

EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA GEOSINTÉTICO- MEZCLA ASFÁLTICA
MEDIANTE LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO LEUTNER.

ESTUDIANTES:

JAVIER ENRÍQUEZ BRAVO
ANGÉLICA MARÍA GARZÓN ALAYÓN

DIRECTOR:

JAIME RAFAEL OBANDO ANTE, D. Sc.

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

2020

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

JAVIER ENRÍQUEZ BRAVO
ANGÉLICA MARÍA GARZÓN ALAYÓN

TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA SOMETIDO A LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA COMO PARTE DE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER.

APROBADO POR:

JAIME RAFAEL OBANDO ANTE, D.Sc.
(DIRECTOR)

HUGO LEÓN ARENAS LOZANO
(JURADO INTERNO)

CIRA PIEDRAHITA CÉSPEDES
(JURADO EXTERNO)

FECHA: POPAYÁN, Octubre de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

ENRÍQUEZ, JAVIER; GARZÓN, ANGÉLICA MARÍA

Evaluación de la adherencia geosintético- mezcla asfáltica mediante la realización del ensayo Leutner., 2020.

XVI, 82 p., 279 mm

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

Maestría en Ingeniería de Pavimentos.

- | | |
|---------------------------|--|
| 1. Geomalla biaxial | 2. Riego de adherencia |
| 3. Fuerza cortante máxima | 4. Módulo de reacción al cizallamiento |

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Enríquez, J. & Garzón, A. (2020). *Evaluación de la adherencia geosintético – mezcla asfáltica mediante la realización del Ensayo Leutner*. Trabajo de grado de Maestría, Universidad del Cauca, Popayán.

CESIÓN DE DERECHOS

NOMBRES DE LOS AUTORES: Javier Enríquez Bravo, Angélica María Garzón Alayón.

TÍTULO: Evaluación de la adherencia geosintético – mezcla asfáltica mediante la realización del ensayo Leutner.

GRADO / AÑO: Magíster / 2020.

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

Javier Enríquez Bravo
C.C. 98.379.545
Email: ingjavier90@yahoo.es

Angélica María Garzón Alayón
C.C. 1.113.779.432
Email: angelicagalayon@gmail.com

Dedicatoria:

A Dios, creador de todas las cosas con la humildad que nuestro corazón puede emanar te dedicamos este trabajo por guiar nuestro camino, infundir la fuerza y darnos la fortaleza para continuar en los momentos más débiles.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, por su trabajo incansable día a día y asumir la misión que Dios les encomendó, gracias por hacer de nosotros personas de bien, con visión al futuro y comprometidos por aportar un grano arena al desarrollo del país.

A nuestros hijos por librar nuestra mente de todas las adversidades que se presentan, e impulsarnos cada día a superarnos en la carrera de ofrecerles siempre el mejor ejemplo y modelo a seguir.

A nuestro asesor de trabajo de grado, Jaime Rafael Obando Ante por la dedicación, esfuerzo y orientarnos con su conocimiento y experiencia profesional, para lograr los objetivos propuestos como culminar el desarrollo de esta tesis con éxito y obtener una afable titulación profesional.

A todas las personas que nos han ayudado en el desarrollo de este trabajo, que conforman el equipo profesional del Laboratorio de Pavimentos de la Universidad de Cauca y Tec Ingeniería S.A.S, gracias por brindar todos los conocimientos y experiencia en la elaboración y rotura de cuerpos de prueba de mezcla asfáltica a nivel de laboratorio y manejo de los equipos.

A nuestros hermanos y demás familiares en general por estar siempre a nuestro lado y el apoyo que siempre nos han brindado en cada etapa de nuestras vidas.

RESUMEN

Los pavimentos flexibles se componen en varias capas de materiales granulares y sobre estas una o varias capas de mezcla asfáltica. Estas requieren una eficaz adherencia en la interface para que funcionen como una capa de rodadura monolítica. Una adherencia deficiente entre las capas provoca la disminución de la capacidad estructural del pavimento, incidiendo en fallas y deterioros prematuros (Aguilar, Elizondo, Torres, & Loria , 2017). En el presente trabajo de investigación se evaluó el efecto que tiene la tasa de aplicación y el tipo de ligante bituminoso en la adherencia de la interface geosintético - mezcla asfáltica, mediante la implementación del ensayo Leutner. Para cumplir este propósito, se elaboraron cuerpos de prueba (mezcla densa en caliente tipo MDC-19) utilizando dos tipos de geomallas: fibra de vidrio y poliéster, con diferentes condiciones de riego de liga convencional (250, 350, 450, 550 y 650 g/m²). Se demostró que el esfuerzo cortante que se alcanza con cuerpos de prueba con geomalla 1 y geomalla 2 es mayor al aplicar 650g/m² de asfalto residual, a pesar que las dos geomallas tienen comportamientos diferentes, con esta tasa de ligante alcanzan mayor resistencia al aplicar una fuerza cortante. Finalmente, se confirma que la falla generada al introducir geomallas dentro de dos capas asfálticas reduce en un 50% el módulo de reacción a cortante.

