



# Universidad **Mariana**

Evaluación de la adherencia de capas asfálticas y la humedad con diferentes tasas de  
aplicación de riego de liga

Haider Alexander Coronel Tapia

Karen Sofia Rosero Santacruz

Mateo Burbano Sarralde

Sebastián Enrique Narváez Rodríguez

Universidad Mariana

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

San Juan de Pasto

2024

Evaluación de la adherencia de capas asfálticas y la humedad con diferentes tasas de  
aplicación de riego de liga

Haider Alexander Coronel Tapia

Karen Sofia Rosero Santacruz

Mateo Burbano Sarralde

Sebastián Enrique Narváez Rodríguez

Informe de investigación para optar al título de: Ingeniero Civil

Mg. Jose Daniel Muñoz Martínez

Asesor

Universidad Mariana

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

San Juan de Pasto

2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007  
Universidad Mariana

Tabla de Contenido

1. Resumen.....	9
1.1. Abstract .....	10
1.2. Introducción .....	11
1.3. Formulación del problema .....	11
1.4. Justificación.....	11
1.5. Objetivos .....	12
1.5.1. Objetivo general.....	12
1.5.2. Objetivos específicos .....	12
1.6. Antecedentes .....	13
1.7. Metodología .....	15
1.7.1. Caracterización de materiales .....	15
1.7.2. Fabricación especímenes de prueba.....	18
1.7.3. Ensayo al esfuerzo cortante LPDS.....	19
1.7.4. Análisis de datos obtenidos.....	21
1.7.4.1 Caracterización de materiales.....	21
1.7.4.2 Proceso de elaboración de especímenes de prueba .....	27
1.7.4.3 Riego de liga.....	27
1.7.4.3.1 Elaboración de especímenes de prueba .....	28
1.7.5. Proceso de fallo por medio del ensayo LPDS.....	30
1.7.5.1 Descripción del equipo y ejecución del ensayo de adherencia .....	30
2. Resultados y Análisis .....	33
2.1. Productos generados.....	33
2.1.1. Divulgaciones .....	33
2.2. Resultados obtenidos.....	34
2.2.1. Fuerza cortante (kN) .....	34
2.2.1.1 Resistencia al esfuerzo cortante (MPa). .....	35
3. Conclusiones .....	39

3.1. Conclusiones .....	39
4. Recomendaciones para futuras investigaciones .....	41
Referencias bibliográficas .....	42

Lista de tablas

Tabla 1. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua ..	16
Tabla 2. Requisitos de calidad de emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida .....	17
Tabla 3. Distribución de especímenes de prueba .....	19
Tabla 4. Granulometría de agregado pétreo .....	22
Tabla 5. Granulometría de agregado fino.....	23
Tabla 6. Porcentaje de asfalto.....	24
Tabla 7. Gravedad específica de materiales .....	25
Tabla 8. Resultados de análisis volumétrico .....	25
Tabla 9. Resultados de ensayo Marshall .....	26
Tabla 10. Criterio de diseño para mezclas asfálticas en caliente.....	26
Tabla 11. Relación entre diámetro del espécimen y emulsión por aplicar .....	28
Tabla 12. Resultados obtenidos en el ensayo LPDS-sumergido 24 horas.....	34
Tabla 13. Resultados obtenidos en el ensayo LPDS-temperatura ambiente .....	35
Tabla 14. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante-sumergidos 24 horas .....	36
Tabla 15. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante-temperatura ambiente .....	36
Tabla 16. Tasa optima de aplicación del ligante .....	38

Lista de figuras

Figura 1. Esquema para ensayo LPDS .....	20
Figura 2. Curva granulométrica.....	22
Figura 3. Análisis volumétrico .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 4. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación y condición de los especímenes.....	37
Figura 5. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación y condición de los especímenes.....	37

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Molde para ensayo LPDS .....	19
Ilustración 2. Briquetas para definir porcentaje de asfalto óptimo .....	24
Ilustración 3. Aplicación de riego de liga .....	28
Ilustración 4. Especímenes en horno .....	29
Ilustración 5. Moldes para compactación de segunda capa .....	29
Ilustración 6. Especímenes de prueba fabricados .....	30
Ilustración 7. Aditamento .....	31
Ilustración 8. Rotura de especímenes de prueba.....	33

## **1. Resumen**

La presente investigación se centró en evaluar el efecto de la tasa de aplicación de riego de liga y la humedad en la adherencia de capas asfálticas. Para alcanzar este objetivo, se realizó la caracterización de las propiedades físicas de la mezcla asfáltica seleccionada para el desarrollo de la investigación. Este paso fue crucial para comprender la composición y el comportamiento de la mezcla, proporcionando una base sólida para el diseño experimental. Posteriormente, se procedió a la fabricación de especímenes de prueba utilizando la mezcla asfáltica caracterizada. Estos especímenes se prepararon meticulosamente siguiendo los estándares establecidos, garantizando la reproducibilidad y la representatividad de los resultados obtenidos. Una vez fabricados los especímenes, se llevaron a cabo pruebas de resistencia al esfuerzo cortante de la interfase adherida. Estas pruebas se realizaron bajo diferentes condiciones de tasa de aplicación de riego de liga (200, 300, 400 y 500 g/m<sup>2</sup>) y saturación de capas asfálticas, permitiendo así evaluar el impacto de estas variables en la adherencia de las capas asfálticas. Los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales proporcionaron una visión clara del efecto de la tasa de aplicación de riego de liga y la humedad en la adherencia de las capas asfálticas, obteniendo una tasa óptima 350 g/m<sup>2</sup> para especímenes sumergidos y de 325 g/m<sup>2</sup> para especímenes a condiciones normales.

**Palabras clave:** Tasa de aplicación, emulsión asfáltica, riego de adherencia, resistencia al corte entre capas, pavimento asfáltico.

### **1.1. Abstract**

The present research focused on evaluating the effect of the binder application rate and moisture on the adhesion of asphalt layers. To achieve this goal, the physical properties of the selected asphalt mix for the research were characterized. This step was crucial for understanding the composition and behavior of the mix, providing a solid foundation for the experimental design. Subsequently, test specimens were manufactured using the characterized asphalt mix. These specimens were meticulously prepared following established standards, ensuring the reproducibility and representativeness of the results obtained. Once the specimens were fabricated, tests were conducted on the shear strength of the adhered interface. These tests were carried out under different binder application rate conditions (200, 300, 400, and 500 g/m<sup>2</sup>) and asphalt layer saturation, thus allowing the evaluation of the impact of these variables on asphalt layer adhesion. The results obtained from the experimental tests provided a clear insight into the effect of the binder application rate and moisture on asphalt layer adhesion, achieving an optimal rate of 350 g/m<sup>2</sup> for submerged specimens and 325 g/m<sup>2</sup> for specimens under normal conditions.

**Keywords:** Application rate, asphalt emulsion, tack coat, interlayer shear strength, asphalt pavement.

## **1.2. Introducción**

En el ámbito de la ingeniería vial, la calidad de las capas asfálticas y su adherencia son aspectos críticos que influyen directamente en la durabilidad y seguridad de las carreteras. En Colombia, país caracterizado por su diversidad climática y geográfica, comprender cómo diferentes variables, como la tasa de aplicación de riego de liga y la humedad, afectan la adherencia de estas capas resulta fundamental para garantizar la eficiencia y durabilidad de la infraestructura vial.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar el impacto de la tasa de aplicación de riego de liga y la humedad en la adherencia de las capas asfálticas en el contexto colombiano. Para ello, se llevarán a cabo una serie de pruebas experimentales y análisis detallados que permitirán profundizar en el entendimiento de esta relación.

Se realizó una evaluación exhaustiva de la adherencia de las capas asfálticas, considerando diferentes niveles de tasa de aplicación de riego de liga y variaciones en el contenido de humedad.

