerzos se presenta en la Figura 2 (Delbono et al, 2019).

Figura 2

Distribución de tensiones en un pavimento. a) Bien adherido b) Sin adherir



b)



Nota: Delbono et al. Métodos & Materiales / LanammeUCR / ISSN impreso: 2215-342X / ISSN electrónico: 2215-4558 / Volumen 6 / Número 1 / Diciembre, 2019

5.3. Ligantes asfálticos empleados como riego de liga

Los ligantes asfálticos se utilizan como "riegos de liga" en la construcción de pavimentos asfálticos para mejorar la adherencia entre las capas del pavimento. El riego de liga es una capa fina de asfalto que se aplica sobre la capa de base antes de colocar la capa de rodadura (LanammeUCR,2019). La función de esta capa es mejorar la adherencia entre la capa de base y la capa de rodadura, ayudando a distribuir las cargas de manera uniforme y aumentando la resistencia del pavimento a la deformación y los daños por carga (Anguas et al., 2002).

Existen diferentes tipos de ligantes asfálticos que se utilizan como riegos de liga, incluyendo asfaltos cáusticos, asfaltos modificados con polímeros y asfaltos de alto contenido de asfaltenos. El tipo de ligante asfáltico utilizado dependerá del diseño del proyecto y las condiciones climáticas y del suelo. Es importante asegurar que el ligante asfáltico utilizado cumpla con los estándares de calidad especificados en el proyecto, (LanammeUCR,2019).

La Federación Internacional de Emulsiones Bituminosas (IBEF), llevó a cabo un estudio mundial sobre la aplicación de la adherencia, en el que siete países (España, Francia, Italia, Japón, Países Bajos, Reino Unido y los Estados Unidos) respondieron una encuesta a través de sus asociaciones profesionales. Los resultados indicaron que el material de adherencia más

utilizado es la emulsión catiónica, y los tipos más comunes utilizados para capas de adherencia incluyen grados de emulsión de fraguado lento: SS-1, SS-1h, CSS-1 y CSS-1h, y de fraguado rápido: RS-1, RS-2, CRS-1, CRS-2, CRS-2P (modificada con polímeros) y CRS-2L (modificada con látex) (Mohammad et al., 2012).

5.4. Factores que afectan la adherencia

Existen varios factores que pueden influir en la adherencia entre las capas de un pavimento asfáltico, algunos de ellos son:

- **Materiales para riego de liga:** los ligantes asfálticos, comúnmente empleados en riegos de liga, poseen propiedades fisicoquímicas diferentes, pues su composición varía significativamente. La norma ASTM D8 “Standard Terminology Relating to Materials for Road and Pavements”, define riego de liga, como la aplicación de material bituminoso en una superficie relativamente no absorbente para proveer una completa unión entre una superficie vieja y una nueva (Programa de Infraestructura del Transport [PITRA], 2017). Los tipos más conocidos de emulsiones asfálticas utilizadas en los riegos de liga son las emulsiones de rompimiento lento, también conocidas como "células abiertas" o "emulsiones de baja esfuerzo". Estas emulsiones mantienen su consistencia líquida durante un período prolongado de tiempo, lo que permite una mayor movilidad y una mejor adherencia en comparación con las emulsiones de rompimiento rápido. Además, las emulsiones de rompimiento lento son resistentes a las condiciones climáticas adversas y son ideales para aplicaciones en pavimentos asfáltico. Las emulsiones de rompimiento lento son: SS-1, SS-1h, CSS. También se cuenta con emulsiones de rompimiento rápido, conocidas como "células cerradas" o "emulsiones de alta esfuerzo", tienen un tiempo de fraguado corto, lo que permite una rápida solidificación y resistencia mecánica. Sin embargo, su movilidad es limitada y su adherencia

es menor comparadas con las emulsiones de rompimiento lento. Estas emulsiones son ideales para aplicaciones en pavimentos de alta tráfico y de alta resistencia mecánica. Las emulsiones de rompimiento rápido son RS-1, RS-2, CRS-1, CRS-2, CRS-2P (modificada con polímero) y CRS (Mohammad et al., 2012). Recientemente se realizaron diversos estudios que demostraron que el nivel de resistencia al corte alcanza distintos valores dependiendo de la emulsión utilizada como riego de liga, y en general, se obtienen mejores resultados con aquellas emulsiones de residuo asfáltico de mayor dureza (Vargas, 2008).

Tasa de aplicación del riego de liga: se aplica por unidad de área en una capa de pavimento asfáltico. Esta tasa se mide en toneladas por metro cuadrado (t/m^2) o en libras por pie cuadrado (lbs/ft^2). La tasa de aplicación de ligante es un factor clave en la construcción de un pavimento asfáltico, ya que influye en las propiedades mecánicas y la durabilidad del pavimento, debe ser especificada por el diseño del proyecto y debe cumplir con los estándares establecidos; generalmente se determina en función de factores como el tráfico, clima y las condiciones del suelo. Una tasa de aplicación de ligante adecuada puede ayudar a garantizar una buena adherencia entre las capas, resistencia a la deformación y una resistencia al agua y a la intemperie (Rodríguez, 2013). Seleccionar el material idóneo y la tasa de aplicación correcta es de vital importancia para el desempeño de la adherencia entre capas de pavimento. Superficies con distintos tiempos de operación y condiciones superficiales (nueva, vieja o perfilada), requieren diferentes aplicaciones para lograr una buena adherencia. El manual de pavimentación de mezcla asfáltica en caliente (USACE, 2000), especificó que la dosis asfalto residual debe estar entre 0,18 y 0,27 l/m^2. El límite inferior del rango se recomienda para capas nuevas, el intermedio para superficies en condiciones normales y el rango superior para pavimentos asfálticos viejos, oxidados, fisurados o perfilados y para pavimentos de concreto

hidráulico (PITRA, 2017). Se ha mencionado que el uso de la capa de adherencia aumenta la unión entre las capas intermedias del pavimento. Sin embargo, todavía hay algunas investigaciones que muestran efectos diferentes y contrarios a la aplicación de la capa de adherencia. Molenaar et al. (1986) examinaron los efectos del uso de capas intermedias en la resistencia a la adherencia de un sistema de pavimento multicapa e indicaron que las muestras con y sin capa de adherencia mostraban la misma resistencia al corte (Molenaar et al. 1986) Una investigación realizada por King y May (2003) sobre la simulación de la estructura del pavimento mostró que la disminución del estado de adherencia desde una adherencia total (sin deslizamiento) hasta un nivel de adherencia del 90% (deslizamiento parcial) aumentaba significativamente los valores de tensión y deformación en el pavimento y disminuía la vida útil final en torno al 50% (King y May 2003). Roffe y Chaignon (2002) realizaron un estudio similar y demostraron que una baja adherencia entre las capas del pavimento puede reducir la vida útil del mismo de 20 a 7 años (Roffe y Chaignon 2002).

El uso de la tasa de aplicación adecuada de la capa de adherencia también puede mejorar la adherencia entre las capas y resultar en el aumento total de la vida útil del pavimento. La fuerza de adhesión entre las capas del pavimento es una función tanto de la cohesión entre las capas como de la fricción disponible entre ellas. La aplicación del riego de liga proporciona la cohesión necesaria entre las capas, mientras que una dosis excesiva de riego de adherencia puede disminuir las fuerzas de enclavamiento y la fricción entre las capas y aumentar la posibilidad de deslizamiento entre ellas. Las cantidades elevadas de riego de liga también pueden aumentar la posibilidad de exudación del pavimento y disminuir la resistencia al deslizamiento del pavimento y provocar colisiones de tráfico (Raposeiras et al. 2013). Por lo

tanto, la elección de un tipo adecuado de capa de adherencia con una tasa de aplicación óptima desempeña un papel clave en la adhesión de las capas del pavimento (Biglari, 2018). Las condiciones superficiales de la capa donde se aplicará el riego son importantes para garantizar una adherencia adecuada del ligante al pavimento. Algunas de las condiciones superficiales que deben ser consideradas incluyen: limpieza, humedad, temperatura y textura. Es importante anotar, que estas condiciones pueden variar dependiendo del tipo de liga y del tipo de pavimento, pero en general, una superficie limpia, húmeda, caliente, con una textura adecuada y en buen estado, es la mejor para garantizar una adherencia adecuada. El Instituto Norteamericano del Asfalto especifica un rango de tasa de aplicación de ligante residual entre 0.02 y 0.05 gal/yd^2 (90 g/m^2 y 220 g/m^2) (Mohammad, y otros, 2012) sin embargo, un estudio realizado por NCHRP, mostró una variación significativa en relación con la dosificación y tipo de emulsión utilizada, pero no se pudo encontrar una tasa óptima de aplicación (Dorado y Rosero, 2018). Es importante mencionar que estas tasas son una recomendación general y pueden variar dependiendo del proyecto específico.

Se ha determinado que el exceso de riego de liga puede tener efectos negativos en la adherencia del pavimento asfáltico, ya que una tasa de aplicación excesiva puede causar que el ligante se acumule en la superficie del pavimento, dificultando la adherencia entre el ligante y la capa base (Dorado y Rosero, 2018). Además, una tasa de aplicación excesiva puede causar que el ligante se evapore rápidamente o una capa sobrante de liga, lo que implica en que el ligante no se adhiera adecuadamente al pavimento. Esto lleva a una reducción en la resistencia mecánica del pavimento y un aumento en la susceptibilidad al daño por deslizamiento, afectando negativamente la resistencia mecánica y la durabilidad del pavimento asfáltico (LanammeUCR,2019). Por otro lado, una tasa de aplicación insuficiente,

puede causar que el ligante no se adhiera adecuadamente al pavimento debido a que no hay suficiente cantidad para cubrir completamente la superficie, reduciendo cualquier respuesta mecánica de adhesividad, sin embargo, hay casos particulares donde en diversas condiciones puede existir una mayor adherencia sin la aplicación de un riego de liga, producido por una elevada temperatura de la mezcla asfáltica en el momento de su riego (Raposeiras, Castro-Fresno, Vega-Zamanillo, & Rodriguez-Hernandez, 2013).

- **Tiempo de curado del riego de liga:** La emulsión asfáltica se compone de agua y asfalto, y antes de que se rompa, su color es café. Sin embargo, una vez que la emulsión se rompe, el agua se separa del asfalto y el color de la emulsión gradualmente cambia de café a negro. Esto se debe a que el asfalto es insoluble en agua y, por lo tanto, se separa cuando la emulsión se rompe (PITRA, 2017). La curación de una emulsión asfáltica puede tardar entre una y dos horas, dependiendo de las condiciones ambientales. Sin embargo, existen estudios que presentan opiniones contradictorias sobre cuándo es el momento adecuado para colocar la siguiente capa de asfalto sobre la emulsión curada. Por un lado, algunos estudios sugieren que es necesario esperar a que la emulsión alcance su quiebre previo a la colocación de la siguiente capa asfáltica, ya que esto garantizará una adherencia adecuada entre las capas y una mayor durabilidad del pavimento. Por otro lado, otros estudios indican que no es recomendable esperar demasiado tiempo antes de colocar la capa adicional, ya que esto puede hacer que la emulsión pierda sus propiedades adhesivas (Guerrero, 2015).

  Un factor importante a tener en cuenta es la temperatura y la humedad, ya que estas condiciones pueden afectar significativamente el tiempo de curado de la emulsión. Por ejemplo, una temperatura más alta y una humedad más baja permiten una curación más rápida, mientras que una temperatura más baja y una humedad más alta pueden retrasar el

proceso de curado (LanammeUCR,2019). Actualmente, hay estudios que sugieren que no es necesario esperar un tiempo de curado para el riego de liga, ya que el quiebre de la emulsión se produce inmediatamente debido a la elevada temperatura de la capa de asfalto recién colocada, el agua en la emulsión se evapora y se escapa a través de la mezcla suelta a la superficie (Vargas, 2008). Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta teoría no es compartida por todos los expertos en la materia.

El tiempo de curado de la capa de adherencia es el último parámetro que afecta a la calidad de la unión de la interfaz. Está claro que no hay un acuerdo completo entre los investigadores y las agencias sobre el tiempo adecuado de colocación de la segunda capa de hormigón asfáltico tras la aplicación de la capa de adherencia (Biglari, 2018). Según una investigación realizada por Roffe y Chaignon en 2002, el tiempo de curado del ligante emulsionado tiene efectos significativos en su rendimiento. Este tiempo puede variar entre 20 minutos para la emulsión rota y algunas horas para la emulsión seca (Roffe y Chaignon 2002). Deysarkar demostró que la colocación de la segunda capa cinco minutos después de la pulverización de la capa adhesiva no cambiaba la fuerza de adhesión de la interfaz en comparación con la colocación inmediata. Indicó que la fuerza de adhesión aumentaba significativamente cuando la colocación de la segunda capa comenzaba 30 y 60 minutos después de la aplicación de la capa adhesiva (Deysarkar 2004). Chen y Huang también mostraron que la fuerza de adherencia aumenta considerablemente cuando la segunda capa se extiende y compacta después del tiempo de rotura de la capa adhesiva de emulsión (Chen y Huang 2010). Raposeiras et al (2013) revisaron varias investigaciones sobre los efectos del tiempo de curado en la resistencia de adherencia de las capas de pavimento y declararon que el tiempo de curado óptimo de 40 a 50 minutos debería considerarse para lograr una resistencia de

adherencia adecuada (Raposeiras et al. 2013). Basándose en Paul y Scherocman (1998), muchos DOTs dedican un tiempo específico al curado y fraguado del ligante emulsionado antes de colocar la segunda capa (Paul y Scherocman 1998). Tres departamentos de transportes y servicios público (DOT) declararon que consideran el máximo tiempo posible para el curado de la capa de adherencia. El departamento de transportes y servicios público de Alaska considera 2 horas para la emulsión CSS-1, el departamento de Arkansas considera 72 horas para el curado de la emulsión SS-1 y el DOT de Texas utiliza 45 minutos para el curado de las emulsiones SS-1 y MS-2 (Cho 2016)

- **Estado de la interfaz en la superficie:** se refiere al estado de la interfaz entre dos materiales en la superficie en construcción, ya sea la unión entre dos capas o entre dos elementos diferentes, como el asfalto y el suelo subyacente (Coria et al,2018). La condición de superficie de la interfaz es crucial para garantizar una adherencia adecuada entre los materiales y evitar problemas de debilidad o quiebre estructural. La condición de superficie de la interfaz puede ser evaluada mediante técnicas como el ensayo de tracción, la microscopía electrónica de barrido y óptica, estas técnicas permiten examinar la interfaz a nivel microscópico para evaluar la adherencia, rugosidad y limpidez de la interfaz.
  En general, una interfaz limpia y rugosa es deseable para garantizar una adherencia adecuada, mientras que una interfaz suave y lisa puede indicar una falta de adherencia. Otros aspectos a considerar son: condición de la superficie del pavimento (nuevo o antiguo), textura, limpieza y presencia de agua (Colque;2019). Diversos estudios han recomendado aplicar riego de liga sobre superficies limpias y secas, ya que han determinado que la presencia de agua o polvo antes del riego de liga es perjudicial para la adherencia. El polvo de la intemperie puede afectar negativamente la colocación de la primera capa de asfalto y el riego de liga, causando

problemas de adherencia, lo que puede llevar a una menor resistencia a la abrasión y una mayor susceptibilidad a los daños causados por el tráfico (Colque;2019). Además, el polvo puede interferir con la capacidad de la liga de adherirse correctamente a la capa de asfalto (LanammeUCR,2019). Por lo tanto, se recomienda limpiar cuidadosamente la superficie de la carretera antes de la colocación de la primera capa de asfalto y el riego de liga. En pavimentos existentes, se tiene buena adherencia en superficies fresadas y en nuevos, hay diferencias en cuanto a si se obtiene mayor adherencia con árido graduado fino o grueso. (Vargas, 2008).