Palabras clave: Pavimento asfáltico, riego de adherencia, tasa de aplicación, geomalla biaxial, emulsión asfáltica, fuerza cortante máxima, módulo de reacción al cizallamiento.

ABSTRACT

Flexible pavements are composed of several layers of granular materials and on these one or several layers of asphalt mix. These require an effective adhesion on the interface to work as a monolithic rolling layer. A poor adhesion between the layers cause a decrease in the structural capacity of the pavement, having an impact on failures and premature deterioration. (Aguilar, Elizondo, Loria and Torres, 2017). In the present investigation it was evaluated the effect of rate application and the type of binder bituminous in the adhesion of the geosynthetic- asphalt mix interface, by means of the implementation of the Shear Leutner test. To fulfill this purpose, test bodies (hot dense mixture type MDC-19) were made with two types of geogrids: fiberglass and polyester, with different irrigation conditions of tack coat (250, 350, 450, 550 and 650 g / m²) It proved that the shear stress that is achieved with test bodies with geogrid 1 and geogrid 2 is greater when applying 650g / m² of residual asphalt, in spite of the two geogrids have different behaviors, with this binding rate they reach greater resistance when applying a shear force. Finally, it is confirmed that the failure generated by introducing geogrids into two asphalt layers reduces 50% in the module shearing reaction.

Keywords: Asphalt pavement, adhesion irrigation, application rate, biaxical geogrid, asphalt emulsion, interlayer shear strength, module shearing reaction.

ÍNDICE

1. Introducción	19
1.1. Descripción del problema	20
1.2. Justificación	21
1.3. Objetivos.....	22
1.3.1. Objetivo general.....	22
1.3.2. Objetivos específicos	22
1.4. Estructura de la tesis	23
2. Marco teórico	24
2.1. Riegos con gravilla	24
2.2. Riegos sin gravilla	24
2.2.1. Riegos de adherencia	24
2.2.2. Materiales para el riego.....	25
2.2.3. Tasa de aplicación.....	25
2.2.4. Rompimiento y curado del riego de liga.	26
2.2.5. Adherencia en mezclas asfálticas	26
2.2.6. Adherencia en mezclas asfálticas con geosintéticos	27
2.2.7. Ensayos para evaluar la adherencia	27
2.2.8. Otros factores que influyen en riegos de adherencia	37
3. Metodología	40
3.1. Materiales utilizados	40
3.1.1. Agregado pétreo.....	40
3.1.2. Cemento asfáltico.....	42
3.1.3. Geosintéticos.....	43
3.1.4. Mezcla asfáltica	46
3.1.5. Riego de liga	47
3.2. Elaboración de cuerpos de prueba.....	48
3.2.1. Elaboración de la primera capa de mezcla asfáltica.	48
3.2.2. Ensayo de retención de residuos de emulsión asfáltica	49
3.2.3. Ensayo de macha de arena	51
3.2.4. Interface	52

3.2.5. Elaboración de la segunda capa de mezcla asfáltica.....	54
3.2.6. Descripción del equipo y ejecución del ensayo de adherencia	56
4. Resultados y análisis	59
4.1. Resultados.....	59
4.1.1. Fuerza cortante (kN)	59
4.1.2. Resistencia al esfuerzo cortante (MPa)	60
4.1.3. Módulo de reacción (MPa/mm)	61
4.2. Análisis de resultados	63
4.2.1. Fuerza cortante (kN)	63
4.2.2. Resistencia al esfuerzo cortante (MPa)	64
4.2.3. Módulo de reacción (MPa/mm)	65
4.2.4. Tasa de ligante	66
5. Conclusiones y recomendaciones.....	69
5.1. Conclusiones.....	69
5.2. Recomendaciones para futuras investigaciones.....	70
6. Referencias bibliográficas	72
Anexos	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría de los agregados para la mezcla asfáltica.	41
Tabla 2. Resultados de caracterización de cemento asfáltico.	42
Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas de la Geomalla 1.	44
Tabla 4. Propiedades físicas y mecánicas de la Geomalla 2.	45
Tabla 5. Caracterización de emulsión asfáltica CRL-1.	47
Tabla 6. Relación entre asfalto residual y emulsión por aplicar.	49
Tabla 7. Tasas de residuo de proyecto.	50
Tabla 8. Categorías de tránsito establecidas en el manual de diseño INVIAS.	51
Tabla 9. Relación entre asfalto residual y emulsión por aplicar.	53
Tabla 10. Resultados obtenidos en el ensayo de Leutner – Sin geomalla.	59
Tabla 11. Resultados obtenidos en el ensayo de Leutner – Geomalla 1.	60
Tabla 12. Resultados obtenidos en el ensayo de Leutner – Geomalla 2.	60
Tabla 13. Desviación estándar permisible para el Esfuerzo cortante máximo y el desplazamiento máximo.	61
Tabla 14. Resultados de Módulo de reacción Sin geomalla.	62
Tabla 15. Resultados de Módulo de reacción Geomalla 1.	62
Tabla 16. Resultados de Módulo de reacción Geomalla 2.	62
Tabla 17. Tasas óptimas de riego de liga.	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Método ensayo de arrancamiento.....	28
Figura 2. Esquema ensayo LBC y distribución de cargas.	29
Figura 3. Método de ensayo LPDS.	29
Figura 4. Equipo Leutner.	30
Figura 5. Partes del equipo Leutner.	31
Figura 6. Método de ensayo Leutner.	31
Figura 7. Gráfico del esfuerzo cortante vs desplazamiento por cizallamiento del ensayo de Leutner.	32
Figura 8. Gráfico típico de esfuerzo cortante vs desplazamiento.	33
Figura 9. Ruptura por corte mediante el equipo Leutner.	34
Figura 10. Módulo de reacción de corte de la interfaz vs la fuerza de corte de interfaz.	35
Figura 11. Gráfico esfuerzo deformación típico del ensayo de Leutner.	36
Figura 12. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.	41
Figura 13. Curva reológica del cemento asfáltico.	43
Figura 14. Medida de la tasa de retención de asfalto en las geomallas.	50
Figura 15. Prensa Marshall.	56
Figura 16. Resultados del ensayo de Leutner con CRL-1.	63
Figura 17. Esfuerzo cortante.....	64
Figura 18. Módulo de reacción en la interface.	66
Figura 19. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación de ligante y tipo de geomalla. ...	67