Se llevaron a cabo pruebas experimentales en condiciones controladas, utilizando muestras representativas de capas asfálticas y simulando diversas condiciones climáticas para determinar el impacto de la tasa de aplicación de riego de liga y la humedad en la adherencia.

El propósito de este estudio es proporcionar información relevante y práctica que contribuya a optimizar los procesos de construcción y mantenimiento de carreteras en Colombia. Al comprender mejor cómo estas variables influyen en la adherencia de las capas asfálticas, se podrán implementar medidas más eficaces y sostenibles para mejorar la calidad de la infraestructura vial del país, promoviendo así la seguridad y el desarrollo socioeconómico.

## **1.3. Formulación del problema**

¿De qué manera afecta la adherencia entre capas asfálticas la tasa de aplicación del riego de liga y la humedad de dichas capas?

## **1.4. Justificación**

Esta investigación de trabajo de grado es importante porque la adherencia entre las capas asfálticas es un aspecto clave para la durabilidad y resistencia del pavimento. La calidad de la adherencia puede verse afectada por varios factores, incluyendo la tasa de aplicación del riego de liga y la saturación de las capas asfálticas. Por lo tanto, evaluar cómo estos factores influyen en la adherencia puede ayudar a mejorar la calidad del pavimento y prolongar su vida útil.

Además, el estudio de humedad de capas asfálticas y riego de liga es común en la construcción de carreteras, por lo que es importante comprender su impacto en la adherencia. La caracterización de la mezcla asfáltica y la fabricación de especímenes de prueba permitirán una evaluación más precisa y confiable de los resultados obtenidos.

Los resultados de esta investigación pueden ser útiles para desarrollar pautas y especificaciones para la construcción de carreteras y la selección de materiales, lo que puede tener un impacto significativo en la eficiencia y seguridad del transporte en las carreteras. En conclusión, la propuesta de investigación es relevante y contribuirá al conocimiento actual sobre la adherencia de capas asfálticas en diferentes condiciones de saturación y tasa de riego de liga.

## **1.5.Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo general***

Evaluar el efecto de la tasa de aplicación de riego de liga y la humedad, en la adherencia de capas asfálticas.

### ***1.5.2. Objetivos específicos***

- Caracterizar las propiedades físicas de la mezcla asfáltica a utilizar en el desarrollo de la investigación.
- Fabricar especímenes de prueba con base en la mezcla asfáltica caracterizada para esta investigación.
- Probar la resistencia al esfuerzo cortante de la interfase adherida a especímenes de prueba por medio del ensayo LPDS.
- Analizar el efecto de la tasa de aplicación de riego de liga y la humedad, en la adherencia de las capas asfálticas.

## **1.6. Antecedentes**

El pavimento de asfalto se compone de múltiples capas que se adhieren entre sí, pero a veces esta adhesión no es perfecta, lo que puede causar fallas en el pavimento. La distribución de tensiones y deformaciones en la estructura del pavimento es influenciada por la unión entre capas adyacentes, y el deslizamiento en esa unión puede reducir la vida útil del pavimento.

El proyecto de tesis se enfocó en el diseño de una emulsión asfáltica como agente humectante que promueve la adhesión entre capas de concreto asfáltico. Se elaboró una guía metodológica para diseñar un ligante emulsionado que cumpla con los requisitos del proyecto de construcción.

Se realizaron ensayos de resistencia al corte para evaluar la calidad de adherencia en la vida útil del pavimento. Se compararon los resultados de los ensayos con las fuerzas requeridas en el cálculo analítico de la estructura del pavimento, lo que ayudó a predecir la resistencia de la unión requerida en la interfaz. Se recomendaron límites para la resistencia de la unión entre capas según el modelo de pavimento y la masa del eje de tráfico. (Rendón Martínez, M. E., & Torres Dahbura, E. A.-2018).

Los investigadores del mundo discuten el efecto del remojo del aglutinante en la adhesión de capas de asfalto. Se analizaron factores como método de riego, cantidad de aplicación, temperatura, estado superficial y humedad. La resistencia al corte de las capas es crucial para la durabilidad de los pavimentos. Se evaluó el efecto del tipo y cantidad de ligante bituminoso en esta propiedad, utilizando dos tipos de emulsiones asfálticas y diferentes cantidades residuales. Se encontró que la resistencia al corte al usar CRL-1hm fue mayor que con CRL-1, y que esta resistencia aumentaba con la cantidad de uso. Se realizó una comparación teórica de los tiempos de repetición permitidos para el agrietamiento por fatiga, considerando la adhesión total y parcial. (Dorado Jurado & Rosero Pepinosa, 2018).

La adherencia entre capas de mezcla bituminosa en un pavimento elástico es crucial para su durabilidad, evitando grietas y deformaciones. Se han realizado estudios sobre el tema, analizando factores como la humectación, temperatura y tipo de emulsión. En el estudio experimental se evaluó la adherencia según normas específicas, formando sistemas bicapa para realizar ensayos de corte y determinar la cantidad óptima de emulsión. Se utilizaron ensayos de corte en L y se

calcularon parámetros de resistencia, deformación y energía. No se encontraron nuevos parámetros de control, ya que solo se consideró la fuerza cortante. Se observó que los resultados de los ensayos en laboratorio difieren de los controles, y que las muestras hechas sin equipo cumplen con los requisitos de la normativa. Se propone como dirección futura investigar métodos alternativos para la fabricación de sistemas de dos capas que simulen mejor la tecnología utilizada en el trabajo. (Herrero Castro, D.-2021).

El objetivo de investigación es evaluar diferentes emulsiones asfálticas (ECR-1P, ECR 60-90, ECR60-110, ECR-2P, ECR65-90, ECS60-90 y Termo adherente) cambiando su contenido y dosificación de asfalto. Para ello se utiliza el ensayo de corte directo LCB según la norma española NLT328/08. El ensayo permite determinar el esfuerzo cortante necesario para separar las dos capas como parámetro para evaluar la adhesión entre ellas. Para ello, se preparan piezas de prueba simulando la estructura de carpeta sobre carpeta. El objetivo de este trabajo es evaluar la adherencia de diferentes emulsiones asfálticas que se utilizan como ligante entre capas de revestimiento. (Ontiveros Rojas, Leticia-2013)

El exceso de riego se considera un método muy simple y relativamente económico, es esencial en todo el proceso de construcción del pavimento y aunque representa el 1% del costo total de pavimentación, un mal desempeño puede resultar en una pérdida del 30% del 100% de la inversión inicial (Stasiuk et al, (2018)) afirmando que la mala calidad de la emulsión o la dosificación inadecuada son los principales factores que causan grietas por deslizamiento en las capas asfálticas. Su función principal es proporcionar adhesión entre la superficie existente y la nueva capa asfáltica para evitar el deterioro por deslizamiento (Johnson, 2015), aunque existen recomendaciones para omitir el riego de adherencia para mezclas asfálticas en caliente más espesas de 100 mm. (Leands Highway, 2005).

En el estudio se analiza la importancia estructural de las emulsiones asfálticas utilizadas en pavimentos, en particular en el proceso de "Riego de Liga". Se realizan ensayos de corte para evaluar la resistencia de adherencia entre las capas de la carpeta asfáltica, considerando variables como dosis de riego, propiedades de las emulsiones, temperatura de compactación y contaminación de riegos. Se concluye que una dosis óptima de residuo para las emulsiones se encuentra entre 0.11

y 0.21 lt/m<sup>2</sup>, valores inferiores a los comúnmente recomendados. Se destaca que cualquier contaminación del residuo o disminución de la temperatura de compactación afecta negativamente la adherencia. La emulsión M1 mostró los mejores resultados, con un 85% de resistencia monolítica. Finalmente, se sugiere reducir el porcentaje de adherencia en las probetas WTT en un 30% en comparación con las probetas monolíticas, y se destaca la eficacia de la metodología utilizada como una herramienta confiable y de fácil aplicación en el diseño de pavimentos. (Alvarez Calisto, Cristian Fabián, 2007).