- **Tipo de mezcla asfáltica y Energía de compactación:** El tipo de mezcla asfáltica y la energía de compactación son dos factores críticos en el diseño y construcción de carreteras (Anguas et al., 2002). La energía de compactación se refiere a la cantidad de energía utilizada para compactar la mezcla asfáltica en una capa de pavimento (Reyes et al., 2006). La elección correcta del tipo de mezcla asfáltica y un mayor grado de compactación, es esencial, para garantizar que el pavimento tenga una resistencia adecuada, más durabilidad y una buena resistencia a la deformación.

5.5. Efectos del riego de liga en el desempeño del pavimento

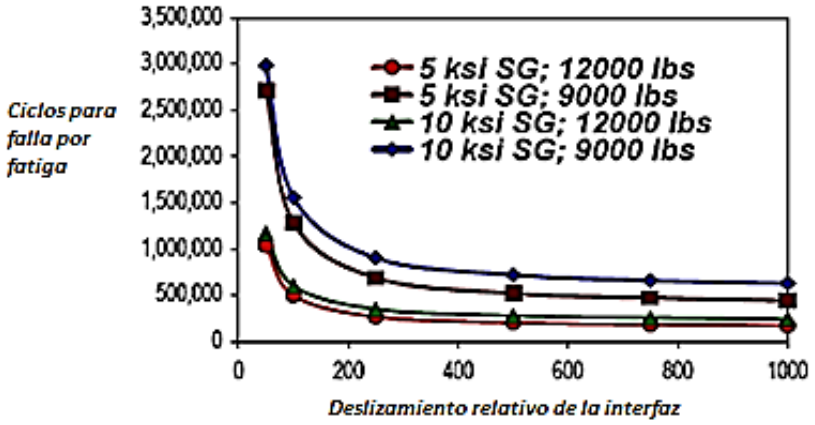
El riego de liga mejora la compacidad del pavimento, llevando a una menor porosidad y mayor resistencia a la deformación, aumenta la resistencia a la fatiga y al desgaste, lo que traduce en una mayor durabilidad del pavimento, brinda una mejor resistencia al agua reduciendo el riesgo de daños por infiltración dando un comportamiento de estabilidad al pavimento, brinda resistencia al calor y a la humedad, reducción en el costo de mantenimiento, debido a la menor necesidad de reparaciones y reemplazo del pavimento (PITRA, 2017).

Por otro lado, en otros estudios se evaluaron el efecto de la adherencia en el desempeño de pavimentos usando diferentes modelos mecanicistas (King & May, 2003), presentaron un

análisis del efecto de la adherencia entre capas en carpetas asfálticas. Con ayuda del programa Bisar, analizaron la respuesta estructural de un pavimento con una capa de mezcla asfáltica de 100 mm de espesor adherida a una base granular de 150 mm de espesor, se consideraron dos grados de rigidez, se utilizaron dos niveles de solicitaciones 5 y 10 ksi. La interfaz entre capas fue modelada, variando la condición de adherencia desde una de desplazamiento relativo nulo entre ellas (adherencia perfecta), hasta una de desplazamiento máximo (adherencia nula) pavimento (PITRA, 2017). La Figura 3, indica la vida del pavimento bajo solicitación por carga cíclica hasta la falla por fatiga, resultando que la vida útil decrece alrededor de 50 % cuando la adherencia se reduce en un 10 %.

Figura 3

Efecto en la fatiga del cambio en la adherencia de las capas de mezcla asfáltica



Nota. Tomado del Informe LM-PI-UMP-066-R1, PITRA,2017, Arrieta Fabian Elizondo. Mayo de 2017 Fuente (King & May, 2003)

5.6. Ensayo de corte LCB

Este ensayo fue desarrollado por el Laboratorio de Caminos de Barcelona (LCB), en el centro de investigación en ingeniería de caminos y aeropuertos, que forma parte de la Universidad Politécnica de Cataluña. Es un ensayo de ejecución sencilla, cuyo objetivo es medir

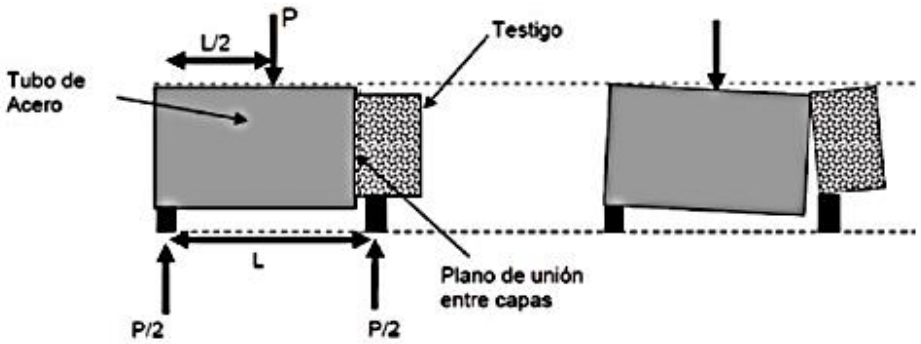
la resistencia a las tensiones tangenciales provocadas por la aplicación de una fuerza de corte que se producen en la unión de dos capas asfálticas, adheridas o no por un riego de liga de adherencia, también se mide la deformación de una de las capas respecto a la otra (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2008).

El ensayo se encuentra establecido bajo la norma NLT-382/08 titulada “Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte”, permite tanto el control de calidad alcanzada en obra mediante la rotura de testigos extraído, como la evaluación del efecto de diferentes riegos de adherencia mediante la rotura de probetas fabricadas en laboratorio de doble capa de cuatro pulgadas de diámetro (Ontiveros, 2013).

El método consiste en colocar un espécimen de ensayo en posición horizontal, apoyado en dos puntos como una viga simplemente apoyada, al que se le aplica una carga P centrada de tal modo que el espécimen esté sometido a flexión, y que la solicitación en el plano de debilidad (plano de unión de las capas) sea un esfuerzo cortante con un valor de carga equivalente a P/2, como se presenta en la Figura 4. El plano de debilidad, sobre el cual se desea efectuar la determinación, quedará en la cercanía inmediata de uno de los apoyos (LanammeUCR, 2019).

Figura 4

Esquema de carga sobre la probeta



Nota. Tomado de Métodos materiales, Lanamme UCR, diciembre 2019.

Los detalles del ensayo son los siguientes:

• La velocidad de carga del ensayo es de 1.27 mm/min.

• Se registra la carga y deformación a intervalos de 10 segundos hasta la falla.

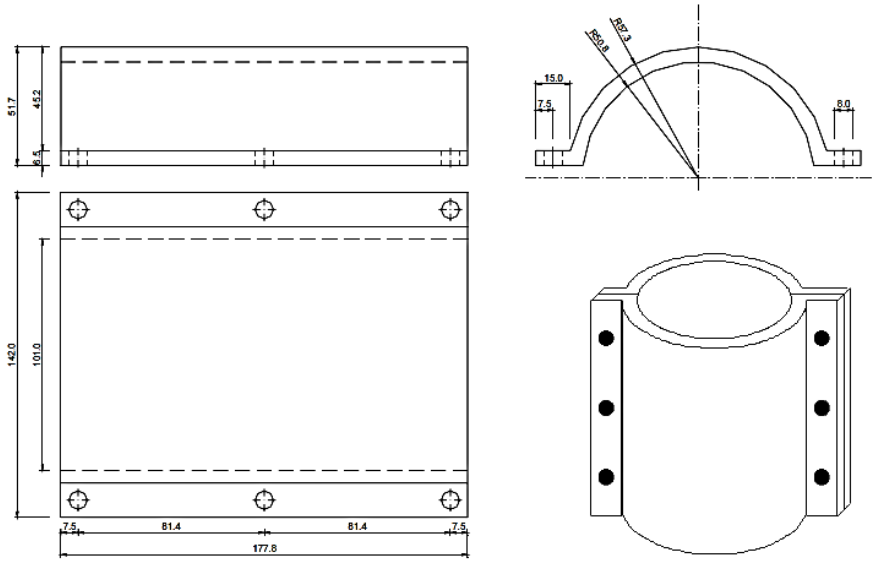
• El punto de carga debe ser a la mitad de la separación entre los puntos de apoyo.

• El ensayo se puede realizar a diferentes temperaturas (Cornejo, 2014, p. 67).

Se emplea el dispositivo B presentado en la Figura 5, el cual consiste en una mordaza cilíndrica desmontable en dos mitades, según un plano que corte a dos generatrices opuestas, en la que se introduce el testigo de ensayo. La mordaza debe tener un diámetro interior de 101 ó 150 mm y está provista de un sistema de cierre mediante tornillos u otro procedimiento adecuado, que mantenga el testigo firmemente sujeto en su interior. La interfaz del testigo debe sobresalir 5 mm del extremo de la mordaza (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2008).

Figura 5

Dimensiones del dispositivo B

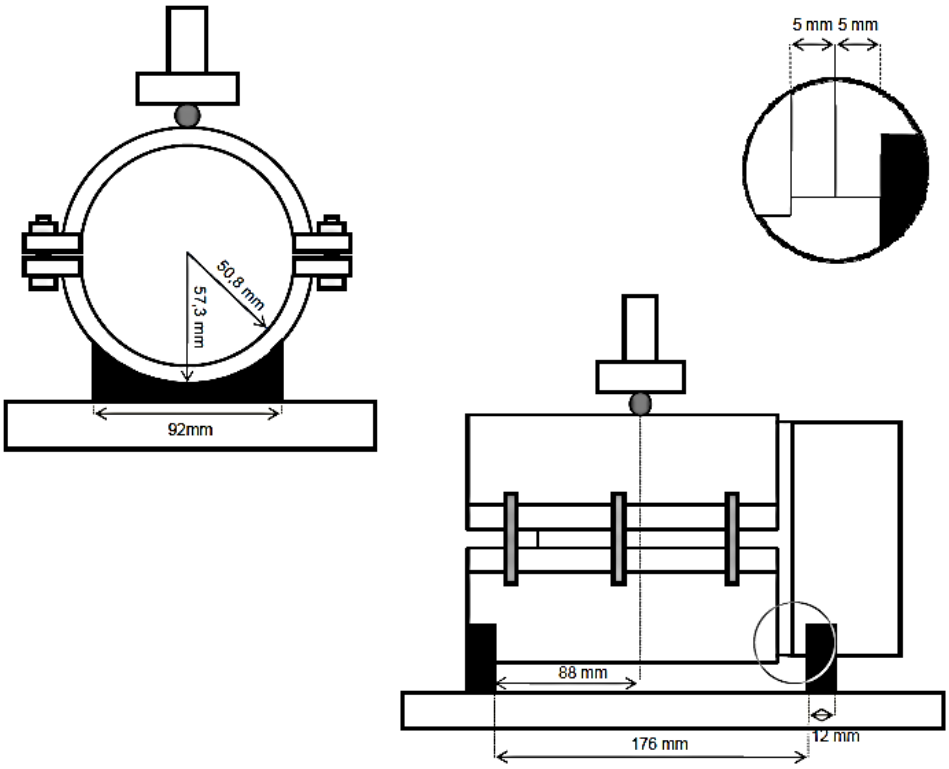


Nota. Tomado de Norma NLT-382/08 Evaluación de la adherencia entre capas de firme.

Una vez dispuesto el testigo dentro de la mordaza y cerrada ésta, se coloca el conjunto como se presenta en la Figura 6, en posición horizontal sobre una base con dos puntos de apoyo separados 176 mm. La separación entre la interfaz del testigo y el punto de apoyo más cercano a dicha interfaz será también de 5 mm. El punto de aplicación de la carga estará en una posición equidistante de los dos puntos de apoyo del conjunto, el cual actúa, por tanto, como una viga biapoyada, donde la sección de ensayo, al estar muy próxima al punto de apoyo, sólo está sometida a esfuerzo cortante (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2008).

Figura 6

Esquema Dispositivo de Ensayo B



Nota. Tomado de Norma NLT-382/08 Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte.

Dentro de las ventajas que posee esta metodología de ensayo se destaca su fácil implementación, además de que la baja velocidad de ensayo permite registrar la carga vs deformación, sin necesidad de un equipo de adquisición de datos. Por otro lado, la principal desventaja es, que con esta metodología, la deformación relativa entre las capas de la unión del testigo o probeta no se puede determinar directamente, pues durante el ensayo se registra la deformación del pistón de la prensa, que en este caso difiere de la deformación relativa entre capas, puesto que ocurre un efecto de pivote durante el ensayo. (Cornejo, 2014, p. 67)

6. Metodología

6.1. Zona de estudio

El presente trabajo se desarrollará en el municipio de San Juan de Pasto, la capital del departamento de Nariño. Está ubicado al suroccidente del país cerca de la frontera con Ecuador, tiene una extensión territorial aproximada de 1.181 km^2 y con una población de 352.356 habitantes (DANE,2018). Los ensayos de laboratorio se ejecutaron en el Laboratorio del Ing. Juan Carlos Trujillo, ubicado en la misma ciudad; El estudio se desarrolla empleando los materiales producidos en la planta asfáltica de la empresa PANAVIAS instalada en el casco urbano del municipio de Pasto, pero tiene cobertura a todo el territorio departamental y en ella se emplean ligantes bituminosos comercializados en el país.

6.2. Esquema del trabajo propuesto

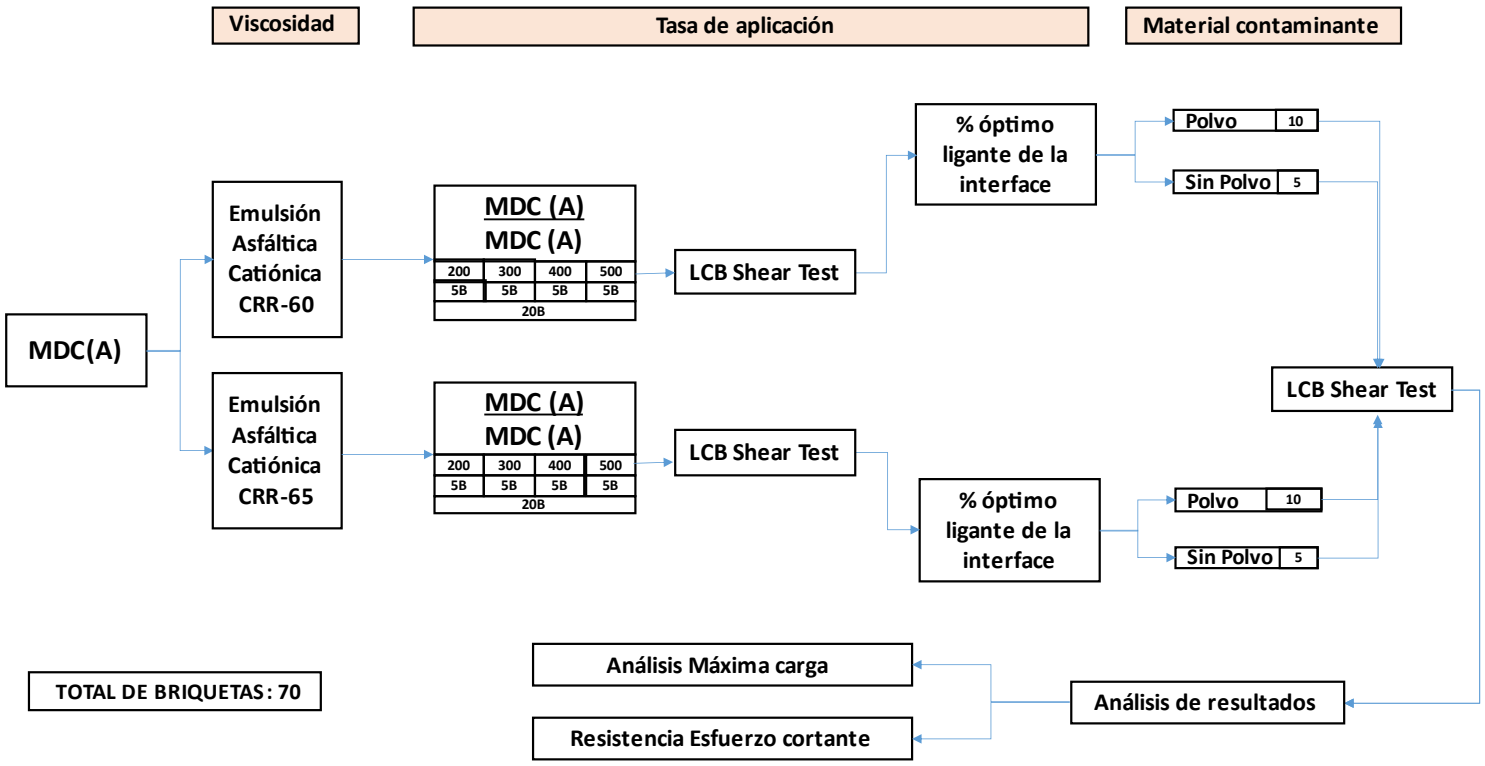
Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se define el diseño metodológico con dos componentes: datos y método del tipo deductivo con enfoque cuantitativo, en donde se plantea desarrollar un diseño experimental a partir de unas variables previamente determinadas (Dorado y Rosero, 2018). En los datos se recopila y caracteriza la información con ayuda del ensayo de corte LCB, en el que se determina la resistencia al cizallamiento de la interfaz generada entre las capas unidas por el riego de liga. Se procede al registro de los datos y posterior organización, procesamiento y análisis estadístico a partir de la elaboración y ensayo de briquetas.