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Geomalla 1	43
Fotografía 2. Geomalla 2.	45
Fotografía 3. Pesaje del agregado grueso.	46
Fotografía 4. Pesaje del agregado fino.....	46
Fotografía 5. Distribución de cantidades	46
Fotografía 6. Agregado para la mezcla.....	46
Fotografía 7. Adición de cemento asfáltico.	47
Fotografía 8. Mezclado homogéneo con agregado.	47
Fotografía 9. Compactación de capa inferior en compactador giratorio.	47
Fotografía 10. Granulometría para mezcla asfáltica.	48
Fotografía 11. Mezclado homogéneo con agregado y asfalto.	48
Fotografía 12. Compactación de capa inferior en compactador giratorio.	48
Fotografía 13. Se introducen las muestras al horno.	49
Fotografía 14. Muestras de	49
Fotografía 15. Muestras de	49
Fotografía 16. Pesaje de la arena.	51
Fotografía 17. Esparcimiento de la arena.	51
Fotografía 18. Esparcimiento de la arena.	51
Fotografía 19. Aplicación de riego de liga.....	53
Fotografía 20. Especímenes con emulsión asfáltica	53
Fotografía 21. Geomalla.	53
Fotografía 22. Instalación de geomalla.....	53
Fotografía 23. Molde para elaboración.....	54
Fotografía 24. Primera capa con geomalla dentro del molde.	54
Fotografía 25. Elaboración de la segunda capa.	54
Fotografía 26. Desmoldado.....	54
Fotografía 27. Cuerpos de prueba.	55
Fotografía 28. Cuerpos de prueba elaborados.....	55
Fotografía 29. Dispositivo de ensayo y cuerpo de prueba.	55

Fotografía 30. Vista lateral rotura de cuerpos de prueba	55
Fotografía 31. Rotura de cuerpo de prueba.....	55
Fotografía 32. Vista frontal del aditamento.	57
Fotografía 33. Vista lateral del aditamento.....	57
Fotografía 34. Deformímetro precisión 1 milésima de pulgada a 1”.....	57
Fotografía 35. Esquema del aditamento para desarrollo del ensayo de Leutner.	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
c_c	Coeficiente de curvatura	–
c_u	Coeficiente de uniformidad	–
E	Módulo dinámico de capa asfáltica	Pa
F	Fuerza cortante máxima	F
F_{max}	Fuerza cortante	F _{máx}
H	Altura sobre el nivel del mar	m
h	Espesor de la interfase	m
K_{peak}	Módulo de reacción cortante	MPa/mm
M_a	Temperatura media ponderada del aire	°C
M_p	Temperatura media de la mezcla asfáltica	°C
pH	Potencial de hidrógeno	–
S	Desplazamiento	mm
S_{max}	Desplazamiento máximo	mm
T	Temperatura media anual	°C
V_a	Proporción de volumen de aire en la mezcla asfáltica	–
V_b	Proporción de volumen de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica	–
x	Media aritmética	–
z	Profundidad bajo la superficie de pavimento	m

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
σ	Desviación estandar	–
τ	Esfuerzo cortante	MPa

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ANOVA	Analysis of Variance
API	American Petroleum Institute
CA	Carpeta asfáltica
CBR	California Bearing Ratio
CRL	Emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta
CV	Coeficiente de variación
DE	Desviación estándar
Fmax	Fuerza cortante máxima
Fv	Geomalla biaxial de Fibra de Vidrio
G	Geomalla biaxial de poliéster
FHWA	Federal Highway Administration
IBEF	International Bitumen Emulsion Federation
INV	Instituto Nacional de Vías
LCB	Laboratorio de Caminos de Barcelona
LPDS	Layer-Parallel Direct Shear
MAGD	Mezcla asfáltica de gradación densa
MAP	Mezcla asfáltica porosa
MDC	Mezcla densa en caliente
NCAT	National Center for Asphalt Technology
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NP	No plástico
Qs	Tasa de saturación
Q_D	Tasa De Proyecto
RTFOT	Rolling thin film oven test
TRB	Transportation Research Board