La acción del adhesivo o humectante en el proceso de construcción de carreteras consiste en aplicar una capa fina de sustancia bituminosa líquida sobre diferentes superficies, como losas bituminosas, de hormigón, bases granulares o previamente estabilizadas con capa asfáltica. El propósito de este proceso es promover la adherencia necesaria para que la capa asfáltica pueda trabajar juntamente con la estructura existente y transferir la carga del tráfico de manera eficiente. En Costa Rica, el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR2010) regula el uso de la emulsión asfáltica en este proceso.

La emulsión asfáltica es un material bituminoso líquido utilizado como ligante en la instalación de revestimientos de mezclas asfálticas. Debe diluirse con agua en proporción 1:1 y su dosis de aplicación varía según las indicaciones del ingeniero de proyecto. En Costa Rica, se deben evitar problemas comunes como la aplicación desigual del adhesivo, mezcla excesiva en las juntas o falta de tiempo para romper la emulsión, ya que afectan las propiedades de la capa que se va a fijar. (Programa Infraestructura de transporte, 2015).

## **1.7. Metodología**

### ***1.7.1. Caracterización de materiales***

**Agregados pétreos:** Para determinar las dosificaciones de riego de liga que fue aplicado a los especímenes de ensayo, se tuvieron en cuenta los parámetros establecidos en el artículo 421-22 del INVIAS, aplicando los diferentes estudios realizados hasta el momento, donde se indica tanto las cantidades a usar en las capas asfálticas de riego de liga como también la temperatura que tendrán que manejar y las condiciones que debe manejar la estructura para una correcta aplicación del riego de liga.

En el caso de Colombia se cuenta con el artículo 421-22 donde se indica que bajo unas condiciones normales se tiene una tasa de aplicación de doscientos y trescientos gramos sobre metro cuadrado (200 a 300 g/m<sup>2</sup>) (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS-2022), sin embargo, no se proporciona parámetros cuantitativos o cualitativos para determinar el valor a utilizar, razón por la cual se escogieron datos razonables para la realización de la investigación.

Si bien, no hay una dosificación de aplicación de riego de liga específica u óptima, para esta investigación se seleccionaron 4 dosificaciones las cuales fueron de 200-300-400-500, todas en la misma unidad de medida, que es g/m<sup>2</sup>. Así como también se definió el uso de un tipo de emulsión asfáltica para la investigación, la cual es una emulsión asfáltica de rotura rápida tipo 1 (CRR-1). Esta selección se realizó para comparar las reacciones de la emulsión a diferentes tasas de aplicación y a la saturación y no saturación, así como la disponibilidad de estas en el mercado.

El material conocido como "agregado pétreo" utilizado en la investigación consiste en una mezcla de varios tipos de materiales triturados, incluyendo grava y arena. Este material se obtendrá de la cantera PANAVIAS y se utilizará para crear la mezcla asfáltica necesaria para el estudio. Para llevar a cabo la caracterización de estos materiales, se realizó el ensayo de granulometría, siguiendo las especificaciones de la norma INVIAS Capítulo 4, Artículo 450-22. De acuerdo con las directrices proporcionadas en esta norma, la combinación de las diferentes fracciones, incluyendo el relleno mineral, debe cumplir con los límites establecidos en la tabla proporcionada por INVIAS (Tabla 1. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua). El análisis granulométrico se realizará siguiendo las pautas de la norma INV E-213.

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

		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.18	0.075
TIPO DE MEZCLA		1/2 "	<sup>1</sup> 1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No.10	No.40	No.80	No.200
	% PASA										
DENSA	MDC - 25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC - 19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10

El análisis granulométrico se llevó a cabo siguiendo las pautas de la norma INV E-213 permitiendo caracterizar el material y determinar su composición, incluyendo el porcentaje de gravas y arenas, así como los tamaños de partículas presentes. Teniendo en cuenta la tabla anterior (Tabla I. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua), se ha decidido trabajar en específico con un tipo de mezcla densa, en concreto la MDC-19.

- Riego de liga:

Se empleó un tipo de ligante como riego de liga, una emulsión catiónica de rotura rápida CRR-1:

Tabla 2. Requisitos de calidad de emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida

Tipos de emulsiones	Norma de Ensayo IVN - 07	Rompimiento rápido		Rompimiento medio		Rompimiento lento							
		CRR - 1		CRR - 2		CRM		CRL - 0		CRL - 1		CRL - 1h	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>1. ENSAYO SOBRE EMULSIÓN</b>													
Viscosidad	E- 763												
Saybolt Furol a 25 C seg		-	-	-	-	-	-	50	-	200	-	100	
Saybolt Furol a 50 C seg		20	100	20	300	20	450	-	-	-	-	-	
Contenido de agua en volumen %	E- 761	-	40	-	35	-	35	-	50	-	43	-	43
Estabilidad Almacenamiento Sedimentación a los 7 días %	E - 764	-	5	-	5	-	5	-	10	-	5	-	5
Destilación Contenido de Asfalto Residual %	E- 762	60	-	65	-	60	-	40	-	57	-	57	-
Contenido de disolventes %		-	3	-	3	-	12	10	20	-	-	-	0
Tamizado Retenido Tamiz 20 (850 µm)	E - 765	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1
Rotura Dioctisulfosuccinato  sódico %	E - 766	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Mezcla con cemento %	E- 770	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Carga Partícula	E - 767	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	
PH	E - 768	-	6	-	6	-	6	-	6	-	6	6
Recubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento con agregado seco	E- 769	-	-	-	-	Buena	-	-	-	-	-	-
Con agregado seco y acción del agua		-	-	-	-	Satisfactoria	-	-	-	-	-	-
Con agregado húmedo		-	-	-	-	Satisfactoria	-	-	-	-	-	-
Con agregado húmedo y acción del agua		-	-	-	-	Satisfactoria	-	-	-	-	-	-

### 1.7.2. Fabricación especímenes de prueba

Se llevó a cabo la realización de distintos especímenes de prueba con forma cilíndrica, siguiendo las especificaciones establecidas en la norma española (NLT382/08). Estos cilindros de prueba constaron de dos capas asfálticas de espesores 5 cm y 6 cm, respectivamente, adheridas entre sí mediante riego de liga (tack coat), que se considera el método óptimo para la unión de dos capas asfálticas. Así mismo, se diseñaron muestras de las capas asfálticas con diferentes tasas de aplicación (200, 300, 400 y 500 g/m<sup>2</sup>) de riego de liga y la humedad de las capas asfálticas.

Estos especímenes tuvieron la referencia de la briqueta tipo Marshall, las cuales contaron con un diámetro de 4 pulgadas (101 mm) y una altura de 2.5 pulgadas (63.5 mm), además de esto se trabajó los especímenes de prueba con dos capas asfálticas con la mezcla ya caracterizada, las cuales estuvieron unidas por el riego de liga de tipo CRR-1, en total se fabricaron 24 especímenes distribuidos así:

Tabla 3. Distribución de especímenes de prueba

TIPO DE LIGANTE	DOTACIÓN DE LIGANTE	CONDICIÓN	# ESPECÍMENES	SUBTOTAL	TOTAL
CRR-1	200	SUMERGIDO	3	12	24
	300		3		
	400		3		
	500		3		
	200	SIN SUMERGIR	3	12	
	300		3		
	400		3		
	500		3		

### 1.7.3. Ensayo al esfuerzo cortante LPDS

Para probar la resistencia al esfuerzo cortante de la interfase adherida de especímenes de prueba, se empleó el ensayo LPDS, que se adaptó con la combinación del corte directo US/Belge y el Swiss LPDS Tester.