Se plantea un esquema del trabajo a desarrollar donde se presentan las etapas y número de especímenes que se elaboraran en un total de 70, dicho esquema se presenta en la Figura 7.

A continuación, se presenta el plan de trabajo a desarrollar en el presente trabajo:

Figura 7

Esquema de investigación propuesto



En el plan de trabajo inicial se había definido el estudio de dos tipos de emulsiones con la elaboración de 70 especímenes, pero finalmente se elaboraron 76 en total, distribuidos de la siguiente manera: para cada emulsión se tomaron cuatro tasas de aplicación y con cada tasa se elaboraron 5 muestras obteniendo un total de 40 especímenes, luego con la finalidad de evaluar la incidencia del polvo en cada tipo de mulsión se toman 3 condiciones de polvo y para cada condición se elaboraron 6 briquetas obteniéndose un total de 36 en total. Por lo anterior, se elaboraron y fallaron 76 especímenes en total para las dos emulsiones estudiadas.

6.3. Caracterización de los materiales

Esta investigación se realizó empleando mezcla densa en caliente MDC-19 y como ligante bituminoso asfalto 60-70, se acopiaron los materiales, como el cemento asfáltico, los agregados minerales y las emulsiones asfálticas convencionales CRRR-60 y CRR-65. Todos estos materiales son necesarios para elaborar los especímenes de prueba requeridos para el estudio y cumplieron las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías del año 2022 adoptadas mediante resolución número 4561 de 29 de noviembre del 2022, cabe resaltar que las Normas de ensayo de materiales para carreteras son las mismas del año 2013 y se ha tomado la última actualización vigente en la página del INVIAS con fecha del 06 de mayo de 2022.

6.3.1. Agregado mineral

Los agregados minerales que constituyen la mezcla densa en caliente tipo 19 (MDC-19) son:

a) Grava pasante 1" y retenido 3/4" del río Tellez en una proporción del 10%.
b) Grava pasante 3/4" y retenido 1/2" del río Téllez en una proporción del 21%.
c) Gravilla pasante 1/2" arena del río Guáitara en una proporción del 9%.
d) Arena del río Téllez Pasante de 1/2" agregado fino en una proporción del 60%.

La granulometría del material obtenido de la combinación de pétreos se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1

Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica

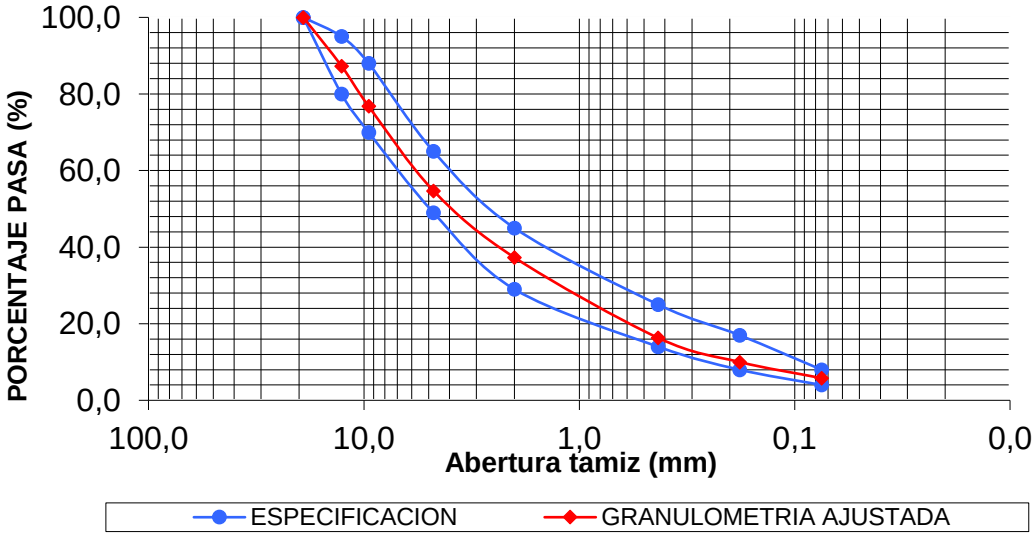
Tamiz (in)	Abertura (mm)	ESPECIFICACIÓN INVIAS MDC-19 Artículo 450-22		
		Min	Mezcla Obtenida	Max
3/4"	19.1	100	100	100
1/2"	12.7	80.0	87.3	95.0
3/8”	9.5	70.0	76.8	88.0
N° 4	4.75	49.0	54.7	65.0
10	2	29.0	37.3	45.0
40	0.43	14.0	16.3	25.0
80	0.18	8.0	10.0	17.0
200	0.075	4.0	5.8	8.0

Fuente: Diseño Marshall Empresa PANAVIAS.

Con la especificación granulométrica se grafica el huso granulométrico de la Figura 8.

Figura 8

Granulometría del agregado mineral para MDC-19



Fuente: Esta investigación.

Además de la granulometría realizada se debe cumplir con los ensayos físicos, mecánicos y químicos establecidos en las especificaciones generales de construcción del INVIAS relacionadas en el Artículo 450-22; los resultados de estos laboratorios se obtienen del diseño Marshall de la empresa PANAVIAS y se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Caracterización de agregado mineral.

Propiedad	Norma de ensayo INV	Resultado	Unidad	Requisito
Desgaste L.A. 500 revoluciones 100 revoluciones	E-218	 17.5 3.5	 % %	 ≤ 25 ≤ 5
Abrasión Micro-Deval	E-238	10.7	%	≤ 20
Resistencia 10% finos Valor en seco Relación húmedo/seco	E-224	 210 76	 kN %	 ≥ 110 ≥ 75
Solidez en sulfato de magnesio	E-220	Grueso: 6 Fino: 10	%	≤ 18
Impurezas en agregado grueso	E-237	0.28	%	≤ 0.5
Índice de plasticidad	E-125 y E-126	NP	%	NP
Equivalente de arena	E-133	70	%	≥ 50
Azul de metileno	E-235	N/A	mg/g	≤ 10
Partículas planas y alargadas	E-240	0.3	%	≤ 10
Caras fracturadas Una cara Dos caras	E-227	 90.9 78.3	 % %	 ≥ 85 ≥ 70
Angulosidad de la fracción fina	E-239	45.3	%	≥ 45
Adhesividad Agregado fino	E-774	8		≥ 4
Absorción Agregado grueso Agregado fino	 E-223 E-222	 1.54 2.98	 % %	

Fuente: Laboratorio empresa PANAVIAS de fecha noviembre 2022

De acuerdo a los resultados obtenidos de la caracterización y teniendo en consideración que los materiales provienen de fuentes de río, los agregados pétreos evaluados son materiales

que cumplen todos los ensayos de caracterización exigidos por la normatividad del INVIAS para la fabricación de mezclas asfálticas, se puede concluir que el agregado grueso y fino tiene una buena gravedad específica, es un material no plástico con una resistencia a la abrasión y desgaste adecuada, ya que cumple con los valores establecidos en la norma para el ensayo de desgaste, Micro-Deval y solidez en sulfato de magnesio y que por proceder de un proceso de trituración, cumple con los porcentajes mínimos exigidos de caras fracturadas. Con relación a la fracción fina, se observa que la arena por ser proveniente de una fuente de rio, cumple en manera muy cercana al valor mínimo.

6.3.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico empleado por la planta de PANAVIAS es tipo 60/70 producido por 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 realizado por el laboratorio del Ingeniero Juan Carlos Trujillo. En la Tabla 3 se presentan los resultados de los ensayos de caracterización.

Tabla 3

Resultados de caracterización de cemento asfáltico.

Propiedades /características	**Unidades**	**Método**	**Resultado**	**Especificación**	
		ASTM		**Mínimo**	**Máximo**
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min	cm	D113	140	100	
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s	mm/10	D5	64	60	70
Punto de ablandamiento	°C	D36	49.4	45	55
Punto de inflamación	°C	D92	276	232	
Solubilidad en tricloroetileno	g/100 g	D2042	99.9	99	
Pérdida de masa	g/100 g	D2872	0.329		1.0
Índice de penetración, IP	N/A	-	-7	Reportar	
Viscosidad a 60,80,100, 135 y 150 °C	cP	ASTM D 4402		Reportar	

Fuente: Ficha de Datos de seguridad Asfalto 60-70, Ecopetrol,2019

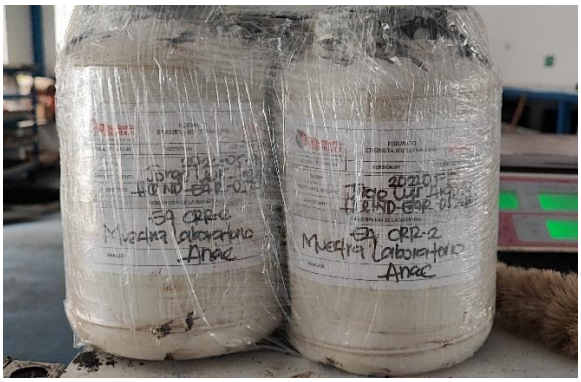
La temperatura de mezcla y compactación de laboratorio se determinan en función de la viscosidad del cemento asfáltico. Para el caso del cemento asfaltico 60-70 de Ecopetrol, la temperatura para efectuar la mezcla con los agregados pétreos es de 149±1ºC y la temperatura de compactación en laboratorio es de 139±1ºC, tomado del Diseño Marshall de la empresa PANAVIAS de nov2022.

6.3.3. Emulsión Asfáltica como Riego de Liga

Se obtuvieron muestras comerciales de emulsiones Catiónicas de rotura rápida CRR-60 o tipo 1 (CRR-1) y emulsiones Catiónicas de rotura rápida CRR-65 o tipo 2 (CRR-2) a través de la empresa Humberto Quintero (HQ), dichas muestras fueron recibidas debidamente selladas embaladas y etiquetadas, las muestras estaban acompañadas de una certificación expedida por el fabricante de la emulsión, donde se indicaban las fechas de elaboración y despacho, el tipo y velocidad de rompimiento, así como los resultados de ensayos básicos de calidad efectuados sobre las muestras entregadas, los cuales se presentan en la Tabla 4 y la Tabla 5, las muestras recibidas se presentan en la Fotografía 1 y Fotografía 2

Fotografía 1

Muestra emulsión CRR 65



Nota: Fuente el presente trabajo

Fotografía 2

Muestra emulsión CRR 65

Nota: Fuente el presente trabajo

Las muestras de emulsión entregadas estaban acompañadas del certificado de calidad y de la muestra de microscopio, en la Tabla 4 y la Tabla 5 se presenta los ensayos requeridos según la Tabla 411 del artículo 411-22 Suministro de emulsión asfáltica catiónica de las especificaciones del INVIAS para la emulsión CRR-60 y CRR-65

Tabla 4

Resultados de emulsión CRR-60.

Características	**Unidades**	**Norma Ensayos**	**Resultado**	**Emulsión**	
				Mín	**Máx**
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	s	E-763	22	20	100
Contenido de agua en volumen	%	E-761	39.24	-	40
Estabilidad en almacenamiento (24 horas), sedimentación a los 5 días	%	E-764	0.89	-	1
			1.03		5
Destilación	%	E-762	60.76	60	-
Contenido de asfalto residual					
Contenido de aceite			0	-	3
Tamizado. Retenido tamiz N° 20	%	E-765	0.02	-	0.10
Demulsibilidad %	%	E-766	70.26	40	-
Carga de partícula	-	E-767	Positiva	Positiva	
pH		E-768	2.51	-	5
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE DESTILACÓN					
Penetración (25°C, 100g, 5 s)	0.1 mm	E-706	60.0	60	100
Ductilidad a 25 °C	cm	E-702	98	40	0
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99.99	97.5	-

Fuente: Humberto Quintero, certificado de calidad, HQIND-EAR-0522-002. Mayo 2022

Tabla 5

Resultados de emulsión CRR-65.

Características	Unidades	Norma Ensayos	Resultado	Emulsión	
				Mín	Máx
Viscosidad Saybolt Furol a 50 °C	s	E-763	110	100	400
Contenido de agua en volumen	%	E-761	33.10	-	35
Estabilidad en almacenamiento (24 horas), sedimentación a los 5 días	%	E-764	0.46	-	1
			2.21		5
Destilación	%	E-762	66.90	65	-
Contenido de asfalto residual					
Contenido de aceite			0.00	-	3
Tamizado. Retenido tamiz N° 20	%	E-765	0.024	-	0.10
Demulsibilidad %	%	E-766	61.43	40	-
Carga de partícula	-	E-767	Positiva	Positiva	
pH		E-768	2.30	-	5
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE DESTILACÓN					
Penetración (25°C, 100g, 5 s)	0.1 mm	E-706	60.1	60	100
Ductilidad a 25 °C	cm	E-702	>100	40	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99.99	97.5	-

Fuente: Humberto Quintero, certificado de calidad, HQIND-EAR-0522-001. Mayo 2022

6.3.4. Polvo empleado como agente contaminante.

Con el fin de evaluar la incidencia del polvo en el riego de liga se empleó el material pétreo obtenido del proceso de trituración de la Mina La Marqueza ubicada en el sector Toro bajo del municipio de Pasto. El material empleado es la fracción fina pasante por el tamiz 200 proveniente del proceso trituración, con el fin de no tener incidencia de plasticidad. Se seleccionó este material como el polvo empleado, este proceso se presenta en la Fotografía 3.

Fotografía 3

Proceso de tamizado polvo como agente contaminante. a) Planta de producción, b) Material tamizado N°40, c) Pasante N°40, d) Retenido N°40, e) Tamizado N°200, f) Pasante N°200

Nota: Fuente el presente trabajo

6.4. Elaboración de la Mezcla asfáltica

Para la elección de la mezcla asfáltica se seleccionó la mezcla de mayor uso en la ciudad de Pasto, que corresponde a la mezcla densa en caliente MDC19, la cual se emplea en la mayor parte de los proyectos ejecutados en el municipio de Pasto, esta mezcla se empleó para la primera y segunda capa. Entre las características de selección de la mezcla se tiene en cuenta la densidad de la mezcla, su uso frecuente, materiales de fácil obtención y cumplimiento de las especificaciones técnicas de pavimentos del Instituto Nacional de Vías.