Símbolo	Término	Unidad SI
c_c	Coeficiente de curvatura	–
c_u	Coeficiente de uniformidad	–
E	Módulo dinámico de capa asfáltica	Pa

Símbolo	Término	Unidad SI
F	Fuerza cortante máxima	F
F _{max}	Fuerza cortante	F _{máx}
H	Altura sobre el nivel del mar	m
h	Espesor de la interfase	m
K _{peak}	Módulo de reacción cortante	MPa/mm
M _a	Temperatura media ponderada del aire	°C
M _p	Temperatura media de la mezcla asfáltica	°C
pH	Potencial de hidrógeno	–
S	Desplazamiento	mm
S _{max}	Desplazamiento máximo	mm
T	Temperatura media anual	°C
V _a	Proporción de volumen de aire en la mezcla asfáltica	–
V _b	Proporción de volumen de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica	–
x	Media aritmética	–
z	Profundidad bajo la superficie de pavimento	m

1. Introducción

Las estructuras de pavimento del tipo flexible pueden ser definidas como distribuciones viales conformadas por una capa asfáltica apoyada sobre capas de menor rigidez, compuestas por materiales granulares no tratados o ligados (Reyes & Rondon, 2015). Se utiliza para mejorar las condiciones de rodadura de las carreteras, se compone de varias capas y cada de ellas contribuye al aporte estructural del pavimento. La suposición usual es que mediante el proceso de instalación y compactación de la mezcla asfáltica y los materiales granulares, dichas capas están completamente unidas entre sí y actúan como una sola capa para obtener un buen desempeño (Collop, et al., 2003). Se espera que el comportamiento de la carpeta asfáltica sea el mismo, cuando se acompaña de nuevos materiales como: polímeros y geosintéticos al asfalto y mezcla asfáltica respectivamente para fortalecer las propiedades mecánicas.

En la actualidad el auge e innovación de los geosintéticos promete ser un complemento adecuado para las estructuras de pavimento, esto conlleva a implementar las nuevas tecnologías en el diseño y construcción de dichas estructuras, debiendo utilizar estos materiales de forma racional de acuerdo a su funcionalidad: resistencia, drenaje, separación, impermeabilización entre otros. Específicamente, en el caso de una mezcla asfáltica, donde los geosintéticos son utilizados como elementos de refuerzo y disminución de la reflexión de fisuras, se genera una interfaz entre las dos capas asfálticas, por tanto, se hace necesario adherirlas con emulsiones asfálticas con el fin que la carpeta trabaje como una capa homogénea.

Teniendo en cuenta que la interface inevitablemente se convierte en una parte de debilidad que eventualmente puede generar un plano de falla, debido a problemas relacionados con la adherencia. La dosificación del ligante asfáltico juega un papel importante para adherir los materiales entre sí. El estado de adhesión en las interfaces entre diferentes capas influye seriamente en la distribución de los esfuerzos y la deformación entre las capas de pavimento y, por tanto, afecta el desempeño global de la estructura de pavimento (Mohammad, 2005).

Razón por la cual, en el trabajo de grado se desarrolló un proyecto experimental con la metodología cuantitativa para medir la adherencia en capas de mezcla asfáltica con geomallas y adicionando diferentes condiciones de ligante bituminoso, con este propósito se planteó elaborar los cuerpos de prueba con materiales granulares utilizados en el Departamento de Nariño, utilizar

dos geomallas comerciales y adherirlas con emulsión asfáltica convencional, estos materiales se usan comúnmente en las obras viales del país.

El proceso de fabricación se hizo teniendo como base los lineamientos de la norma NG 954 (05/18) para evaluar la adherencia en la interface utilizando la prueba de corte, una vez se culminó la fabricación de los cuerpos de prueba fueron sometidos a este proceso para conocer la fuerza máxima aplicada y el desplazamiento máximo que alcanza cada cuerpo de prueba. El ensayo descrito en la norma es el ensayo de Leutner que se desarrolló en Alemania a fines de la década de 1970 como un simple medio de realizar una prueba de corte directo en un enlace entre dos capas de pavimento (Collop et al., 2009).

Se fabricaron los cuerpos de prueba con cinco dosificaciones de emulsión asfáltica y dos tipos de geomalla, para determinar el esfuerzo cortante y el módulo de reacción en la unión de las dos capas de mezcla asfáltica con geomalla mediante el ensayo de Leutner. Una vez se hace la rotura de los cuerpos de prueba, se obtuvieron los datos de fuerza y desplazamiento, se procede a hacer el procesamiento de la información para calcular el esfuerzo cortante y el módulo de reacción, los cuales permiten hacer un análisis del comportamiento de la unión de las dos capas de mezcla asfáltica – geomalla.