Dado que en el laboratorio de ingeniería civil de la Universidad Mariana no contaba con el instrumento necesario para la correcta elaboración del ensayo, se fabricó este instrumento, que fueron una especie de mordazas, las cuales se encargaron de fallar correctamente cada espécimen de prueba usado y de esta manera se pudo obtener resultados exitosos, cabe recalcar que estas fueron elaboradas en hierro.

*Ilustración 1. Molde para ensayo*



Esta prueba simula el movimiento vertical de la unión de dos capas asfálticas. La capa inferior de la muestra de doble capa se coloca sobre un cojinete en U y la capa superior se mueve a una velocidad de desplazamiento perpetuo de 2 mm/min a una temperatura de 25 °C por medio de un yugo, lo que permite un corte, fuerza que se introducirá en la interfaz. La resistencia al corte se registró una vez que alcanzó su máxima resistencia al corte. Para encontrar la carga máxima, se miden continuamente la fuerza cortante y el desplazamiento asociado. (New Testing Protocols to Assess the Performance of Pavement Bituminous Crack-Sealant Material, 2020). Y se obtendrá los respectivos valores, a través de la siguiente ecuación:

$$LPDS = F/A$$

$$LPDS = 4F/(d2\pi)$$

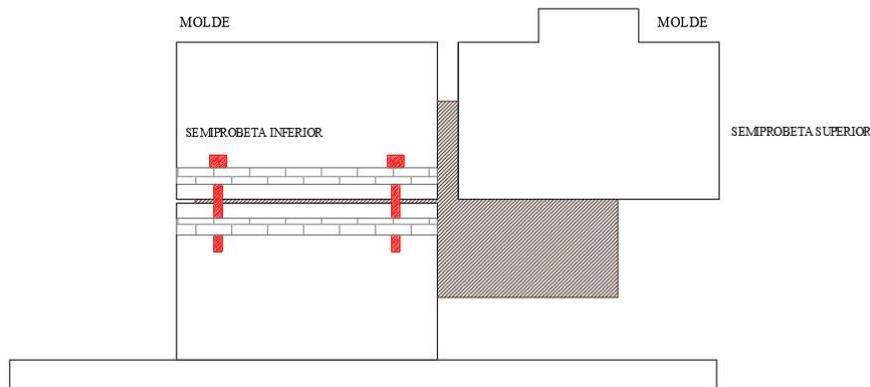
Donde:

F = Fuerza máxima

A = Área de la sección transversal

d = Diámetro de la muestra

Figura 1. Esquema para ensayo LPDS



La temperatura del ensayo se estableció teniendo en cuenta la temperatura media anual del municipio de San Juan de Pasto- Nariño, ya que este es el lugar donde se utilizarán los materiales

a analizar y así mismo la aplicación del presente estudio. Esta temperatura se la obtendrá a partir de la altitud media de la ciudad y haciendo uso de la siguiente expresión (Sánchez & Campagnoli,2016):

$$T = 30 - \frac{6.3 H}{1000}$$

Donde:

H = Altura sobre el nivel del mar

T = Temperatura media anual

#### **1.7.4. Análisis de datos obtenidos**

Los resultados obtenidos de las pruebas y ensayos fueron analizados para comparar los diferentes niveles de tasa de aplicación y la saturación o no de los especímenes, a fin de determinar su efecto en la adherencia de las capas asfálticas. En consecuencia, se obtuvieron las conclusiones pertinentes a partir de los datos obtenidos en estas pruebas. Es importante destacar que las muestras fueron confeccionadas en laboratorio para efectos de la presente investigación.

**1.7.4.1 Caracterización de materiales.** Teniendo en cuenta los materiales a utilizar durante el desarrollo de la investigación, se realizaron diferentes ensayos de laboratorio con el fin de verificar las propiedades de los diferentes materiales a utilizar en la mezcla de asfalto en caliente.

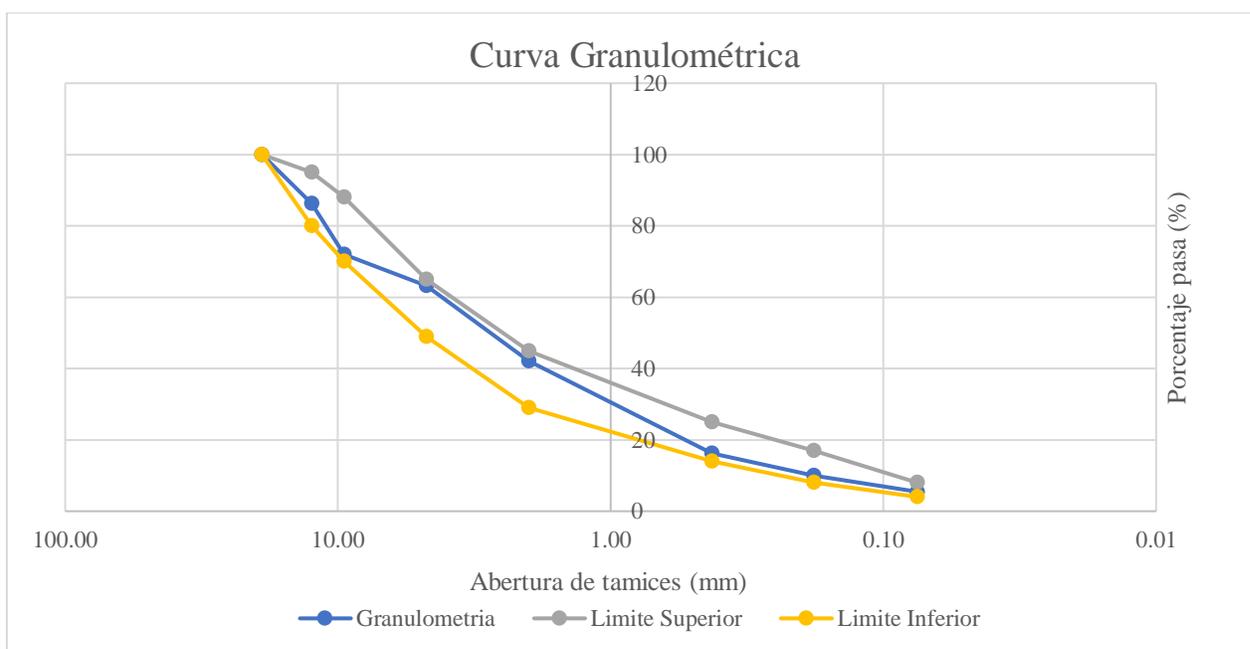
En caso de los materiales como el agregado grueso y el agregado fino, se obtuvieron de la cantera PANAVIAS, los cuales serán utilizados para la realización de los especímenes de prueba. Para llevar a cabo la caracterización de estos materiales, se realizó el ensayo de granulometría según las especificaciones de la norma INVIAS capítulo 4, Artículo 450-1. Donde se tomó un 50% de material grueso y un 50% de material fino. Obteniendo la siguiente distribución de tamaños de partículas en la tabla 4.

Tabla 4. Granulometría de agregado pétreo

Tamiz (in)	Tamiz (mm)	Fracción Pasante (%)	Puntos de Control INV Art.450 (%)	
			Superior	Inferior
3/4	19.00	100	100	100
1/2	12.50	86.32	95	80
3/8	9.50	72.05	88	70
N° 4	4.75	63.21	65	49
N° 10	2.00	42.18	45	29
N° 40	0.425	16.28	25	14
N° 80	0.180	9.84	17	8
N° 200	0.075	5.46	8	4

Lo anterior se puede observar gráficamente en la figura.

Figura 2. Curva granulométrica



Adicionalmente se encontró un coeficiente de uniformidad  $c_u = 7.72$  y un coeficiente de curvatura  $c_c = 1.94$ .

Teniendo en cuenta la curva granulométrica, se puede concluir que el agregado pétreo a utilizar durante el desarrollo de la investigación se encuentra dentro de la franja de control permitida por

las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías para una mezcla densa en caliente MDC-19.