Se determinó la cantidad de mezcla requerida en la fabricación de los especímenes, para ello se tomaron los porcentajes definidos en el diseño Marshall de la empresa PANAVIAS, con

ello se elaboraron briquetas de prueba y se determinó que en promedio se requería 2.500 g de material por espécimen, incluido el desperdicio generado durante el proceso de elaboración de la muestra. Con la información del diseño Marshall se dosificaron los agregados pétreos previamente tamizados y secados definidos para una MDC-19. En la Fotografía 4 se presenta el proceso de pesaje de los agregados

Fotografía 4

Proceso de tamizado y pesaje a) Gradación 1/2", b) Gradación 3/8", C) Pesaje

Nota: Fuente el presente trabajo

Luego se procedió a calentar este material en el horno a una temperatura de aproximadamente 11°C por arriba de la temperatura de mezcla en laboratorio de los agregados pétreos con el ligante la cual es de 149±1ºC.y se procedió a mezclar manualmente con el asfalto 60-70 según la proporción del 5.4 % definida en el ensayo Marshall de la empresa PANAVIAS, hasta obtener una integración completa del agregado y el asfalto, observando visualmente la cobertura total del pétreo por parte del ligante, asegurando la óptima envuelta de los áridos, Se efectuó un control de la temperatura para que, una vez finalizado el amasado, ésta esté alrededor de los 139 ºC, este proceso se presenta en la Fotografía 5

Fotografía 5

a) Adición de Cemento Asfáltico b) Mezclado agregados y asfalto

Nota: Fuente el presente trabajo

La mezcla asfáltica se deja durante un tiempo hasta que adquiera la temperatura de compactación de 139 ºC, los moldes utilizados para la compactación son precalentados a esa temperatura. Luego se procedió a la compactación de la primera capa, empleando el molde descrito en el ensayo Marshall norma INV E-148, como se indica en la Fotografía 6.

Fotografía 6

Compactación manual de briquetas primera capa

Nota: Fuente el presente trabajo

6.5. Elaboración de especímenes

Los especímenes se elaboraron en su totalidad con mezcla densa en caliente MDC-19, por ser el tipo de mezcla convencional más empleado en la ciudad de Pasto. Cada espécimen tiene una altura total de 11 cm conformado de dos capas asfálticas de Mezcla Densa en Caliente tipo 19.

La primera capa, denominada capa inferior, tiene un espesor o altura de 6 cm y fue compactada en un molde de Marshall de diámetro 101.6 milímetros (4 pulgadas) empleando un martillo de impacto estándar con la energía de compactación de 34 928 lb·ft/ft3 definida en la norma del ensayo NLT-382/08, equivalente para la primera capa con una cantidad de 60 golpes por cara, como se presenta en la Fotografía 7. Se confeccionaron 38 testigos para aplicar el riego de liga con emulsión CCR-60 y 38 muestras para emplear emulsión CRR-65.

Fotografía 7

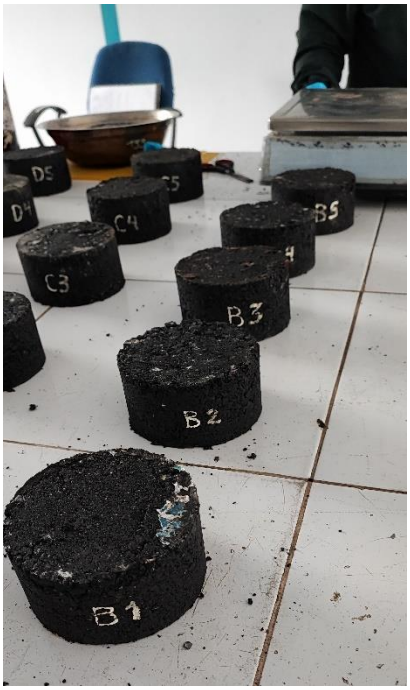
Elaboración de primera capa del espécimen de prueba con MDC-19

Nota: Fuente el presente trabajo

En la Fotografía 8 se presenta las briquetas obtenidas después del proceso de compactación de la primera capa.

Fotografía 8

Primera capa compactada organización y etiquetado



Nota: Fuente el presente trabajo

Con el fin de llevar un control durante el desarrollo del trabajo en las etapas de aplicación de emulsión como riego de liga, compactación de segunda capa y en el desarrollo del ensayo de corte con el dispositivo LCB según la normaNLT-382/08, se organizan los especímenes por grupos según el tipo de emulsión y tasa de aplicación, las cuales se escogieron teniendo en cuenta el requisito presente en la especificación INVIAS Artículo 421-22 que establece una dosificación de ligante residual del orden de 200 a 300 g/m^2, con lo cual se escogieron tales límites establecidos junto con dos valores adicionales superiores de 400 y 500 g/m^2, obteniendo ocho grupos denotados por letras desde la A hasta la H, como se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Organización de grupos de especímenes de primera capa

	CRR-60				CRR-65			
	Tasa de aplicación (g/m^2)				Tasa de aplicación (g/m^2)			
	200	300	400	500	200	300	400	500
Espécimen	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1
Peso (g)	1278.2	1246.8	1251.6	1247	1246.4	1247.6	1242.8	1284
Espécimen	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2
Peso (g)	1256.6	1248.8	1245.2	1250.6	1254.6	1248	1247.2	1269.6
Espécimen	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3
Peso (g)	1251.2	1254.2	1289.8	1245.2	1245.2	1265.8	1246.6	1247.4
Espécimen	A4	B4	C4	D4	E4	F4	G4	H4
Peso (g)	1263.2	1243.6	1250.4	1288.4	1245.8	1277	1243.6	1242
Espécimen	A5	B5	C5	D5	E5	F5	G5	H5
Peso (g)	1245	1299.4	1284.2	1246.2	1276.4	1254.4	1250.4	1248

Nota: Fuente el presente trabajo

Luego se dejó en reposo las briquetas obtenidas del proceso de compactación de la primera capa y se procedió, a aplicar el riego de liga, el cual se realizó con brocha y pincel como se indica en la Fotografía 9. Se calculó el peso en gramos, el cual se determinó de acuerdo al área de la briqueta y la tasa de aplicación de cada espécimen y al porcentaje de asfalto residual de cada emulsión, que para la CRR -60 es de 60.76% y para la emulsión CRR-65, se tiene un porcentaje de asfalto residual del 66.90% de acuerdo al certificado de calidad, HQIND-EAR-0522-002 entregado por la empresa Humberto Quintero con fecha Mayo 2022. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

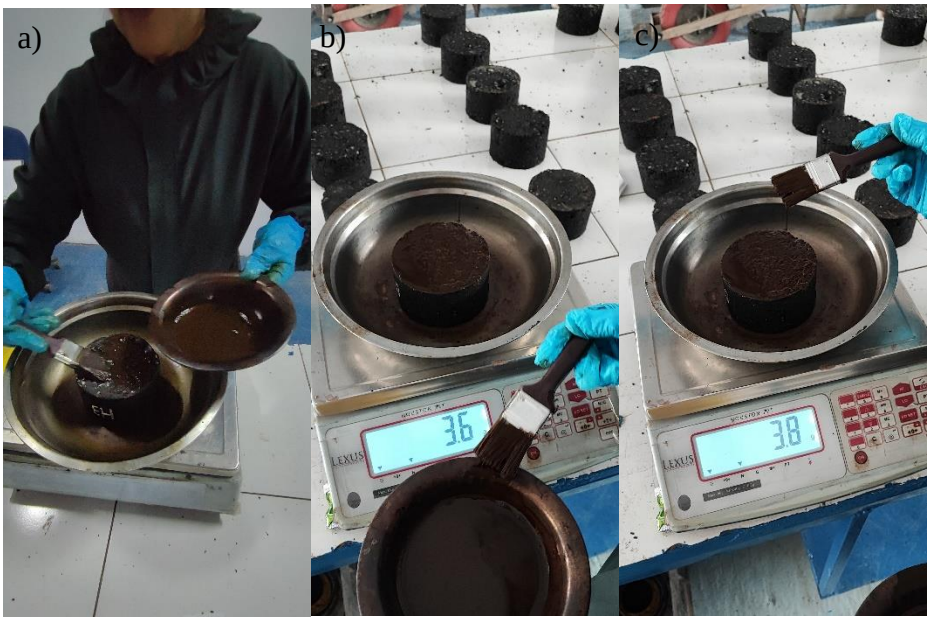
Peso de emulsión por briqueta

	Asfalto residual emulsión %	Peso emulsión (g)			
Tasa de aplicación (g/m^2)		200	300	400	500
Emulsión CRR-1 /CRR-60 (g)	60.76%	2.60	3.90	5.30	6.60
Espécimen		A	B	C	D
Emulsión CRR-2 /CRR-65 (g)	66.90%	2.40	3.60	4.80	6.00
Espécimen		E	F	G	H

Nota: Fuente el presente trabajo

Fotografía 9

Proceso de aplicación del riego de liga a) Aplicación con brocha, b) Verificación del peso de la emulsión, c) Peso final alcanzado de emulsión asfáltica



Nota: Fuente el presente trabajo

Una vez elaborados los especímenes en su primera capa y aplicada la emulsión, se llevaron al horno a una temperatura regulada entre 20 y 25 °C, por un tiempo de 24 horas, para generar el proceso de curado de la emulsión, garantizando así el rompimiento de esta como se presenta en la Fotografía 10.

Fotografía 10

a) Horno a 20 °C b) Curado emulsión en el horno

Nota: Fuente el presente trabajo

Luego se procedió a compactar la segunda capa, la cual tiene un espesor de 5 cm, para esta capa se empleó moldes de cilindros de concreto hidráulico cuyo diámetro es igual al del molde Marshall, es decir, 10.16 cm (4”) y una altura de 20 cm (8”). El molde se presenta en la Fotografía 11.

Fotografía 11

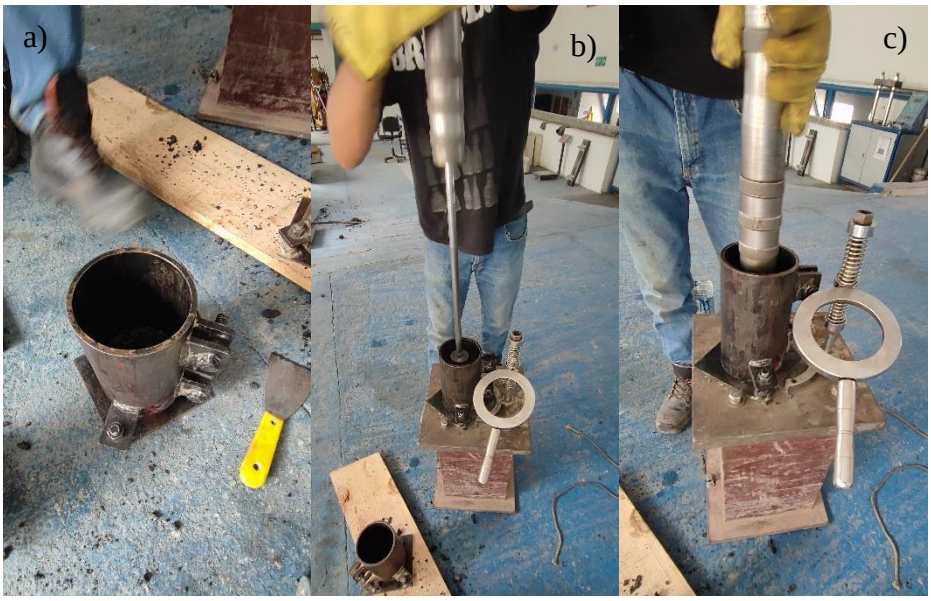
Molde para compactar segunda capa. a) Medición de altura, b) Medición de diámetro

Nota: Fuente el presente trabajo

El molde empleado por tener una mayor altura, permitió alojar la briqueta obtenida hasta el momento y posibilita compactar de manera adecuada la segunda capa, que tiene un espesor final compactado de 5 centímetros. Para tal fin, se aplica una energía de compactación de acuerdo a lo establecido en la norma NLT-382/08 y por su posición dentro del molde, solo es posible compactarlo por una cara, a la cual se aplicó un total de 100 golpes. Se emplearon 4 moldes para compactar los especímenes, inmediatamente se termina el proceso de compactación como se presenta en la Fotografía 12, se desmolda el espécimen desatornillando las tuercas de seguridad el molde se abre y la briqueta de dos capas queda completa Este proceso de desmoldado se presenta en la Fotografía 13.

Fotografía 12

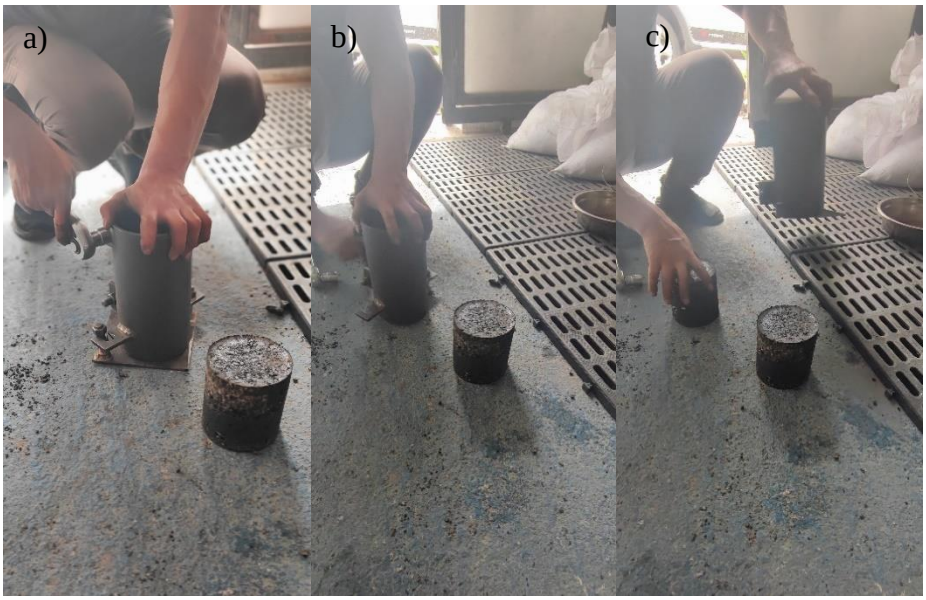
Proceso de compactación de la segunda capa. a) Molde empleado, b) Inicio de la compactación, c) Finalización del proceso de compactación del espécimen



Nota: Fuente el presente trabajo

Fotografía 13

Proceso desmoldado del espécimen. a) Apertura molde con Tornillos, b) Desmoldado espécimen, c) Espécimen obtenido.



Nota: Fuente el presente trabajo

6.6. Realización del Ensayo de LCB

Para la determinación de la fuerza cortante de rotura, se empleó el “Dispositivo B” y el procedimiento anexo sobre “Empleo de probetas fabricadas en laboratorio” descrito en la norma española NLT 382/08 Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte.

6.6.1. Descripción del dispositivo para el Ensayo de LCB

El molde empleado fue fabricado según las dimensiones referidas en la norma española NLT 382/08, la cual menciona que “Consiste en una mordaza cilíndrica desmontable en dos mitades, cuyo diámetro interior mide de 101 ó 150 mm y está provista de un sistema de cierre mediante tornillos, en la cual se introduce el testigo de ensayo. La interfaz del testigo debe sobresalir 5 mm del extremo de la mordaza. El dispositivo se presenta en la Fotografía 14.