1.1. Descripción del problema

Actualmente, se está implementando el uso de geosintéticos, como medida para reducir la refracción de fisuras y aportar resistencia a la carpeta, manteniendo la capacidad de deformación y recuperación durante el periodo de servicio.

Para que esto suceda, se requiere un ligante capaz de adherir el geosintético a la mezcla asfáltica, se debe pues determinar la tasa de aplicación. En el país se cuenta con las normas técnicas del Instituto Nacional de Vías (Invias), quien en su Artículo No. 421-13, recomienda dosificar el riego de liga del orden de doscientos a trescientos gamos de ligante residual por metro cuadrado (200 a 300 g/m²), para la construcción de una carpeta asfáltica instalada en dos o más capas, esto quiere decir que se están ligando dos capas de mezcla asfáltica. Específicamente, para el caso de los geosintéticos como refuerzo de pavimentos asfálticos, dicha entidad solo contempla los geotextiles para pavimentación (Artículo No. 464-13), y precisa que:

La cantidad de ligante asfáltico residual deberá ser la suficiente para satisfacer los requerimientos de la saturación del geotextil y para adherir el geotextil y la nueva

capa asfáltica a la superficie antigua. Esta cantidad deberá ser definida por el Constructor con base en las recomendaciones de fabricante del geotextil y los resultados de pruebas en el sitio, y deberá ser aprobada por el interventor.

En este orden de ideas, Colombia no cuenta con una especificación de geomallas para pavimentación, donde se determine el proceso de manejo del material, instalación y dosificación del ligante. En cuanto a la dosificación de la tasa de aplicación del riego de liga para adherir los geotextiles a la mezcla asfáltica, considera un proceso de prueba en campo: no se encuentra reglamentado un procedimiento a nivel de laboratorio para medir la adherencia y evaluar el comportamiento de la carpeta asfáltica, en consecuencia se aumenta la incertidumbre teniendo en cuenta que: hay variedad de geosintéticos en el mercado, fabricados con diferentes materiales en efecto tendrán comportamientos diversos, por tanto se requiere cantidad de riego de liga para cada caso específico, con el fin de garantizar adherencia y trabajo del paquete estructural: mezcla asfáltica – geosintético.

Es evidente que el grado de adherencia entre las capas de pavimento, juega un rol fundamental en la vida útil del pavimento, demostrando que bajos niveles de adherencia repercuten inevitablemente en grietas prematuras o una disminución significativa en la vida útil del pavimento (Vargas, 2008). Al adicionar un material como geosintéticos, se está generando un plano de falla en la carpeta asfáltica, siendo esta la parte más débil, se hace necesario estudiar a profundidad el comportamiento del geosintético con diferentes dosificaciones de riego de liga, para determinar la dosificación óptima con el objetivo de garantizar que la carpeta asfáltica y el geosintético trabajen de manera conjunta frente a las solicitaciones del tránsito (Ricci, 2011) tal como se proyecta en el diseño estructural del pavimento flexible.

1.2. Justificación

La estabilidad y preservación de un pavimento depende de diversos factores: uno de los más influyentes es la adherencia entre las capas que lo forman, esta adherencia es la encargada de lograr que todas las capas se comporten como un solo bloque, reduciendo las grietas y deformaciones. Sin embargo, en la actualidad existe una gran problemática para controlar la dotación de riego aplicada entre distintas capas de mezclas bituminosas empleadas en carretera.

En el campo de la ingeniería colombiana hay desconocimiento del uso adecuado de los geosintéticos en carpetas asfálticas y dosificación del riego de liga, estos aspectos técnicos se relacionan con el aporte en adherencia en la interface mezcla asfáltica - geosintético, que conlleva

a desaprovechar potencial o su utilización ineficiente implicando mal desempeño de la carpeta asfáltica. La adherencia parcial entre capas genera una reducción en la vida útil de los pavimentos y la presencia de fallas prematuras, por tanto, la estructura se ve limitada al trabajo de las capas superiores no adheridas (Ricci, 2011). Cuando los materiales (mezcla asfáltica – geosintético) son ligados con la dosificación ideal de emulsión asfáltica en la etapa constructiva, se adhieren las capas de mezcla asfáltica al geosintético formando una capa de rodadura homogénea, diseñada para deformarse y recuperarse con el paso de las cargas, soportando las condiciones más críticas durante su vida en servicio.

En muchas investigaciones se ha profundizado sobre las dotaciones óptimas de ligante en el riego, pero de una manera genérica, sin considerar la influencia del tipo de capa superior e inferior utilizada. Tampoco se ha profundizado en la rugosidad de la superficie sobre la que se aplica la emulsión.