Se procede a encontrar el valor óptimo de asfalto a utilizar en la elaboración de los especímenes de prueba. Primero se obtiene la estimación del contenido óptimo de asfalto, el cual viene dado por la siguiente formula.

$$P = 0.02A + 0.07B + 0.15C + 0.20D$$

P: Porcentaje de asfalto respecto a peso de agregado seco.

A: Porcentaje de agregado retenido en tamiz N° 50.

B: Porcentaje de agregado pasante de tamiz N° 50 y retenido en tamiz N° 100.

C: Porcentaje de agregado pasante de tamiz N° 100 y retenido en tamiz N° 200.

D: Porcentaje de agregado pasante de tamiz N° 200.

Los porcentajes del agregado que se requieren para el cálculo vienen dados por la granulometría del agregado fino, como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5. Granulometría de agregado fino

Granulometría de finos				
Tamiz	Retenido (g)	%Retenido	%Acumulado	%Pasa
#8	108	4.32	4.32	95.68
#10	30	1.2	5.52	94.48
#16	109	4.36	9.88	90.12
#20	277	11.08	20.96	79.04
#30	375	15	35.96	64.04
#40	317	12.68	48.64	51.36
#50	473	18.92	67.56	32.44
#60	142	5.68	73.24	26.76
#80	259	10.36	83.6	16.4
#100	134	5.36	88.96	11.04
#140	164	6.56	95.52	4.48
#200	70	2.8	98.32	1.68
Fondo	42	1.68	100	0
<b>TOTAL</b>	<b>2500</b>	<b>100</b>		

Con estos datos se obtuvo la estimación de contenido óptimo de asfalto de la siguiente manera.

$$P = \frac{0.02(18.92) + 0.07B(22.94 + 5.36) + 0.15(11.04 + 2.8) + 0.20(1.68)}{100} = 5.4\%$$

De esta forma se procedió a realizar 15 especímenes de prueba, teniendo en cuenta que cada uno de estos tendrá un peso 1.200 g, y de los cuales se realizaran 3 especímenes teniendo en cuenta 5 porcentajes de asfalto, 1% por encima y 1% por debajo de la estimación realizada.

Tabla 6. Porcentaje de asfalto

Porcentajes de asfalto	Porcentaje real asfalto	masa asf	# de briquetas
4.5%	4.5%	54.0	3 briquetas
5.0%	5.0%	60.0	3 briquetas
5.5%	5.5%	65.0	3 briquetas
6.0%	6.0%	72.0	3 briquetas
6.5%	6.5%	78.0	3 briquetas

Ilustración 2. Briquetas para definir porcentaje de asfalto óptimo



Una vez realizados estos especímenes se procedió a realizar, a estos, el ensayo de gravedad específica bulk e igualmente se realizó el ensayo de gravedad específica máxima teórica de la muestra. Una vez realizados estos 2 ensayos, aparte de también haber realizado los ensayos de gravedad específica para los agregados a utilizar, así como también para el asfalto, se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 7. Gravedad específica de materiales

Gravedad específica Grueso	Gravedad específica Fino	Gravedad específica Cemento	Gravedad específica Asfalto
2.31	1.78	2.35	1.053

Una vez realizados estos laboratorios, se continuó a realizar los cálculos para encontrar los valores de gravedad específica bulk de la mezcla (Gmb), gravedad específica máxima teórica de la mezcla (Gmm), gravedad específica promedio de los agregados (Gsb), Contenido de vacíos (VA), contenido de CA total, % en peso de la mezcla (PB), contenido de CA total, % en volumen de la mezcla (VB), contenido de CA absorbido, % en volumen de la mezcla (VBA), contenido de CA absorbido, % en volumen de la mezcla (VBE), contenido de CA efectivo, % en peso de la mezcla (PBE), contenido de CA absorbido, % en peso de la mezcla (PBA), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos de asfalto (VFA), espesor de la película aparente de asfalto (AFT).

Tabla 8. Resultados de análisis volumétrico

Porcentaje de asfalto	Gmb	Gmm	Gsb	VA	PB	VB	VBA	VBE	PBE	PBA	VMA	VFA	AFT
4.50%	1.750	1.260	1.751	4.567	4.306	7.157	1.786	5.371	3.232	1.075	9.938	59.623	14.577
5.00%	1.750	1.590	1.745	4.623	4.762	7.914	1.792	6.122	3.684	1.078	10.745	62.349	16.696
5.50%	1.760	1.780	1.741	4.691	5.123	8.563	1.861	6.702	4.010	1.113	11.393	63.946	18.244
6.00%	1.830	1.900	1.735	6.290	5.660	9.837	2.015	7.822	4.501	1.159	15.112	66.423	20.595
6.50%	1.950	2.200	1.730	5.289	6.103	11.302	2.156	9.146	4.939	1.164	14.435	68.263	22.706

También se tuvo en cuenta los resultados de la carga máxima y la deflexión axial que tuvieron los especímenes de prueba al aplicarles el ensayo tipo Marshall, los cuales se ven reflejados en la siguiente tabla.

Tabla 9. Resultados de ensayo Marshall

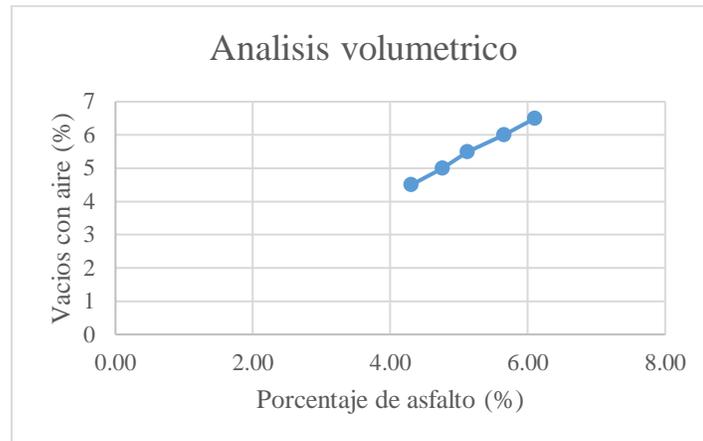
Tabla 10. Resultados de ensayo Marshall

Especímenes de Prueba					
%Asfalto	Nº Especímen	Carga Máxima (KN)	Promedio	Deflexión Axial (mm)	Promedio
4.50%	1	22.769	30.168	4.476	4.40
	2	41.206		5.368	
	3	26.529		3.349	
5.00%	1	19.58	21.154	3.597	4.44
	2	22.987		4.605	
	3	20.895		5.132	
5.50%	1	17.372	17.831	3.601	3.04
	2	21.409		3.794	
	3	14.712		1.721	
6.00%	1	19.925	20.246	5.051	4.32
	2	20.569		4.682	
	3	20.245		3.229	
6.50%	1	17.902	22.327	2.959	3.35
	2	18.83		3.529	
	3	30.25		3.573	

Tabla 11. Criterio de diseño para mezclas asfálticas en caliente

CRITERIOS PARA DISEÑO		
Características	resultados	requisito
Compactación (golpes/cara)	75	75
Estabilidad mínima (n)	20,246	20250 kN
flujo (mm)	4,32	3 - 5,3
Relación estabilidad/flujo (kN/mm)	6,7	4,5 - 9
Vacíos con aire (va) (%)	6,29	4 - 7
Vacíos agregados minerales (vam), mínimo (%)	15	15
Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)	66,423	65 - 75
Relación llenante/ligante efectivo, en peso	1	0,8 - 1,2

*olp*



Teniendo en cuenta estos resultados y la norma de diseño INV E-748 del INVIAS, podemos concluir que el valor óptimo de asfalto para la realización de los especímenes de prueba es de 6% de asfalto en la mezcla con una masa asfáltica de 72 g.