Fotografía 14

Molde empleado en el proyecto. a) Sección transversal, b) Molde y soporte base

Nota: Fuente el presente trabajo

6.6.2. Ejecución del Ensayo de LCB

Para la ejecución del ensayo y la aplicación de la carga, se empleó una prensa multiusos marca Pinzuar digital de avance de pistón vertical 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 (Dorado y Rosero, 2018). Previo a la ejecución del ensayo y según lo establecido en la norma española NLT 382/08, los especímenes deben ser verificados en sus medidas para lo cual se emplea el calibrador con el que se realizan dos mediciones del diámetro de cada testigo con precisión de ± 0,1 mm, como se presenta en la Fotografía 15, se mide en dos secciones paralelas situadas próximas y a ambos lados de la interfaz entre las dos capas y se determina el promedio (d). Con este diámetro medio se calcula la superficie de la sección transversal (S) mediante la expresión: $S= \pi \cdot d^2/4$

Fotografía 15

Medición y acondicionamiento de testigos, a) Medición dimensiones, b) Acondicionamiento térmico de testigos en el horno

Nota: Fuente el presente trabajo

Se procedió luego al acondicionamiento térmico de los testigos, para lo cual se introdujeron los testigos en el horno a una temperatura regulada a (20 ± 1)º C durante al menos tres horas como se presenta en la Fotografía 15.

Una vez dispuesto el testigo dentro de la mordaza y cerrada ésta, se coloca el conjunto en posición horizontal sobre una base con dos puntos de apoyo separados 188 mm. La separación entre la interfaz del testigo y el punto de apoyo más cercano a dicha interfaz, será también de 5 mm. El punto de aplicación de la carga estará en una posición equidistante de los dos puntos de apoyo del conjunto, el cual actúa por tanto como una viga biapoyada, donde la sección de ensayo, al estar muy próxima al punto de apoyo, sólo está sometida a esfuerzo cortante. El proceso desarrollado se indica en la Fotografía 16.

Fotografía 16

Proceso Ejecución. a) Carga espécimen en la prensa, b) Plano falla del espécimen

Nota: Fuente el presente trabajo

6.7. Determinación de la tasa de aplicación óptima

El proceso mencionado, se realizó para 20 testigos ligados con emulsión CRR-60 y 20 testigos ligados con CRR-65 y se determinó la tasa de aplicación óptima para cada tipo de ligante con los especímenes descritos en la Tabla 8.

Tabla 8

Número de testigos por tipo de ligante empleado como riego de liga

	CRR-60				CRR-65			
Tasa aplicación (g/m^2)	200	300	400	500	200	300	400	500
Serie de espécimen	A1- A5	B1- B5	C1-C5	D1-D5	E1-E5	F1-F5	G1-G5	H1-H5
# testigos	5	5	5	5	5	5	5	5
Total	20				20			

Nota: Fuente el presente trabajo

6.8. Elaboración de especímenes con presencia de Polvo

Determinada la tasa de aplicación óptima para cada tipo de ligante y se fallan 18 testigos ligados con emulsión CRR-60 e igual cantidad para testigos ligados con CRR-65, en presencia y ausencia de polvo. Para la determinación de la cantidad de polvo a emplear, se parte de lo referido en la bibliografía, donde para condición polvorienta, se empleó la aplicación de un suelo AASHTO A4 (arcilla limosa) a una tasa de 0,07 lb/pie^2 (Mohammad y Elseifi, 2012). Esta tasa se toma como referencia y punto de partida la cual equivale a 341.77 g/m^2, lo cual ajustado para el área de la briqueta de 0.0081 m^2 con un diámetro de 4", correspondería 2.7 g de polvo. Con esta cantidad, se procedió en laboratorio y se adicionó a una briqueta de prueba. Se observa que la cantidad de polvo es elevada, formándose una superficie que no correspondería a una condición real, ya que en el proceso constructivo debe efectuarse la eliminación del polvo Por lo anterior, se efectúan chequeos con diferentes cantidades de polvo, como el 50% de lo referido en la bibliografía y se determina que la condición más aproximada a la que se podría observar en

campo, es de 0.5 g y de 1.0 g de polvo. En la Tabla 9 y en la Fotografía 17, Fotografía 18, Fotografía 19 y Fotografía 20, se presenta las condiciones de polvo consideradas.

Tabla 9

Condiciones de polvo consideradas

	g/m^2	g/briqueta
Sin Polvo	0	0
50% Tasa polvo	166.67	1.35
100% Tasa polvo	333.33	2.7
Evaluación 1 en laboratorio	123.46	1
Evaluación 2 en laboratorio	61.73	0.5

Nota: Fuente el presente trabajo

Fotografía 17

100% tasa de polvo 2.7 g

Nota: Fuente el presente trabajo

Fotografía 18

50% tasa de polvo 1.35 g

Nota: Fuente el presente trabajo

Fotografía 19

Tasa de polvo 1.0 g

Nota: Fuente el presente trabajo

Fotografía 20

Tasa de polvo 0.50 g

Nota: Fuente el presente trabajo

Una vez definida las condiciones de polvo, que son, en ausencia 0 g y presencia 0.5 g y 1g de polvo, se procede a realizar el mismo procedimiento ya descrito, fabricando las briquetas en una primera capa y luego, adicionando el polvo antes del riego de liga. En la Tabla 10 y en la Fotografía 21, se presenta las series empleadas para cada tipo de emulsión.

Tabla 10

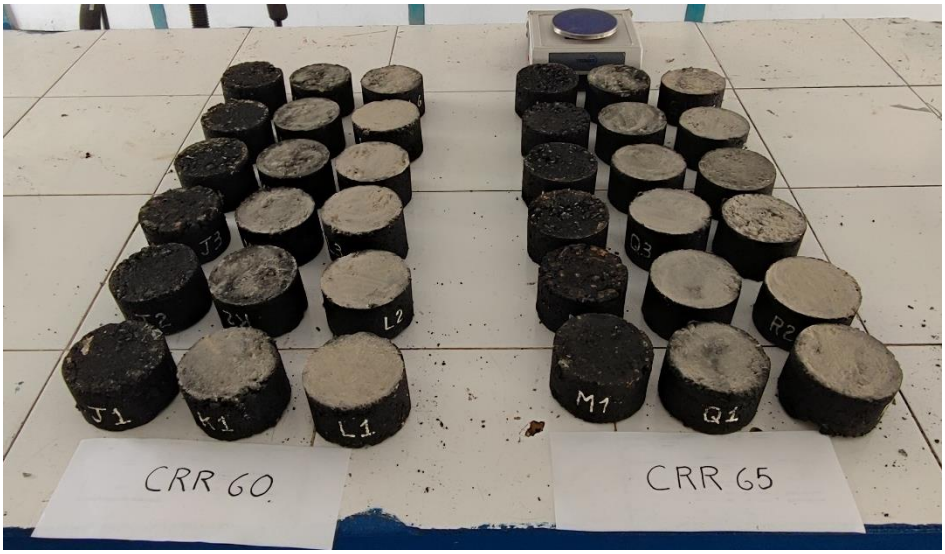
Número de testigos por tipo de ligante empleado en presencia y ausencia de polvo

	CRR-60			CRR-65		
Dosificación polvo (g)	0	0.5	1.0	0	0.5	1.0
Serie de espécimen	J1- J6	K1- K6	L1-L6	M1-M6	Q1-Q6	R1-R6
# testigos	6	6	6	6	6	6
Total	18			18		

Nota: Fuente el presente trabajo

Fotografía 21

Testigos con ausencia y presencia de polvo



Nota: Fuente el presente trabajo

Luego, se aplica el porcentaje óptimo de riego de liga, el cual se realizó con brocha y pincel, luego se lleva al horno para generar el proceso de curado de la emulsión, para lo cual, se lleva al horno a una temperatura regulada entre 20 y 25 °C por un tiempo de 24 horas, para garantizar el rompimiento de la emulsión. Luego, se procede a compactar la segunda capa, la cual tiene un espesor de 5 cm, empleando moldes de cilindros de concreto hidráulico, cuyo diámetro es igual al del molde Marshall, es decir, 10.16 cm (4”) y una altura de 20 cm (8 pulgadas). Terminada la compactación se desmolda el espécimen desatornillando las tuercas de seguridad el molde se abre y la briqueta de dos capas queda completa.

Previo a la ejecución del ensayo y según lo establecido en la norma española NLT 382/08, los especímenes deben ser verificados en sus medidas, para lo cual se emplea el calibrador con el que se realizan las mediciones ya indicadas, luego, se procede al acondicionamiento térmico de los testigos. Se introducen los testigos en el horno a una temperatura regulada a (20 ± 1)º C

durante al menos tres horas y finalmente, se dispone el testigo dentro de la mordaza y cerrada ésta, se coloca el conjunto en posición horizontal sobre una base, con dos puntos de apoyo separados y es fallada en la prensa, se registrar el valor de fuerza cortante de rotura y deformación.

7. Resultados y Análisis

Acorde a lo descrito, se ensayaron especímenes conformados por dos capas asfálticas, donde la primera capa tenía un espesor de 6 cm de mezcla MDC-19 y la segunda, tenía 5 cm de espesor de la misma mezcla, para un espesor total de 11 cm. Como riego de liga se emplearon dos tipos de emulsiones, CRR-60 y CRR-65, con 4 tasas de aplicación de 200 g/m^2, 300 g/m^2, 400 g/m^2 y 500 g/m^2 de ligante residual. Se calculó la fuerza cortante de rotura con la cual se obtuvo la resistencia al esfuerzo cortante, para luego determinar la tasa óptima de aplicación de riego de las dos emulsiones.

7.1. Fuerza cortante de rotura

La Fuerza cortante de rotura es el máximo valor registrado en la prensa en el momento que se genera el esfuerzo cortante en la superficie de unión de las capas que produce la separación de las mismas, empleando el dispositivo B establecido en la norma española NLT 382/08. La fuerza cortante de rotura (FCR), se calculó de los resultados obtenidos en la rotura de los especímenes. Las Tabla 11 y 12 muestran los resultados de la FCR obtenida junto con la desviación estándar y coeficiente de variación para emulsión CRR-60 y CRR-65.

En la Tabla 11, se observa que el valor de fuerza cortante para el riego de liga con emulsión asfáltica CRR-60, es más bajo, para las tasas de aplicación del riego más bajas y se incrementan hasta valores cercano a los 400g/m^2 de ligante residual, para luego descender a partir de ese valor. La desviación estándar obtenida es inferior a 0.5 %, lo cual indica que la dispersión de datos respecto a la media y el coeficiente de variación obtenido, es menor al 10%, de lo cual se puede comparar conjuntos de datos de poblaciones distintas, permitiendo eliminar las eventuales distorsiones de las medias de dos o más poblaciones.

Tabla 11

Resultados de la Fuerza Cortante de Rotura de la emulsión CRR-60

	DOSIFICACIÓN CRR-60			
Tasa aplicación (g/m^2)	200	300	400	500
FCR (kN)	2.8	3.75	5.34	4.6
	3.2	3.34	5.28	4.96
	2.6	3.80	5.43	5.32
	3.2	3.30	5.71	4.7
	3.08	3.27	4.64	4.6
Media	2.97	3.48	5.28	4.83
DE	0.27	0.26	0.39	0.31
CV	9.10%	7.50%	7.40%	6.40%

Nota: Fuente el presente trabajo

Tabla 12

Resultados de la Fuerza Cortante de Rotura de la emulsión CRR-65

	DOSIFICACIÓN CRR-65			
Tasa aplicación (g/m^2)	200	300	400	500
FCR (kN)	3.55	4.4	6.56	5.87
	3.78	4.09	6.38	5.35
	3.56	4.5	6.7	5.12
	3.12	4.03	6.26	5.75
	3.25	4.35	6.49	6.32
Media	3.44	4.27	6.48	5.67
DE	0.26	0.20	0.17	0.47
CV	7.50%	4.70%	2.60%	8.30%

Nota: Fuente el presente trabajo

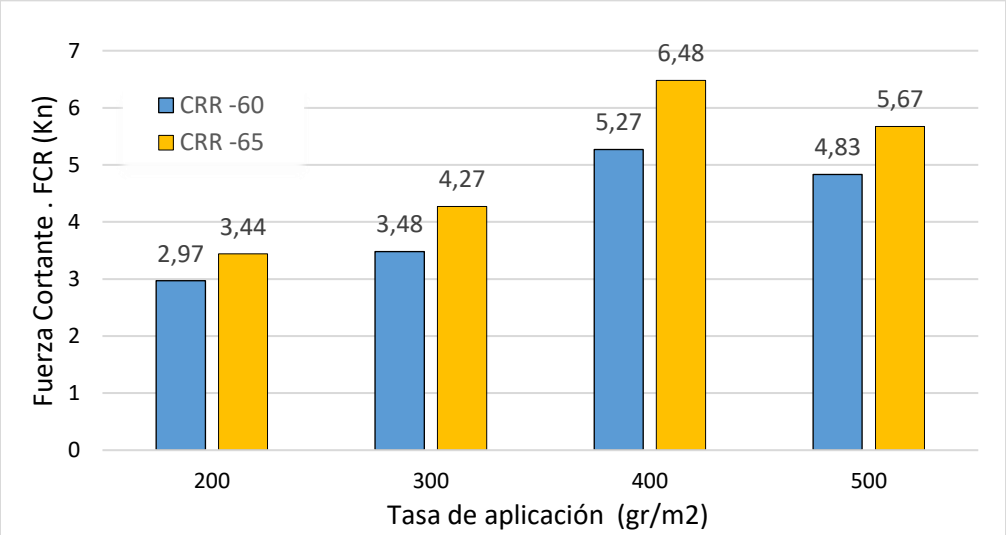
Se observa en la Tabla 12, que los especímenes ligados con la emulsión CRR-65, presentan mayor valor de fuerza cortante de rotura que los especímenes donde se empleó emulsión CRR-60 como riego de liga y hay un aumento a medida que se incrementa la tasa de aplicación, obteniéndose los valores más altos con una tasa de aplicación cercana a los 450g/m^2 y a partir de ese valor desciende. El valor de desviación estándar obtenido para cada dosificación de tasa de aplicación es inferior a 0.5 %, lo cual indica que la dispersión de datos respecto a la

media y el coeficiente de variación obtenido, es menor al 10 %, de lo cual se puede comparar conjuntos de datos de poblaciones distintas, permitiendo eliminar las eventuales distorsiones de las medias de dos o más poblaciones.

En la Figura 9, se presenta una gráfica de tendencia para las dos emulsiones empleadas, donde se observa el comportamiento de la fuerza cortante con relación al incremento de la tasa de aplicación del riego de liga

Figura 9

Comparación de la fuerza cortante obtenida con las emulsiones CRR-60 y CRR-65 en función de la tasa de aplicación del riego de liga



Nota: Fuente el presente trabajo

7.2. Resistencia al esfuerzo cortante

Empleando la formula mencionada y referida en la norma española NLT 382/08, con la fuerza cortante de rotura media obtenida y con el área de la sección transversal, se obtuvo la resistencia al esfuerzo cortante que se produce empleando la emulsión CRR-60 y CRR-65.

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/mm^2 o MPa

P= Carga máxima de rotura, N

S= Superficie de la sección transversal, mm^2

Empleando la formula mencionada y referida en la norma española NLT 382/08, con la fuerza cortante de rotura media obtenida y con el área de la sección transversal, se obtuvo la resistencia al esfuerzo cortante que se produce empleando la emulsión CRR-60 y CRR-65. Los resultados de la Resistencia al Esfuerzo Cortante (REC) obtenidos empleando la emulsión CRR-60, se presentan en la Tabla 13 y Figura 10.

En la Tabla 13, se observa que el valor de resistencia al esfuerzo cortante para el riego de liga con emulsión asfáltica CRR-60, es más bajo para las tasas de aplicación del riego más bajas y se incrementan hasta valores cercano a los 400g/m^2 de ligante residual, y descienden a partir de ese valor. El valor de desviación estándar obtenido para cada dosificación de tasa de aplicación es inferior a 0.5 %, lo cual indica, que la dispersión de datos respecto a la media y el coeficiente de variación obtenido es menor al 10 %, de lo cual se puede comparar conjuntos de datos de poblaciones distintas.