Por lo anterior esta investigación, pretenden contribuir a optimizar la dosificación de emulsión para ligar la carpeta asfáltica y la geomalla, con el fin de evaluar la adherencia, uno de los parámetros más importantes que se debe garantizar en una carpeta asfáltica reforzada con geosintéticos. De esta forma se reduce la incertidumbre del comportamiento de la interface mezcla asfáltica - geosintético, garantizando la calidad de la obra, el desempeño del paquete estructural y permitirá la prolongación de la vida en servicio de la vía. Siguiendo esta línea, se han analizado ensayos que actualmente existen para la caracterización de sistemas semejantes, y se han realizado las modificaciones oportunas, con el fin de definir un procedimiento de ensayo que permita la caracterización de este tipo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la adherencia geosintético – mezcla asfáltica mediante la realización del ensayo Leutner.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la adherencia entre dos capas de mezcla asfáltica con geomalla y diferentes dosificaciones de riego de liga.

- Determinar el rango de dosificación óptimo de riego de liga a agregar a dos tipos de geomalla en la interfaz geosintético – mezcla asfáltica.
- Analizar el comportamiento del Módulo de reacción al cizallamiento de los cuerpos de prueba fabricados en laboratorio con y sin geosintéticos.

1.4. Estructura de la tesis

El trabajo se ha organizado en los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Introducción

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

Capítulo 2. Marco teórico

Se recopila de manera resumida el estado del arte de los principales temas tratados en el trabajo: “Evaluación de la adherencia geosintético- mezcla asfáltica mediante la realización del ensayo Leutner”.

Capítulo 3. Metodología.

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

Capítulo 4. Resultados y análisis

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

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

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

Capítulo 6. Referencias bibliográficas

Se presentan las distintas fuentes bibliográficas citadas en el presente documento

2. Marco teórico

Las estructuras de pavimentos en la mayoría de los casos consisten en varias capas de materiales granulares y sobre estas una o varias capas de mezcla asfálticas que requieren adherencia en la interfaz de capa para que funcionen como una sola estructura y no se afecten el desempeño de este como una sola estructura (Al-Qadi, et al, 2008). A la hora de diseñar pavimentos flexibles se asume que las capas en las interfaces están completamente adheridas. El grado de unión entre las capas afecta directamente la distribución de esfuerzos a los que se someten los materiales de las capas de pavimento (Wheat, 2007).

Los tratamientos superficiales son aquellos de pequeño espesor elaborados con riegos o mezclas que logran una superficie de rodadura impermeable, segura y apropiada para el rodamiento.

2.1. Riegos con gravilla

Los riegos con gravilla consisten en la aplicación de una o varias capas de película de un ligante hidrocarbonado sobre una superficie, complementadas por una o varias capas de árido, con una o dos gravas o gravillas en su espesor con áridos de tamaño uniforme, de manera que el árido quede anclado por su parte inferior en el ligante, y evitando que el ligante fluya a la superficie (Bustos & Perez, 2004).

2.2. Riegos sin gravilla

Los riegos sin gravilla pueden identificarse principalmente en riegos de adherencia, riegos de imprimación y riegos de curado.

2.2.1. Riegos de adherencia

Los riegos de adherencia son aquellos en los que se aplica una emulsión bituminosa sobre una capa tratada con ligantes hidrocarbonados o conglomerantes hidráulicos antes de extender sobre ella otra capa bituminosa, a excepción de tratamientos con gravilla o lechadas bituminosas (Bustos & Perez, 2004). La función principal de los riegos de adherencia es la perfecta unión entre las capas. Esto provoca que las capas trabajen de forma solidaria con el fin de resistir mejor los esfuerzos del tráfico, reduciendo las deformaciones y el deslizamiento. En este tipo de riegos se utilizan emulsiones bituminosas: emulsiones aniónicas y catiónicas de rotura rápida (EAR-1 y ECR-1), y emulsiones catiónicas de rotura rápida modificadas con polímeros (ECR-1-m y ECR-2-m). Estas emulsiones tienen un contenido de agua entre el 37 y el 43 %, y la dotación mínima

de ligante residual es normalmente de 200 g/m^2 , excepto en los casos de una capa superior de mezcla bituminosa discontinua en caliente (BBTM 8A, BBTM11A, BBTM 8B y BBTM 11B), una capa de rodadura drenante (PA11 y PA16) y una capa de mezcla bituminosa en caliente (AC16D, AC16S, AC22D y AC22S) utilizada para rehabilitar la superficie de una carretera en servicio, en los que la dotación mínima es de 250 g/m^2 (Bustos & Perez, 2004).

Para asegurar el correcto funcionamiento del riego de adherencia, se debe barrer enérgicamente la superficie. Si ésta fuese un pavimento bituminoso en servicio, primero se realiza un fresado si la superficie presenta irregularidades para eliminar los excesos de ligante o las deformaciones superficiales (Wikivia, 2012).

2.2.2. Materiales para el riego

Los riegos de adherencia son aquellos en los que se aplica una emulsión bituminosa sobre una capa asfáltica antes de extender sobre ella otra capa bituminosa, a excepción de tratamientos con gravilla o lechadas bituminosas (Bustos & Perez, 2004). La función principal de los riegos de adherencia es la perfecta unión entre las capas. Esto provoca que las capas trabajen de forma solidaria con el fin de resistir mejor los esfuerzos del tráfico, reduciendo las deformaciones y el deslizamiento (Zamora, Calzada, Castro, & Vega, 2010).