**1.7.4.2 Proceso de elaboración de especímenes de prueba.** Una vez realizada la caracterización del material y haber definido el porcentaje de asfalto óptimo, se procedió a realizar los especímenes de prueba, teniendo en cuenta la dosificación previamente establecida. La cantidad de mezcla necesaria para fabricar los especímenes de prueba se dosifica previamente en laboratorio mediante tamizado, secado y pesaje del agregado pétreo requerido en la granulometría.

**1.7.4.3 Riego de liga.** En el desarrollo del presente trabajo se empleó un tipo de ligante bituminoso como riego de liga, una emulsión catiónica de rotura rápida CRR-1.

**1.7.4.3.1 Elaboración de especímenes de prueba.** Para el proceso de elaboración de especímenes de prueba y ensayo, se empezó con la realización de las primeras capas (briquetas). Para la fabricación de estas se utilizaron los moldes tipo Marshall, siempre teniendo en cuenta la cantidad de golpes, que para este caso fue de 75 golpes por cara debido a que se estudió para un nivel de tránsito tipo 3 (T-3), estos especímenes se dejan reposar por 24 horas. Pasado el tiempo se procedió a desmoldar las briquetas e inmediatamente se procedió a la aplicación del riego de liga con las cantidades estudiadas.

Cabe recalcar que la cantidad de ligante que se aplicó se calculó por medio del diámetro de la cara de la briqueta, y una vez aplicado se llevaron al horno a 25 C° por 24 horas, con el fin de asegurar la rotura y evaporación total de agua que se presentaba en la dispersión.

*Tabla 12. Relación entre diámetro del espécimen y emulsión por aplicar*

Tasa de Aplicación (g/m <sup>2</sup> )	200	300	400	500
Emulsión CRR-1 (g)	1.62	2.43	3.24	4.05

*Ilustración 3. Aplicación de riego de liga*



*Ilustración 4. Especímenes en horno*



Para aplicar la segunda capa se utilizaron los moldes para evaluar la resistencia a la compresión simple de mezclas asfálticas. Este molde tiene forma cilíndrica con el mismo diámetro. Este molde permitió formar la primera capa de la muestra, que ya contenía el asfalto residual de la emulsión, y compactar sobre ella una segunda capa de mezcla asfáltica de 5 cm de espesor. Dado que esta capa sólo se compacta, por un lado, se realizaron 100 golpes para asegurar una adecuada compactación.

*Ilustración 5. Moldes para compactación de segunda capa*



*Ilustración 6. Especímenes de prueba fabricados*



Después del enfriamiento del conjunto bicapa de mezcla asfáltica adherida con emulsión preparado de esta forma, se obtuvo el espécimen de prueba para el estudio de la adherencia.

#### ***1.7.5. Proceso de fallo por medio del ensayo LPDS***

***1.7.5.1 Descripción del equipo y ejecución del ensayo de adherencia.*** Al no contar con el equipo del ensayo LPDS, se construyó el equipo desde cero y se adaptó la prensa Multiensayos para el desarrollo de la prueba. Se fabricó un aditamento conformado por 2 mordazas encargadas de sostener el espécimen de prueba en la primera capa y 1 mordaza de tal forma que la interfaz y la segunda capa se encuentre por fuera de las 2 mordazas para soportar la carga, las partes del equipo desarrollado para este estudio fueron los siguientes:

Al no contar con el equipo del ensayo LPDS, se construyó el equipo desde cero y se adaptó la prensa Multiensayos para el desarrollo de la prueba. Se fabricó un aditamento conformado por 2 mordazas encargadas de sostener el espécimen de prueba en la primera capa y 1 mordaza de tal forma que la interfaz y la segunda capa se encuentre por fuera de las 2 mordazas para soportar la carga, las partes del equipo desarrollado para este estudio fueron los siguientes:

- **Prensa Multiensayos:**

- Intervalo de medida de carga: 0 a 50 kN.
- Rango de desplazamiento (penetración, elongación): 50 mm.
- Exactitud de la medición de desplazamiento: 0,05% +/-0,05 mm.

- Operación 220 vac/60 Hz.
- **Aditamento:** Se compone por 2 mordazas que sujetan la primera capa del cuerpo de prueba (6cm).

*Ilustración 7. Aditamento*



El funcionamiento del equipo consistió en la aplicación de una carga tangencial sobre la unión o interfaz entre las capas a una velocidad constante de (50 mm/min). El resultado es la carga máxima de resistencia.

Para determinar la temperatura experimental se tuvo en cuenta la temperatura promedio anual del municipio de San Juan de Pasto, departamento de Nariño, debido a que es aquí donde se utilizan las áreas de análisis y aplicación de este estudio. Esta temperatura se calculó utilizando la altitud promedio de la ciudad y la siguiente fórmula, aplicada por Sánchez y Campagnoli, en su libro pavimentos asfálticos de carreteras.

$$T = 30 - \frac{6.3H}{1000}$$

Donde,

T = Temperatura media anual, °C

H = Altura sobre el nivel del mar, m

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

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

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

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

Donde,

$M_p$  = Temperatura media de la mezcla, °F

$M_a$  = Temperatura media ponderada del aire, °F

$z$  = Profundidad bajo la superficie, pulgadas

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

Considerando lo expuesto y dado que la temperatura de los materiales constituyentes de la interfaz de unión y la mezcla asfáltica es un aspecto crucial en la adhesión resultante, se acondicionaron los especímenes de prueba al horno de laboratorio ajustado a 20°C durante un período de 3 horas, previo a la realización del ensayo.

El ensayo LPDS no se realiza en Colombia, razón por la cual se adaptó la prensa Multiensayos utilizada para el ensayo Marshall, cumple con las normas ASTD D1559, la aplicación de carga se hace a velocidad prefijada para prueba Marshall, correspondiente a 50 mm/min, sin embargo, se tomó una velocidad de 2 mm/min teniendo en cuenta la norma del ensayo LPDS.

Teniendo en cuenta la metodología del presente trabajo, 12 de los 24 especímenes de prueba fueron sumergidos durante 24 horas en agua a una temperatura ambiente con el fin de identificar si existe una diferencia entre los especímenes sumergidos y los especímenes a temperatura ambiente.

El ensayo LPDS es una modificación del ensayo Leuther, el cual se desarrolló para evaluar la adherencia entre dos capas asfálticas con un tipo de ligante bituminoso con cinco tasas de aplicación. Las tasas de aplicación se escogieron partiendo de la normatividad del Instituto Nacional de Vías en su especificación INV 421-22, donde la razón recomendada es de 200 g/m<sup>2</sup> a 300 g/m<sup>2</sup>, con lo cual se escogieron tales límites establecidos junto a dos valores adicionales, donde se varió la dosificación cada 100 g/m<sup>2</sup>, de esta manera se estableció la dosificación de ligante

bituminoso mínimo de 200 g/m<sup>2</sup>, 300 g/m<sup>2</sup>, 400 g/m<sup>2</sup> y 500 g/m<sup>2</sup>. Se probaron un total de (24) especímenes, con los cuales se procedió a realizar cálculos para determinar la fuerza cortante máxima (kN).

El funcionamiento del equipo consiste en la aplicación de una carga sobre la unión o interfaz entre las capas a una velocidad constante de (2 mm/min). El resultado es la carga máxima de la resistencia a la rotura.

*Ilustración 8. Rotura de especímenes de prueba*



## **2. Resultados y Análisis**

### **2.1. Productos generados**

#### **2.1.1. Divulgaciones**

Para la correcta elaboración de la investigación, se procedió a realizar un artículo de investigación, presentado a la revista de ingeniería de la Universidad de Antioquia, el cual se centra en dar a conocer la investigación desde múltiples perspectivas.