Tabla 13

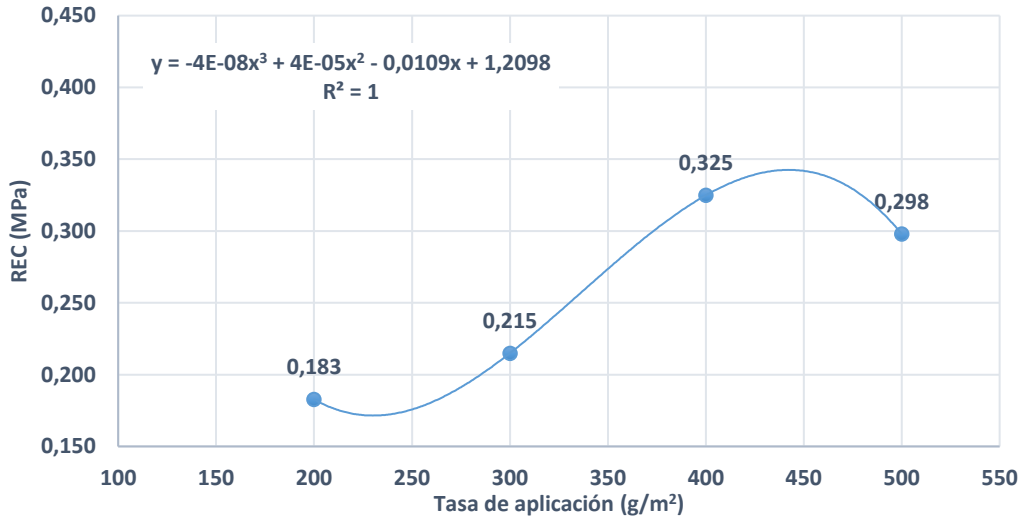
Resultados de la Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-60

	DOSIFICACIÓN CRR-60			
Tasa aplicación (g/m^2)	200	300	400	500
REC (MPa)	0.173	0.231	0.329	0.284
	0.197	0.206	0.326	0.306
	0.16	0.234	0.335	0.328
	0.197	0.204	0.352	0.29
	0.19	0.202	0.286	0.284
REC Media (MPa)	0.183	0.215	0.325	0.298
DE	0.016	0.02	0.02	0.02
CV	8.80%	9.30%	6.20%	6.70%

Nota: Fuente el presente trabajo

Figura 10

Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-60



Nota: Fuente el presente trabajo

Los resultados de la Resistencia al Esfuerzo Cortante (REC) obtenidos empleando la emulsión CRR-65, se presentan en la Tabla 14 y Figura 11.

Se observa en la Tabla 14, que los especímenes ligados con la emulsión CRR-65, presentan mayor valor de resistencia al esfuerzo cortante, que los especímenes donde se empleó

emulsión CRR-60 como riego de liga, Hay un incremento junto con la tasa de aplicación, obteniendo los máximos valores, con una tasa cercana a los 450g/m^2 de ligante residual y a partir de ese valor, desciende.

Tabla 14

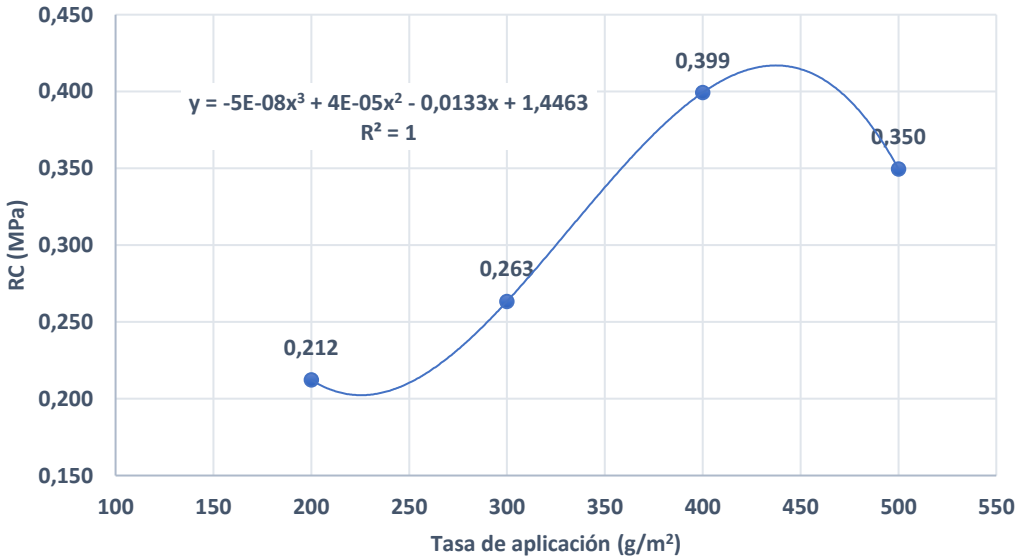
Resultados de la Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-65

	DOSIFICACIÓN CRR-65			
Tasa aplicación (g/m^2)	200	300	400	500
REC (MPa)	0.219	0.271	0.405	0.362
	0.233	0.252	0.393	0.33
	0.22	0.278	0.413	0.316
	0.192	0.249	0.386	0.355
	0.2	0.268	0.4	0.39
REC Media (MPa)	0.212	0.263	0.399	0.350
DE	0.017	0.013	0.01	0.029
CV	8.00%	4.90%	2.50%	8.30%

Nota: Fuente el presente trabajo

Figura 11

Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-65

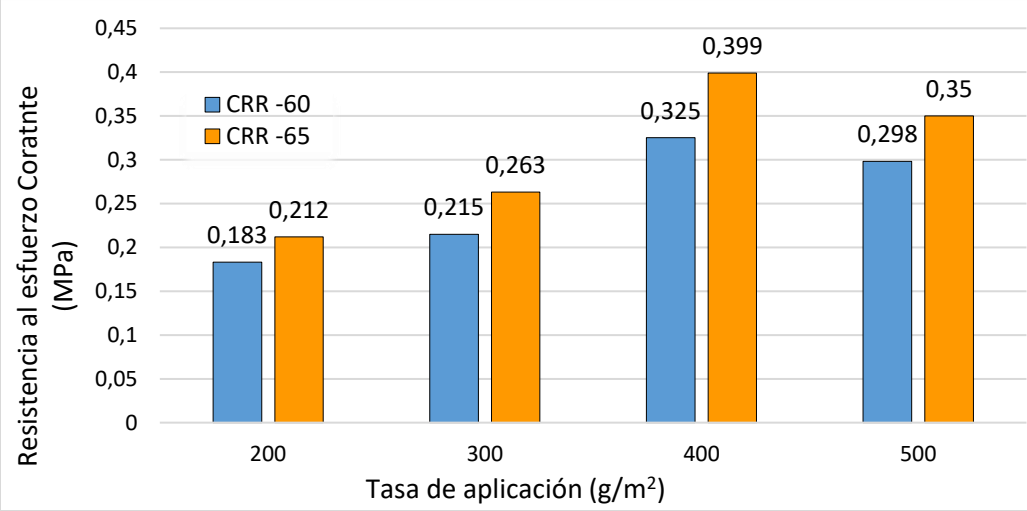


Nota: Fuente el presente trabajo

En la Figura 12, se presenta una gráfica de tendencia para las emulsiones CRR-60 y CRR-65, donde se observa el comportamiento de la resistencia al esfuerzo cortante con relación al incremento de la tasa de aplicación, obteniéndose el valor máximo cercano a los 400 g/m^2 de ligante residual, además, los valores medios obtenidos para la emulsión CRR-65 son superiores a los de la emulsión CRR-60, con variaciones que oscilan por el orden del 16 % - 23%.

Figura 12

Comparación de resistencias al esfuerzo cortante obtenidas con las emulsiones CRR-60 y CRR-65 en función de la tasa de aplicación del riego de liga



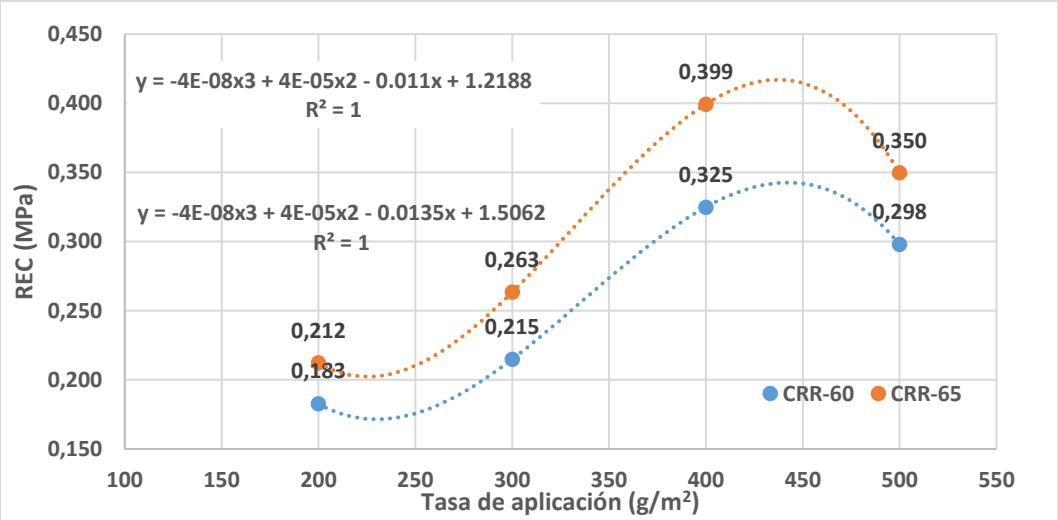
Nota: Fuente el presente trabajo

7.3. Determinación de la tasa óptima de aplicación de riego de liga

Luego de efectuar el cálculo de la Resistencia al Esfuerzo Cortante (REC) generado en la interfaz por el riego de liga con la emulsión CRR-60 y CRR-65, se graficaron los resultados para cada tipo de emulsión y se obtuvo, que la línea que se aproxima de mejor manera, es de tendencia polinómica de grado tres, según los datos obtenidos, los que se presentan en la Figura 13.

Figura 13

Comparación de resistencias al esfuerzo cortante obtenido con las emulsiones CRR-60 y CRR-65



Nota: Fuente el presente trabajo

De acuerdo a las gráficas obtenidas, se observa que la Resistencia al esfuerzo cortante para la emulsión CRR-65 es mayor que para las CRR-60, para todas las tasas de aplicación evaluadas. En las tasas de aplicación más bajas, la diferencia es menor y se alcanza una mayor diferencia entre el rango de los 400 g/m^2 a los 500 g/m^2 de ligante residual, encontrándose que la de tasa óptima de aplicación de riego de liga, se encuentra en este rango para los dos tipos de emulsiones. En la Tabla 15, se presenta las tasas óptimas de aplicación obtenidas, utilizando las líneas de tendencia de regresión polinómicas de tercer grado.

Tabla 15

Tasa óptima de aplicación riego de liga

Tipo de Emulsión	Tasa optima de aplicación (g/m^2)	Resistencia al esfuerzo cortante MPa
CRR-60	445	0.345
CRR-65	440	0.418

Nota: Fuente el presente trabajo

El ensayo empleado en el presente trabajo es europeo y hace parte de las especificaciones técnicas dirigidas a controlar la calidad de los riegos de adherencia. En Colombia, este control ha sido incluido en las especificaciones del año 2022 del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, Capitulo 4. Pavimentos asfálticos, Artículo 421-22 Riego de liga, en el cual se menciona en el numeral 421.4.2 Determinación de la dosificación del ligante el empleo del ensayo NLT 382/08, sin embargo, solo se establece en la normatividad Colombiana las dosificaciones por metro cuadrado (200 g/m^2 -300 g/m^2); en cambio, la especificación Española NLT 382/08 fue complementada en el año 2014 por la ORDEN FOM/2523/2014 + FOM/510/2018, donde el artículo 531 del PG-3 específica para los riegos de adherencia y prescribe un requisito mínimo de 0,6 MPa bajo la capa de rodadura y 0,4 MPa en las capas inferiores. La norma de ensayo NLT-382, establece una velocidad de desplazamiento de 2,5 mm/min, frente a los 50 mm/min utilizados en países como Alemania y Suiza, donde prescribe una resistencia mínima de 0,85 MPa para la unión entre una capa de rodadura y su soporte, y de 0,68 MPa en la unión de capas intermedias (Ortiz et al., 2020).

Teniendo estas resistencias mínimas de referencia y con los resultados obtenidos de resistencia para las dos emulsiones evaluadas en este trabajo donde se obtuvo una REC de 0.345 MPa para CRR-60 y 0.418 MPa para la emulsión CRR-65, se observa que no se cumple con los requisitos mínimos referenciados de 0,6 MPa bajo la capa de rodadura.

7.4. Evaluación de la incidencia del polvo en la adherencia del riego de liga

Determinada la tasa de aplicación óptima para cada tipo de ligante, se fallan 18 testigos ligados con emulsión CRR-60 e igual cantidad para testigos ligados con CRR-65. Como se mencionó en la metodología, se determinó tres condiciones que son Ausencia cero (0) g de polvo y dos condiciones de presencia: 0.5 g de polvo (61.73 g/m^2) y 1.0 g de polvo (123.46 g/m^2). Se calculó la fuerza cortante de rotura con la cual se obtuvo la resistencia al esfuerzo cortante para

las condiciones de ausencia y presencia de polvo. Las Tabla 16 y la Tabla 17, muestran los resultados de la Fuerza Cortante de Rotura para la emulsión CRR-60 y CRR-65.

Tabla 16

Resultados de la Fuerza Cortante de Rotura con y sin polvo emulsión CRR-60

	DOSIFICACIÓN CRR-60		
Polvo (g)	0	0.5	1.0
Serie briqueta	J	K	L
FCR (kN)	5.71	4.35	2.31
	5.90	4.25	2.52
	5.46	5.06	2.2
	5.95	4.75	2.41
	5.10	5.12	2.85
	5.84	4.39	2.68
Media	5.65	4.64	2.49
DE	0.33	0.38	0.24
CV	5.80%	8.20%	9.70%

Nota: Fuente el presente trabajo

Tabla 17

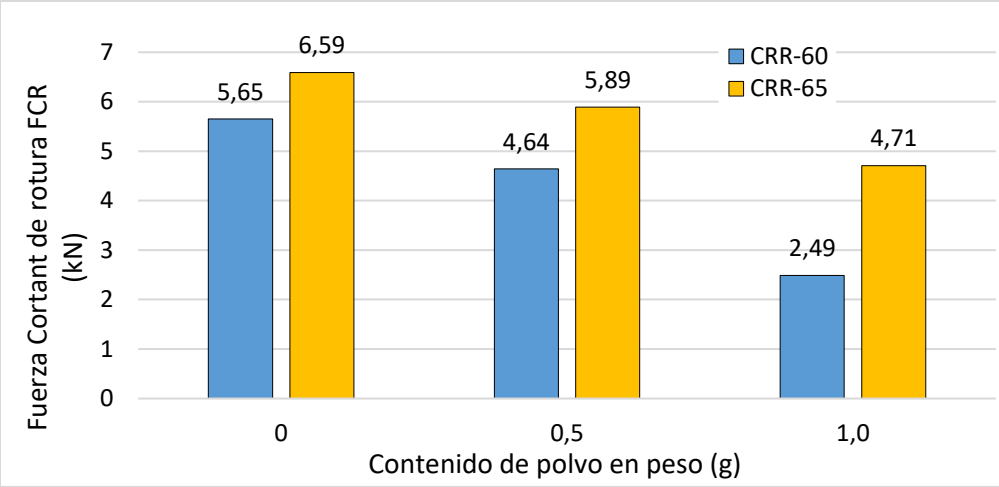
Resultados de la Fuerza Cortante de Rotura con y sin polvo emulsión CRR-65

	DOSIFICACIÓN CRR-65		
Polvo (g)	0	0.5	1.0
Serie briqueta	M	Q	R
FCR (kN)	6.34	5.88	4.13
	7.12	6.15	4.78
	5.83	6.25	4.56
	7.02	5.97	4.85
	6.84	5.74	5.11
	6.45	5.41	4.89
Media	6.59	5.89	4.71
DE	0.49	0.3	0.34
CV	7.40%	5.10%	7.20%

Nota: Fuente el presente trabajo

Figura 14

Incidencia del polvo en la Fuerza Cortante obtenida para emulsión CRR-60 y CRR-65



Nota: Fuente el presente trabajo

En la Figura 14, se aprecia que a medida que aumenta el contenido de polvo sobre la superficie de la briqueta, se disminuye la fuerza cortante tanto para la emulsión CRR-60, como para la CRR-65, presentándose para la CRR 60, un decremento del 17.8% entre la condición sin polvo y la que tiene 0.5 g de polvo y un decremento bastante fuerte del 56 % entre la condición de 0.5 g a 1.0 g. Para la emulsión CRR-65, se presenta un decremento menos fuerte, ya que entre la condición de 0.5 g a 1.0 g, se presenta una disminución del 20%. Se observa que la presencia de polvo tiene mayor influencia en la emulsión CRR-60 que en la emulsión CRR-65.