2.2.3. Tasa de aplicación.

Una correcta adherencia entre las capas del pavimento es esencial para que la estructura del pavimento se comporte monolíticamente. Seleccionar el material idóneo y la tasa de aplicación correcta es de vital importancia para el desempeño de esta adherencia. Superficies con distintos tiempos de operación y condiciones superficiales (nueva, vieja o perfilada) requieren diferentes aplicaciones para lograr una buena adherencia. Es importante que la tasa de aplicación sea la adecuada para que la cantidad de asfalto residual aplicado sea el especificado (Mohammad et al., 2012)

En la normativa colombiana INVIAS no se encuentra normado un ensayo para evaluar la calidad de la adherencia de dichas emulsiones aplicadas en capas de pavimento, especialmente con las emulsiones de rotura Rápida.

Razón por la cual la recomendación actual es que se usen diferentes tasas aplicaciones en un rango de dosificación amplío que va desde 0.2 hasta $0,3 \text{ l/m}^2$ de asfalto residual, basta con cumplir que esta proporción para determinar si efectivamente este rango es adecuado sin importar el tipo

de mezcla. Teniendo en cuenta lo anterior, surge la necesidad de realizar investigaciones donde se evalúen distintas emulsiones asfálticas variando su contenido de asfalto y dosificación. Para ello se debe emplear el ensayo de Leutner.

2.2.4. Rompimiento y curado del riego de liga.

Antes que la emulsión asfáltica rompa, es de color café debido a que contiene agua y asfalto. Después que rompe, el agua se separa del asfalto y el color de la emulsión paulatinamente cambia de café a negro. Una vez que toda el agua superficial e intersticial se ha evaporado se dice que la emulsión a curado. En la mayoría de los casos una emulsión cura totalmente en un aproximado de una y dos horas (Aguilar, et al, 2017), sin embargo, la mayoría de autores difieren en cuanto al tiempo necesario que el riego de liga debe permanecer sin cubrir antes que sea colocada la capa subsiguiente (Mohammad, y otros, 2012). La Federación Internacional de Emulsiones Bituminosas determinó que el lapso para la colocación de mezcla asfáltica sobre el riego de liga varía desde 20 minutos hasta varias horas para emulsión completamente curada (Chaignon & Roffe, 2001). Estudios de laboratorio concluyen que las resistencias más altas en la interfaz son alcanzadas cuando mayor es el tiempo de curado tanto en muestras fabricadas en laboratorio (Hachiya & Sato, 1997), como en núcleos extraídos en campo (Moseley, et al., 2004).

2.2.5. Adherencia en mezclas asfálticas

En un sistema multicapa, los movimientos entre capas son un origen importante de fisuras. Cuando la adherencia entre capas es escasa, la carpeta de rodamiento suele fisurarse de manera temprana con incremento en su deformación ante las sollicitaciones del tránsito debido al consumo (Cepeda & Fensel, 2016). Es indispensable emplear una emulsión asfáltica como riego de adherencia entre capas asfálticas, con el objetivo de incrementar la adherencia entre capas bituminosas sucesivas para asegurar que éstas trabajen de forma solidaria frente a las cargas del tráfico (Aravena, 2007). El grado de adherencia entre estas capas de pavimento, juega un rol fundamental en la vida útil del pavimento, demostrando que bajos niveles de adherencia repercuten indefectiblemente en grietas prematuras o una disminución significativa en la vida útil del pavimento.

2.2.6. Adherencia en mezclas asfálticas con geosintéticos

Los geosintéticos usados en pavimentos asfálticos están divididos en geotextiles y geomallas, hay gran preferencia por la geomalla de fibra de vidrio, porque es un elemento de refuerzo de gran utilidad, ya que mejora el comportamiento mecánico del pavimento sin disminuir de forma importante la adherencia entre las capas asfálticas. Por otro lado, presenta ventajas ecológicas, ya que está constituida básicamente por sílice, y puede fresarse para reutilizarse en otro pavimento. En cuanto al uso de geotextiles, la Universidad de Nottingham ha realizado pruebas de adherencia en la interfaz de capas asfálticas, llegando a la conclusión de que la rigidez al corte se ve disminuida claramente cuando se refuerza el pavimento con geotextiles (Martínez & Ossa, 2012).

La anterior conclusión fue comprobada por Martínez y Ossa (2012), sin embargo, no indica que no pueda mejorarse el desempeño de los geotextiles con la aplicación de mayor cantidad de emulsión. Por otro lado, se determinó que existen diferencias de adherencia de la malla de fibra de vidrio de 50 kN respecto a la de 100 kN (fabricadas comercialmente). La primera presenta mayor adherencia en la interfaz del pavimento, por lo que no es posible generalizar el comportamiento que presentará la malla comparada con otros refuerzos de pavimento.