Teniendo en cuenta el uso de herramientas analíticas avanzadas y una cuidadosa interpretación de los datos, se generaron conclusiones fundamentadas que enriquecen la comprensión existente

sobre la investigación, el artículo fue recibido y mandado a hacer algunas correcciones para su correcta publicación, sin embargo, se continua con espera para que la publicación sea exitosa.

## 2.2.Resultados obtenidos

El ensayo LPDS se desarrolló con el fin de evaluar la adherencia entre dos capas de mezcla asfáltica, con cuatro dosificaciones de riego de liga, se elaboró un grupo de especímenes de prueba los cuales fueron fabricados a partir de una misma mezcla bituminosa y se aplicó una emulsión CRR-1 como riego de liga.

### 2.2.1. Fuerza cortante (kN)

Fueron fabricados 3 especímenes para cada dosificación de ligante asfáltico y dos condiciones diferentes, los cálculos se realizaron con la fuerza aplicada por el pistón de carga del equipo, se identificó la fuerza máxima que resistió el espécimen. En las tablas 12 y 13 se muestran los resultados obtenidos del ensayo LPDS.

Tabla 13. Resultados obtenidos en el ensayo LPDS-sumergido 24 horas

Especímenes Sumergidos 24 horas			
Tasa de Aplicación (g/m <sup>2</sup> )	N° Espécimen	FCR (kN)	Promedio
200	1	1.36	1.41
	2	1.44	
	3	1.42	
300	1	2.16	2.09
	2	1.98	
	3	2.13	
400	1	1.85	1.75
	2	1.76	
	3	1.65	
500	1	1.35	1.4
	2	1.56	
	3	1.29	

Tabla 14. Resultados obtenidos en el ensayo LPDS-temperatura ambiente

Especímenes a Temperatura Ambiente			
Tasa de Aplicación (g/m <sup>2</sup> )	Nº Especimen	FCR (kN)	Promedio
200	1	2.22	2.33
	2	2.48	
	3	2.29	
300	1	2.49	2.60
	2	2.46	
	3	2.84	
400	1	2.36	2.36
	2	2.24	
	3	2.49	
500	1	2.15	2.22
	2	2.16	
	3	2.34	

**2.2.1.1 Resistencia al esfuerzo cortante (MPa).** Se continuó con el procesamiento de la información, con el cálculo del esfuerzo cortante que se produce en la superficie de unión, utilizando para ello la ecuación que es equivalente a la siguiente:

$$REC = FCR/S$$

Donde:

REC = Resistencia al esfuerzo cortante

FCR = Fuerza cortante de rotura

S = Área de la sección transversal

Con la magnitud del diámetro de los especímenes de prueba se calculó el área de la sección transversal, y con la fuerza cortante que se produce en cada condición (Tablas 12 y 13) se obtuvo la resistencia al esfuerzo cortante que se produce en cada caso. Los resultados se muestran en las Tablas 14 y 15.

Tabla 15. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante-sumergidos 24 horas

Especímenes Sumergidos 24 horas			
Tasa de Aplicación (g/m <sup>2</sup> )	Nº Espécimen	REC (MPa)	Promedio
200	1	0.17	0.18
	2	0.18	
	3	0.18	
300	1	0.27	0.26
	2	0.25	
	3	0.27	
400	1	0.23	0.22
	2	0.22	
	3	0.21	
500	1	0.17	0.18
	2	0.20	
	3	0.16	

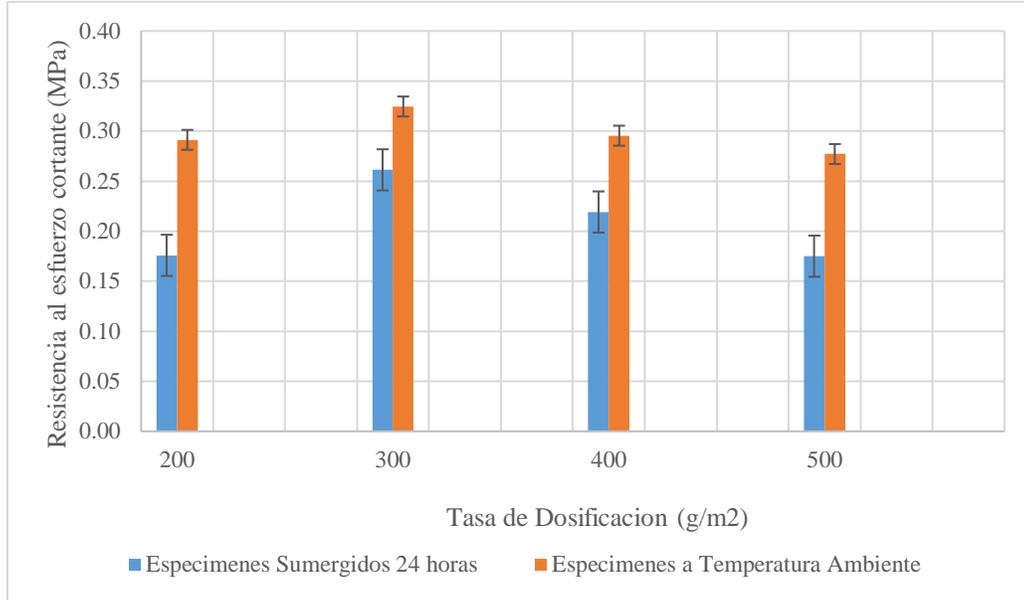
Tabla 16. Resultados de resistencia al esfuerzo cortante-temperatura ambiente

Especímenes a Temperatura Ambiente			
Tasa de Aplicación (g/m <sup>2</sup> )	Nº Especimen	REC (Mpa)	Promedio
200	1	0.28	0.29
	2	0.31	
	3	0.29	
300	1	0.31	0.32
	2	0.31	
	3	0.36	
400	1	0.30	0.30
	2	0.28	
	3	0.31	
500	1	0.27	0.28
	2	0.27	
	3	0.29	

La figura presenta la variación de la resistencia al corte frente a la condición y a la dosificación de los especímenes. Se observó que aquellos especímenes que se mantuvieron a una temperatura ambiente presentaron una mayor resistencia al esfuerzo cortante, además se revela una variación

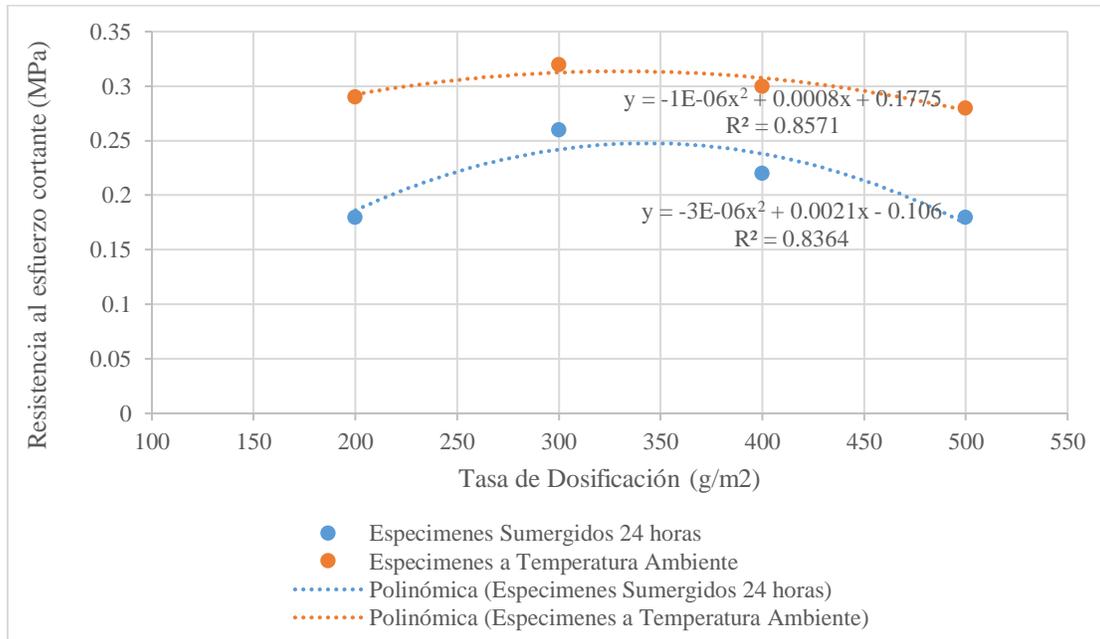
de dicha magnitud con el aumento de la dosificación de ligante presente en la interfase de las capas bituminosas.