Se determinó luego, la resistencia al esfuerzo cortante que se produce empleando la emulsión CRR-60 y CRR-65, en presencia y ausencia de polvo. Los resultados para la emulsión CRR-60 con ausencia y presencia de polvo se presentan en la Tabla 18 y Figura 15.

Tabla 18

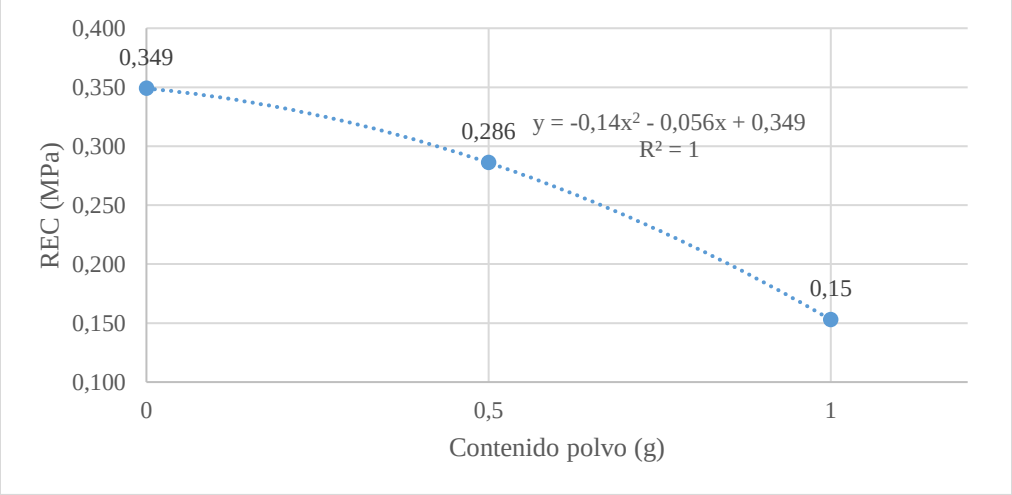
Resultados a Resistencia al esfuerzo cortante para emulsión CRR-60 con y sin polvo

	DOSIFICACIÓN CRR-60		
Polvo (g)	0	0.5	1.0
REC (MPa)	0.352	0.268	0.142
	0.364	0.262	0.155
	0.337	0.312	0.136
	0.367	0.293	0.149
	0.315	0.316	0.176
	0.36	0.541	0.165
Media	0.35	0.32	0.15
DE	0.02	0.1	0.01
CV	5.70%	31.20%	6.50%
REC (MPa)	0.349	0.286	0.153

Nota: Fuente el presente trabajo

Figura 15

Incidencia del polvo en Resistencia esfuerzo cortante liga con emulsión CRR-60



Nota: Fuente el presente trabajo

Los resultados de la Resistencia al Esfuerzo Cortante (REC) obtenidos empleando la emulsión CRR-65 con ausencia y presencia de polvo, se presentan en la Tabla 19 y Figura 16.

Tabla 19

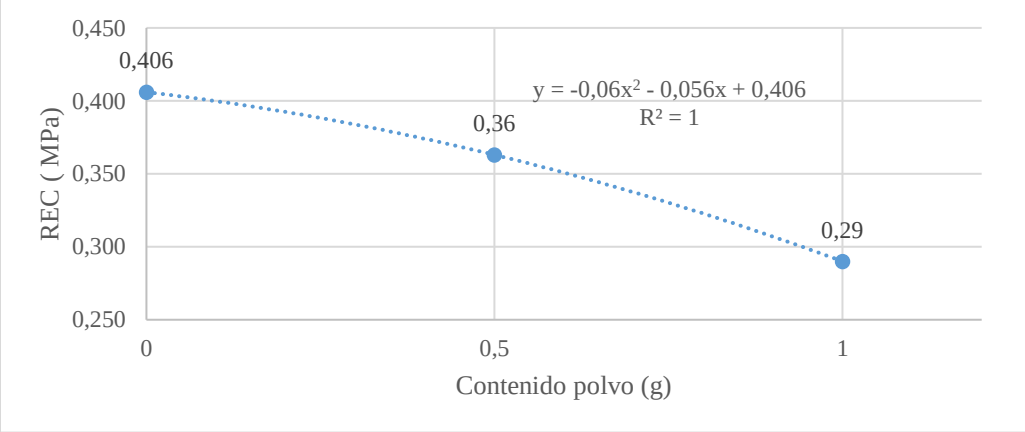
Resultados de la Resistencia al esfuerzo cortante obtenido con la emulsión CRR-65

	DOSIFICACIÓN CRR-65		
Polvo (g)	0	0.5	1.0
REC (MPa)	0.391	0.363	0.255
	0.439	0.379	0.295
	0.36	0.385	0.281
	0.433	0.368	0.299
	0.422	0.354	0.315
	0.398	0.334	0.302
Media	0.41	0.36	0.29
DE	0.03	0.02	0.02
CV	7.40%	5.50%	6.90%
REC (MPa)	0.406	0.363	0.29

Nota: Fuente el presente trabajo

Figura 16

Incidencia del polvo en Resistencia al esfuerzo cortante liga emulsión CRR-65

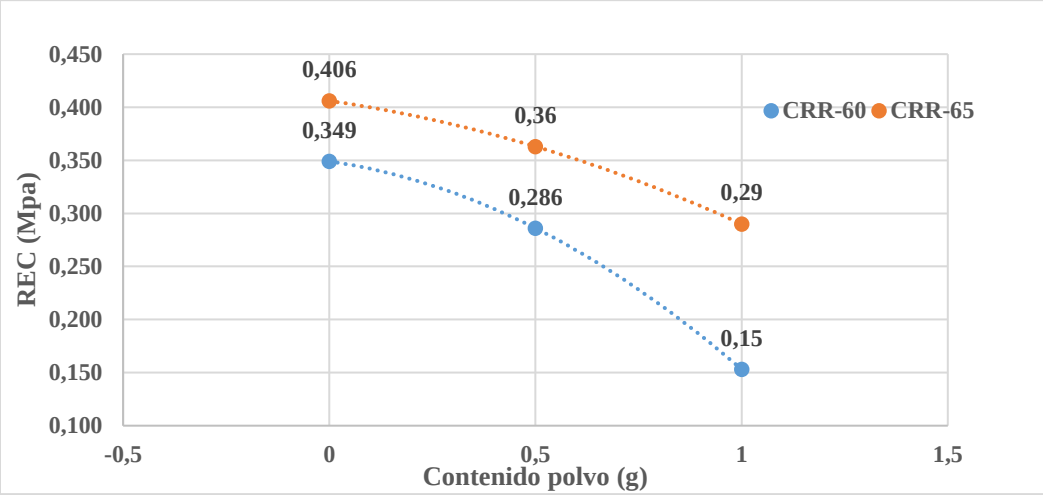


Nota: Fuente el presente trabajo

A continuación, en la Figura 17 se presenta una comparación de la incidencia del polvo de las dos emulsiones estudiadas.

Figura 17

Comparación de la incidencia del polvo sobre la REC de las emulsiones CRR-60 y CRR-65

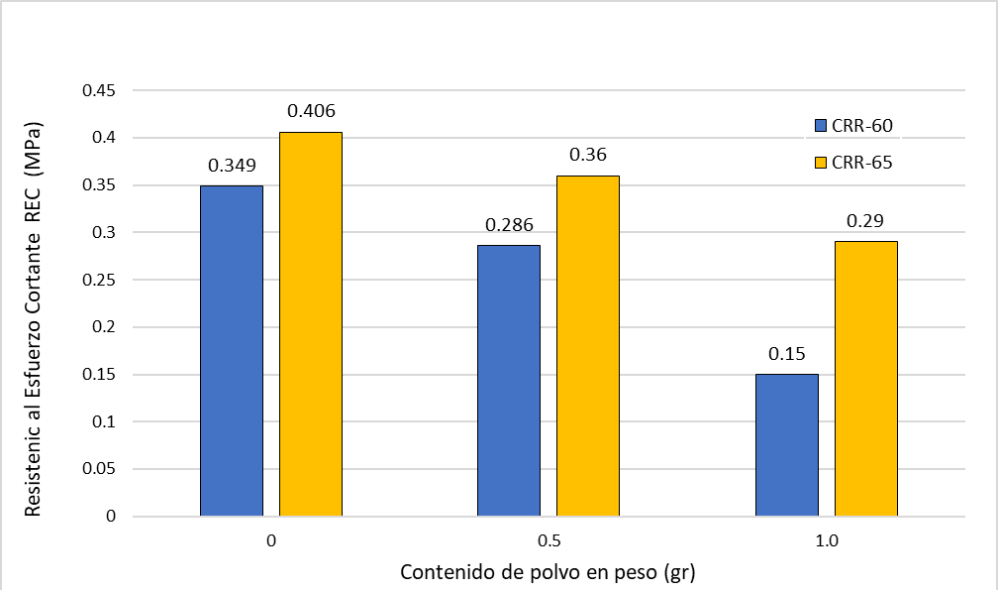


Nota: Fuente el presente trabajo

En la Figura 18, se aprecia que a medida que aumenta el contenido de polvo sobre la superficie de la briqueta, se disminuye la resistencia al esfuerzo cortante, tanto para la emulsión CRR-60 como para a CRR-65, presentándose para la CRR 60, un decremento del 18% entre la condición sin polvo y la que tiene 0.5 g de polvo y un decremento del 47.5 % entre la condición de 0.5 g a 1.0 g. Para la emulsión CRR-65, se presenta un decremento más bajo, ya que entre la condición sin polvo y la que tiene 0.5 g de polvo y un decremento del 11.3 % y entre la condición de 0.5 g a 1.0 g, se presenta una disminución del 19%. Se observa que la presencia de polvo tiene mayor influencia en la emulsión CRR-60 que en la emulsión CRR-65. Es importante resaltar, que en laboratorio se observó que porcentajes elevados de polvo en la superficie de la briqueta, generan dificultad para la aplicación del riego de liga, por lo que aumentar el contenido de polvo no correspondería a una condición real en campo, ni permite el contacto adecuado entre el riego de liga y la superficie de la briqueta llegando a valores de resistencia al esfuerzo cortante próximos a cero.

Figura 18

Incidencia del polvo sobre la REC de las emulsiones CRR-60 y CRR-65



Nota: Fuente el presente trabajo

8. Conclusiones y Recomendaciones

8.1. Conclusiones

Para el desarrollo de este trabajo, se empleó el ensayo descrito en la norma española NLT-382/08 y en el artículo 531 del PG-3, el cual se incluyó parcialmente en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías año 2022, se estudiaron dos emulsiones referenciadas en la normatividad del INVIAS-2022 a través de una prueba de esfuerzo cortante que permite obtener parámetros de caracterización de la adherencia desarrollada en la unión de las dos capas asfálticas del espécimen elaborado. De los resultados obtenidos del trabajo desarrollado se obtienen las siguientes conclusiones:

- El ensayo de corte NLT-382/08, presenta ventajas en su realización. como la facilidad en su implementación y baja inversión de recursos, pero también presenta algunos aspectos que deben controlarse y mejorar, como es la aplicación del riego, la cual está establecida que se efectúe con pincel, siendo difícil controlar la dosis aplicada y su correcta distribución, en especial con la presencia de polvo y aunque se realiza controlando el peso, dado que el área de la probeta es pequeña, una pérdida leve de masa puede afectar el cálculo del residuo.
- Con el fin de garantizar la correcta adhesión entre capas asfálticas, la capa superior debe ser realizada una vez la emulsión haya roto. Este tiempo de rotura depende del tipo de emulsión, para este caso, por ser una emulsión de rompimiento rápido, se generó de inmediato, por lo cual, el tiempo de rotura de 24 horas que debe llevarse los especímenes al horno, debe ser revisado. Se observa que la rugosidad y textura, es una variable que influye de manera directa con la resistencia al corte.

- El ensayo de corte NLT-382/08 desarrollado, mostró que, para las dos emulsiones utilizadas como riego de liga, la emulsión CRR-65 es la que provee una mejor adherencia.
- Para los materiales y condiciones de ensayo, se determinó, que, a mayor viscosidad, se obtienen mayores valores de Resistencia al esfuerzo cortante (REC); es así, como los especímenes donde se empleó como riego de liga la emulsión asfáltica CRR-65, se obtuvo un REC de 0.41 MPa, representando un 16% más que para la emulsión CRR-60, donde se obtuvo un REC de 0.35 MPa, concluyendo que la viscosidad tiene efecto sobre la adherencia en el riego de liga.
- Con relación a la tasa de aplicación, se determinó, que el rango donde se encuentran los porcentajes óptimos para el riego de liga, tanto de la emulsión asfáltica CRR-65, como de la emulsión asfáltica CRR-60, está entre 400 g/m^2 y 500 g/m^2 de ligante residual, obteniéndose que las tasas de aplicación óptima o dosificación de ligante residual del riego fueron muy similares, con valores de 445 g/m^2 para la CRR-60 y 440 g/m^2 para la CRR-65. En el presente estudio se observó que un aumento en la tasa de aplicación, incrementa el efecto que tiene el tipo de ligante asfáltico sobre la resistencia al esfuerzo cortante y por tanto, de la adherencia en la interface. Este valor encontrado, se encuentra dentro de los resultados obtenidos por otras investigaciones desarrolladas, donde las dotaciones de riego que mejores resultados de resistencia al corte aportan, son las comprendidas entre 250 y 500 g/m^2 de ligante residual.
- Con relación a la incidencia del polvo en la aplicación del riego de liga para las condiciones consideradas en el presente estudio, el aumento en la cantidad de polvo disminuye el efecto que tiene el tipo de ligante asfáltico sobre la resistencia al esfuerzo cortante, siendo mayor la perdida de REC para la emulsión CRR-60 que para la emulsión CRR-65, donde para la CRR-60, se pierde el 43% cuando existe una tasa de polvo de 1.0 g por briqueta (123.46 g/m^2)

respecto a la condición de no presencia de polvo. Para la emulsión CRR-65, se observó una disminución del 28% cuando existe una tasa de polvo de 1,0 g por briqueta (123.46 g/m^2) respecto a la condición de no presencia de polvo.

- Se observo que los especímenes ligados con la emulsión CRR-65, presentan mayor valor de fuerza cortante de rotura que los especímenes donde se empleó emulsión CRR-60 como riego de liga, concluyendo que la emulsión con mayor contenido de asfalto residual, la CRR-65, generó mayor adherencia en la unión de las dos capas asfálticas.
- En la normatividad en Colombia, se debe incluir los valores mínimos de Resistencia de Esfuerzo cortante que debe cumplir el riego de liga, tanto para la capa asfáltica de rodadura, como para las capas inferiores. En la actualidad existe en las especificaciones del año 2022 del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, Capitulo 4. Pavimentos asfálticos, Artículo 421-22, en lo relacionado con el Riego de liga, las dosificaciones por metro cuadrado, pero no los valores mínimos que deben cumplir de REC.
- Según los resultados obtenidos en las dos emulsiones evaluadas, donde se obtuvo una REC de 0.345 MPa para CRR-60 y 0.418 MPa para la emulsión CRR-65, se concluye, que no se cumple con los requisitos mínimos referenciados en España, de 0,6 MPa bajo la capa de rodadura.
- En laboratorio se observó, que porcentajes elevados de polvo en la superficie de la briqueta, generan dificultad para la aplicación del riego de liga por lo que aumentar mayores contenidos de polvo no correspondería a una condición real en campo ni permite el contacto adecuado entre el riego de liga y la superficie de la briqueta llegando a valores cercanos a cero de resistencia al esfuerzo cortante.

- Durante el desarrollo del laboratorio se pudo observar, que influye de manera directa en los resultados, la manera como se coloca la probeta en cuanto a la separación recomendada entre apoyos. Una distancia menor a los 5 mm de la interfaz del apoyo del cuerpo del molde, se traduce en un incremento de la resistencia, lo que entrega un resultado que no es válido.

8.2. Recomendaciones

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

- La elaboración de briquetas de la primera capa puede realizarse en bandejas y luego, ser extraídas mediante brocas, con el propósito de acercase al desarrollo más aproximado de lo referido en la norma española NLT-382/08.

- Estudiar otras variables como la textura superficial de las capas a adherir, ya que este parámetro es fundamental en la tasa de aplicación del riego de liga y en la adherencia generada en la interface, también usar emulsiones diluidas como se trabaja en campo y aplicar la segunda capa del espécimen de prueba antes de que la emulsión rompa.

- Realizar el ensayo NLT-382/08, empleando otras temperaturas de acondicionamiento a temperaturas ambientes, bajas y elevadas, para determinar el comportamiento de los mismos materiales para regiones diferentes a la del estudio, pero que existen en el departamento de Nariño.

- Se deben introducir mejoras en la metodología del ensayo de corte LCB, de variables como el tiempo que transcurre entre la compactación de la primera capa y la elaboración de la segunda capa, ya que, por presentarse un incremento de las propiedades mecánicas de la primera capa, este se constituye en otra variable que podría llegar a influir en los resultados de la unión de las capas de un pavimento o sobrecarpetas.

- Estudiar de manera simultánea capas asfálticas con especímenes de laboratorio compactados, la primera capa en bandeja y testigos extraídos de campo, puesto que es necesario conocer la eficiencia de los riegos de liga bajo condiciones reales de construcción.

Referencias Bibliográficas

Alvarez , C. (2007). E*studio experimental de la resistencia de la adherencia entre capas en la construcción de carpetas asfálticas en caliente.*Universidad de Chile

Amado-Sopó, C y Gil-Rincón, O. (2017). *Análisis del costo en el ciclo de vida para dos alternativas de pavimento.*Universidad Católica de Colombia

Andaluz, D. et al.(2019*). Buenas prácticas en la ejecución de riegos de adherencia*. Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. "Memorias del XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto: Retos y Oportunidades en el Mundo del Asfalto". Ciudad de México: Asociación Mexicana del Asfalto, 2019, p. 881-893

Anguas, P.G., & Martínez, J.A. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos.* Publicación Técnica N° 197. Sanfandila, Qro. Instituto Mexicano del Transporte.

Archila, A., y Aparicio,ML. (2018). *Impactos ambientales derivados del proceso de pavimentación de vías de transporte en Colombia*. https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/18318/1098694697.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Asphalt Institute. (2008). *Basic Asphalt Emulsion Manual* . Asphalt Institute. Fourth edition, Volume MS-19.

Biglari M., Seyed Mohammad Asgharzadeh, and Saleh Sharif Tehrani. *Evaluation of factors affecting tack coat bond strength*. Canadian Journal of Civil Engineering. 46(4): 270-277. https://doi.org/10.1139/cjce-2018-0290

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.

Chen, J.S. & Huang, C.C. 2010, "Effect of surface characteristics on bonding properties of bituminous tack coat", Transportation Research Record, vol. 2180, no. 1, pp. 142- 149.

Cho, S.H. 2016. Evaluation of interfacial stress distribution and bond strength between asphalt pavement layers. 341 North Carolina State University.

Coleri, E., Wruck, B., Sreedhar, S., Villarreal, R., Lewis, S., y Kumar, V. (2020). *Implementation of odot tack coat technologies and procedures to improve long-term pavement performance.* Oregon Department of Transportation Research Section .

Colque, G. (2019). E*stimación de la influencia de la macro-textura y la dotación de emulsión en la resistencia al corte de un riego de adherencia tramo canaletas - piedra larga.*Universidad Autonoma "Juan Misael Saracho". Tarija -Bolivia

Consejo Privado de competitividad. (2022).*Infraestructura, Transporte y Logística.* Informe Nacional de competitividad 2022-2023.

Coria C, Hernandez, R, Anguas, P. (2018). *Teoría para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista.* Documento Técnico N° 72. Sanfandila, Qro. Instituto Mexicano del Transporte.

Cornejo, J. (2014). *Análisis de la optimización del riego de liga en la colocación de carpeta asfáltica en caliente. universidad de el salvador. facultad de ingeniería y arquitectura. escuela de ingeniería civil.* https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/5812/1/An%C3%A1lisis%20de%20la%20optimizaci%C3%

B3n%20del%20riego%20de%20liga%20en%20la%20colocaci%C3%B3n%20de%20carpeta%20asf%C3%A1ltica%20en%20caliente.pdf

Delbono Hector Luis,(2019). *Estudio de la adherencia entre capa de pavimentos, interponiendo geosintéticos* , Editorial Académica Española. ISBN 978-613-9-40582-4.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2018). *Censo poblacional.* DANE

Departamento Nacional de Planeación. (2019). *El plan nacional de desarrollo 2018-2022, "Pacto por Colombia, pacto por la equidad.* https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Resumen-PND2018-2022-final.pdf

Deysarkar, I. 2004. Test set-up to determine quality of tack coat.

Diakhate, M., Millien, A., Petit, C., Phelipot-Mardele, A. & Pouteau, B. 2011, *Experimental investigation of tack coat fatigue performance: Towards an improved lifetime assessment of pavement structure interfaces*, Construction and Building Materials, vol. 25, no. 2, pp. 1123-1133.

Dorado, G., y Rosero, L. (2018). *Efecto de la tasa de aplicación y el tipo de ligante en la adherencia de capas asfálticas evaluadas por medio del ensayo lcb.* http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/1447/efecto%20de%20la%20tasa%20de%20aplicaci%c3%93n%20y%20el%20tipo%20de%20ligante%20en%20la%20adherencia%20de%20capas%20asf%c3%81lticas.pdf?sequence=1&isallowed=y

Elizondo-Arrieta, F., Torres-Linares, P., Rodríguez-Castro, E, Aguiar-Moya, J., Loría-Salazar, L. (2017). *Evaluación de la adhesión de emulsiones asfálticas utilizada en riegos de liga para pavimentos asfálticos LM-PI-UMP-066-R1*. LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica.

Gamboa Gustavo, A. (2019). A*nálisis técnico del deterioro del pavimento de las concesiones viales de colombia conforme a los parámetros de evaluación establecidos en los contratos de concesión para la evaluación de modelos del comportamiento de los pavimentos.*Universidad Santo Tomás. Bogotá

Hassan Ziari & Mohammad Mahdi Khabiri (2007). *Interface condition influence on prediction of flexible pavement life*, Journal of Civil Engineering and Management, 13:1,71-76, DOI: 10.1080/13923730.2007.9636421

Instituto Desarrollo Urbanos -IDU (2011). *Sección 502-11 Riego de Liga* En Especificaciones Técnicas. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2022). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.* Bogotá D.C. 6 de mayo de 2022

Instituto Nacional de Vías. (2022). *Art. 411-22 Suministro de emulsión asfáltica catiónica*. En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2022). *Art. 421-22. Riego de liga*. En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2022). *Art. 450-22 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 Ángeles*. 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 eagregado 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.

Jahanbakhsh, Mohammad M. Karimi & Nader Tabatabaee (2017) *Experimental and numerical investigation of low-temperature performance of modified asphalt binders and mixture*s ,Road Materials and Pavement Design, 18:6,1353-1374, DOI:10.1080/14680629.2016.1220864

King, G., y May, R. (2003). *"New Approaches to Tack Application", presentation made to the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board.*

LanammeUCR, *Laboratorio Nacional de materiales y modelos estructurales (2019). Aplicación de riego de Liga, Guia para inspectores*.Universidad de Costa Rica. DOI:10.13140/RG.2.2.25371.72487

Marín Diab, S. (2019). C*álculo de espesores mínimos de carpetas asfálticas en pavimentos flexibles para Bogotá.* Universidad Santo Tomás

Mendez, C., y Rmirez H. (2017). *Diseño y rehabilitación de la estructura de pavimento de un tramo de la vía terciaria coello a la vereda llano de la Virgen, localizada en el municipio de Coello – departamento del Tolima.* Universidad Cooperativa de Colombia. Ibague

Miranda Rebolledo, R. (2010). *Deterioro en pavimentos flexibles y rígidos.* Valvidia -Chile. Universidad Austral de Chile.

Mohammad, L., Raqib, M., y Huang, B. (2002). *Influence of asphalt tack coat materials on interface shear strength. Transportation Research Record.* Journal of the Transportation Research Board.

Mohammad, L., Elseifi, M., Bae, A., Patel, N., Button, J., y Scherocman, J. (2012). *Optimization of Tack Coat for HMA Placement. NCHRP Report 712.* National Cooperative Highway Research Program.

Molenaar, A., Heerkens, J., and Verhoeven, J. 1986. Effects of stress absorbing membrane interlayers. in Association of Asphalt Paving Technologists Proc.

Morales, Javier. (2005). T*écnicas de rehabilitación de pavimentos de concreto utilizando sobrecapas de refuerzo.* Universidad de Piura. Perú.|||

Ontiveros, L. (2013). *Evaluación de la adherencia entre capas de pavimento empleando diferentes emulsiones asfálticas.* Universidad Nacional Autónoma de México: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/6252/1/tesis.pdf.pdf

Ortiz, Jorge., Miro, Rodrigo., Crisen, Xavier.,(2020). *E Especificaciones sobre la adherencia entre las capas de un firme, tensiones cortantes de cálculo y tensiones admisibles.* Revista Técnica de la Asociación Epañola de la carretera. 4ª Época. N° 231. Sep/Dic 2020

Paba, I., y Vásquez, F. (2018). *Desempeño de ligantes bituminosos utilizados como riegos de ligas en carpetas de mezclas asfálticas, empleando la metodología del LCB.* https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16132/1/desempe%c3%91o%20de%20ligantes%20bituminosos%20utilizados%20como%20riegos%20de%20ligas%20en%20carpetas%20de%20mezclas%20asf%c3%81ltic.pdf

Paul, H., Scherocman, J. 1998. Friction testing of tack coat surfaces. Transportation Research Record: Journal of the 390 Transportation Research Board, (1616): 6-12

PITRA. Programa de Infraestructura del Transporte. (2017). *Evaluación de la adhesión de emulsiones asfálticas utilizadas en riegos de liga para pavimentos asfálticos LM-PI-UMP-066-R1*.

Quintero, G., y Bohórquez, E. (2020). *Aporte estructural de mezcla asfáltica en caliente con inclusión de plástico pet por vía seca a estructuras de pavimento flexible para vías de bajo tráfico según especificaciones INVIAS.* Universidad Católica de Colombia. Bogotá

Raposeiras, D. Castro-Fresno, A. Vega-Zamanillo, J. Rodriguez-Hernandez. (2013). *Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers.* GITECO Research Group, School of Civil Engineering, University of Cantabria Construction and Building Materials, vol. 43 (2013), pp. 372–381. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.011

Reyes Ortiz, Óscar Javier, Camacho Taut, Javier Fernando, & Reyes Lizcano, Fredy. (2006). *Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (36), 121-130. Retrieved March 07, 2023, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302006000200010&lng=en&tlng=es.

Riveral, J. (2022). *La adherencia entre capas de un pavimento flexible*. Tecnología Ingeniería Construcciones N° 008 de 2022. https://dolmen.com.ar/la-adherencia-entre-capas-de-un-pavimento-flexible.

Rodríguez Peralta, J. (2004). *Rehabilitación de carpetas asfálticas en pavimentos flexibles mediante la implementación de un sistema intercapa con geomallas y geotextiles no tejidos*. Uniandes.

Rodríguez Ana, M. (2013). *Sensibilidad al agua y propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición* Universidad de Coruña.

Roffe, J., y Chaignon, F. (2002). *Characterization Tests on Bond Coats: Worldwide Study, Impact, Tests, Recommendations.* International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements.

Romero-Sarmiento, D. (2017). *Cualificación cuantitativa de las patologías en el pavimento flexible para la vía Siberia – Tenjo de la Sabana de Bogotá omero-Sarmiento, D. (2017). Cualificación cuantitativa de las patologías en el pavimento flexible para la vía Siberia – Tenjo de la Sabana de Bogotá.* Universidad Católica de Colombia

Salazar Delgado, J. A., Pacheco Fallas, J. F., & Jimenez Alvarado, M. J. (2014). *Determinación de la resistencia a la tracción del asfalto (BBS) y trabajo de adhesión (WaL,S) de los ligantes asfalticos, mediante determinaciones de ángulo de contacto*. Métodos Y Materiales, 4(1), 17–23. https://doi.org/10.15517/mym.v4i1.21105

Sandoval, Cesar, & Orobio, Armando. (2013). *Efectos de las tolerancias de construcción en el desempeño de los pavimentos flexibles*. Revista ingeniería de construcción, 28(3), 266-277. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732013000300004

Sepúlveda, Nixon. (2019). *Evaluación de deterioro en un pavimento flexible, reporte de caso: Desde la avenida Francisco Fernández de Contreras, Calle 7 hasta la carrera 10, Ocaña Agua de la Virgen.* Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga

UNE Normalización Española. (2022). *UNE-EN-12697-48. Mezclas bituminosas Métodos de ensayo, parte 48: Adherencia entre capas.* Comité técnico CTN-UNE 41/ SC 2 Carreteras. Madrid -España.

USACE, 2000. *Manual de Carreteras, suelos, geología, geotecnia y Pavimentos*. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Dirección general de Caminos y ferrocarriles. Carreteras. Perú.

Van Dam y Shahin. 2005. exponen sus investigaciones en Informes técnicos. consultado en mayo de 2013. Página 33. Disponible en http://www.cflhd.gov/programs/techDevelopmen t/pavement / primetack/ documents/05_chapter3_review_tech_reports.pdf)

Vargas, P. (2008). *Estudio Experimental de Soluciones de Construcción para asegurar la adherencia entre capas asfálticas.* Universidad de Chile.

West, R., Zhang, J., y Moore, J. (2005). *Evaluation of Bond Strength Between Pavement Layers.* National Center for Asphalt Technology.

Xu T., Huang X. (2012), *Investigation into causes of in-place rutting in asphalt pavement*, Construction and Building Materials, Volume 28, Issue 1, March 2012, Pages 525-530.