Figura 4. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación y condición de los especímenes



La figura 7 presenta cada uno de los resultados individuales calculados para la resistencia al esfuerzo cortante (Tablas 14 y 15) junto con una curva de regresión polinómica de 3 grado obtenida para cada grupo de resultados según la condición del espécimen.

Figura 5. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación y condición de los especímenes



A partir del comportamiento observado de la resistencia al esfuerzo cortante con respecto a la tasa de aplicación de ligante se encontró que en los 2 grupos de especímenes existe un valor máximo de resistencia, dicha dosificación puede considerarse como óptima, ya que está asegurada una mayor aproximación al comportamiento que se requiere para las capas asfálticas. La tabla 16 muestra la tasa óptima de aplicación calculada utilizando las curvas de regresión polinómicas de tercer grado de la figura 5.

*Tabla 17. Tasa optima de aplicación del ligante*

Tipo de emulsión	Tasa optima de aplicación para especímenes a temperatura ambiente (g/m <sup>2</sup> )	Tasa optima de aplicación para especímenes sumergidos 24 horas (g/m <sup>2</sup> )
CRR-1	325	350
Resistencia al Esfuerzo Cortante (Mpa)	0.31	0.25

### **3. Conclusiones**

#### **3.1. Conclusiones**

En el presente trabajo de grado se estudió el efecto de la tasa de aplicación de ligante residual en conjunto con dos condiciones diferentes, llevando a cabo una prueba de esfuerzo cortante que actúa en la unión de las capas asfálticas y permite obtener parámetros de caracterización de la adherencia. Realizando el ensayo LPDS variando la aplicación del ligante asfáltico y analizando el comportamiento de la adherencia a diferentes condiciones. Además, se realizó un análisis teórico sobre el efecto de la adherencia parcial. A partir de los resultados obtenidos se presenta a continuación las conclusiones obtenidas:

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos durante la investigación, se puede concluir que la hipótesis planteada al inicio de la investigación fue incorrecta, ya que se logró observar una mayor resistencia al esfuerzo cortante al tener una menor tasa de aplicación de riego de liga, así como se observó una menor resistencia al esfuerzo cortante a los especímenes de prueba que fueron sumergidos durante 24 horas.

En las condiciones de la investigación se analizó las dos condiciones de adherencia de las capas asfálticas, existiendo una disminución en la resistencia al esfuerzo cortante en los especímenes sumergidos, lo cual demuestra las desventajas de someter la emulsión y las capas asfálticas a un proceso de inmersión.

Se puede inferir que los especímenes de prueba sumergidos mostraron resultados que indican que el riego de liga volvió a absorber el agua evaporada previamente, lo cual generó deficiencia en la adherencia entre las capas asfálticas.

La tasa de aplicación o dosificación óptima del riego de liga tiene un gran efecto sobre la resistencia al esfuerzo cortante que desarrolla la interfase adherida de las capas asfálticas, siendo posible obtener una dosificación óptima de  $325 \text{ g/m}^2$  para especímenes a temperatura ambiente y

una tasa de dosificación de  $350 \text{ g/m}^2$  especímenes sumergidos en agua, para un riego de liga CRR-1.

Se observó que para dosificaciones de  $300 \text{ g/m}^2$ , el efecto del riego es mucho más pronunciado que para las tasas de  $400$  y  $500 \text{ g/m}^2$ , lo cual indica que el aumento de la tasa de aplicación redujo el efecto que tiene el riego de liga en la adherencia sobre la resistencia al esfuerzo cortante.

#### **4. Recomendaciones para futuras investigaciones**

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

Evaluar otros tipos de riego de liga con diferentes dosificaciones e implementando modificadores, con el propósito de determinar el comportamiento desarrollado por estos materiales en la resistencia al corte.

Someter los especímenes de prueba a diferentes condiciones que se puedan presentar en el campo de trabajo, con el fin de determinar el comportamiento que puedan tener estas condiciones en la adherencia entre capas.

Estudiar otro tipo de mezclas de asfalto, como lo pueden ser la semidensa y gruesas, ya que los resultados de esta investigación se ven influenciados por la calidad de los materiales los cuales son exclusivos de la mezcla densa en caliente (MDC-19).

Evaluar las propiedades de adherencia entre las capas asfálticas con especímenes realizados en laboratorio y especímenes extraídos de campo, ya que es necesario conocer la eficiencia del riego de liga bajo condiciones reales de construcción y de estar forma conocer su desempeño de maneras más apropiada.

## Referencias bibliográficas

- Alvarez Calisto, C. (2007). Estudio experimental de la resistencia de la adherencia entre capas en la construcción de carpetas asfálticas en caliente.
- Calderón Ulloa, A. (2014). Preparación de emulsiones asfálticas en laboratorio.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2008) NLT-328/08, Evaluación de la adherencia entre capas de Firme, mediante ensayo de corte. En Normas NTL-Ensayos de Carretera. España.
- Chavero, C. A. M. (2021). *Caracterización y evaluación del desempeño de una emulsión con bajo contenido asfáltico.*
- Dorado Jurado, G. A., & Rosero Pepinosa, L. C. (2018). *Efecto de la tasa de aplicación y el tipo de ligante en la adherencia de capas asfálticas evaluadas por medio del ensayo LCB.*
- Enríquez Bravo, J, & Garzón Alayon, A. M, (2020). Evaluación de la adherencia geosintético-mezcla asfáltica mediante la realización del ensayo leuther.
- Gómez Huanca, Christian Frank. (2017). *Uso y aplicaciones de las emulsiones asfálticas*
- Sánchez Fernando, Campagnoli Sandra, (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras, Guía práctica para los estudios y diseños.*
- Instituto Nacional de Vías. (2022). Artículo 421-22. Riego de liga. *En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2022). Artículo 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. (2022). INV E- 222-22. Densidad Relativa (Gravedad Especifica) y Absorción del Agregado Fino. *En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*

Instituto Nacional de Vías. (2022). INV E-223-22. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Especifica) y Absorción del Agregado Grueso. *En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*

Instituto Nacional de Vías. (2022). INV E-707-22. Densidad de Materiales Bituminosos y Semisólidos (Método del Picnómetro). *En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*

Instituto Nacional de Vías. (2022). INV E-717-22. Determinación de la Viscosidad del Asfalto Empleando un Viscosímetro Rotacional. *En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*

Instituto Nacional de Vías. (2022). INV E-735-22. Gravedad Especifica Máxima de mezclas Asfálticas para Pavimentos. *En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*

Instituto Nacional de Vías. (2022). INV E-799-22. Análisis Volumétrico de Mezclas Asfálticas Compactadas en Caliente. *En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*

Ontiveros Rojas Leticia, (2013). *Evaluación de la adherencia entre capas de pavimento empleando diferentes emulsiones asfálticas.*

Rendón Martínez, M. E., & Torres Dahbura, E. A. (2018). *Diseño de una emulsión asfáltica modificada de alto desempeño para riegos de liga, evaluando su resistencia al esfuerzo de corte y la adherencia entre capas de pavimento.*

Rondón Quintana, Hugo Alexander-2015 Lizcano, F. R., & Quintana, H. R. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*.

UniQuindio, (2009). *Tipos de riegos asfálticos*.

Universidad Autónoma de México. (2013), *Ensayo de cortante LCB*.