2.2.7. Ensayos para evaluar la adherencia

Para evaluar la adherencia entre capas de mezclas asfálticas han sido desarrolladas varias técnicas a nivel de campo y laboratorio, entre ellas se destacan los ensayos: Pull off test, LCB (Laboratorio de caminos de Barcelona), Corte directo de capa paralela de prueba LPDS y la prueba Leutner. Las características de algunas de las metodologías utilizadas para determinar la adherencia entre capas asfálticas son presentadas a continuación:

Ensayo de arrancamiento (Pull off test)

La norma ASTM D4541-02 establece que este método de ensayo cubre un procedimiento para evaluar el esfuerzo de pull-off (comúnmente conocido como adhesión) de una capa asfáltica. La prueba permite determinar la fuerza máxima en tracción que puede soportar dicha carpeta, en el área de ensayo antes de que el material se separe (Ricci, 2011), en la Figura 1 se muestra el método de ensayo.

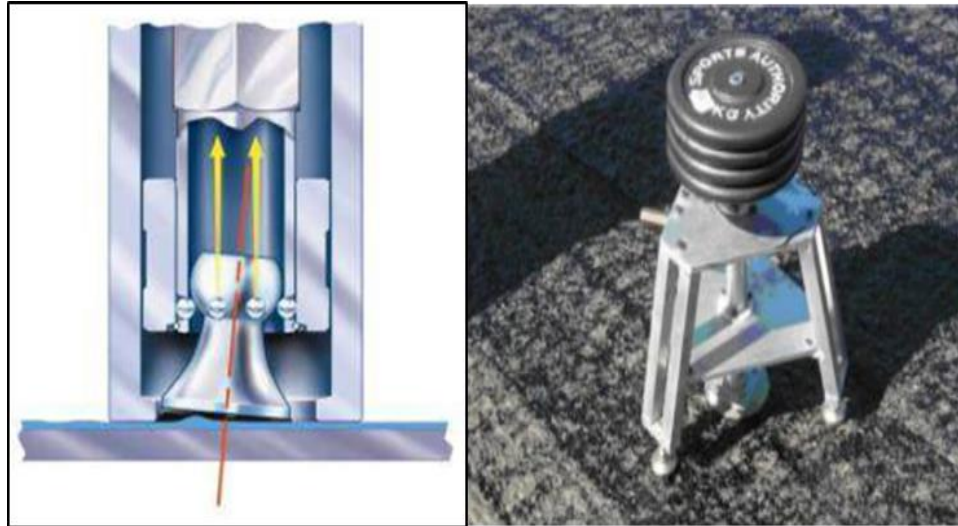


Figura 1. Método ensayo de arrancamiento.
Fuente: Ricci et al. (2011) y Tashman, et al. (2008).

Ensayo Laboratorio de caminos de Barcelona LBC:

El ensayo LCB consiste en aplicar sobre una probeta cilíndrica de pavimento un esfuerzo de corte por flexión; de tal manera, que se pueda determinar el esfuerzo cortante, dada por la siguiente ecuación (1):

$$\tau = \frac{P/2}{A} \quad (1)$$

Dónde:

τ = Esfuerzo cortante [kg/cm^2].

P = Carga aplicada [kg].

A = Área transversal de la probeta o núcleo [cm^2].

Como se aprecia en la Figura 2, se aplica una carga en el centro del cuerpo de prueba sometiéndolo a flexión, la sollicitación en el plano de debilidad es un esfuerzo cortante con un valor de carga equivalente a $P/2$ (Cepeda, 2011).

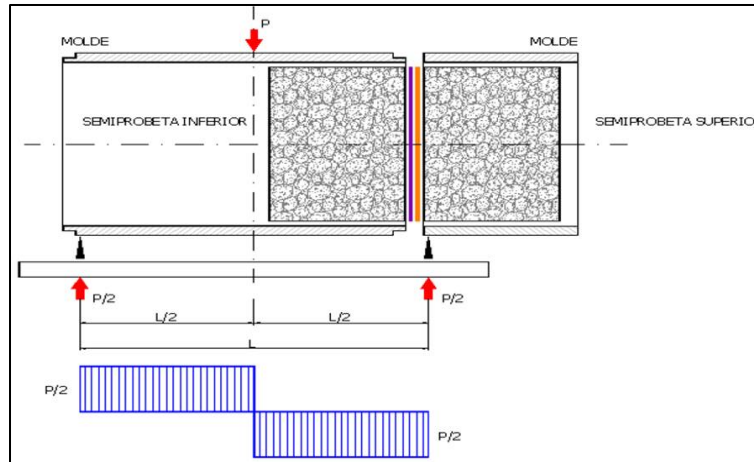


Figura 2. Esquema ensayo LBC y distribución de cargas.

Fuente: Ricci, y otros, 2011.

Corte directo de capa paralela de prueba Layer-Parallel Direct Shear LPDS:

La prueba conocida como LPDS, es una versión de la prueba de Leutner modificada para permitir solo una carga de corte en una muestra sujeta por una media parte y suspendida por la otra parte (D'Andrea, et al., 2012). Luego la fuerza de corte se aplica en el plano del geosintético (Zamora et al., 2010) como se muestra en el Figura 3:

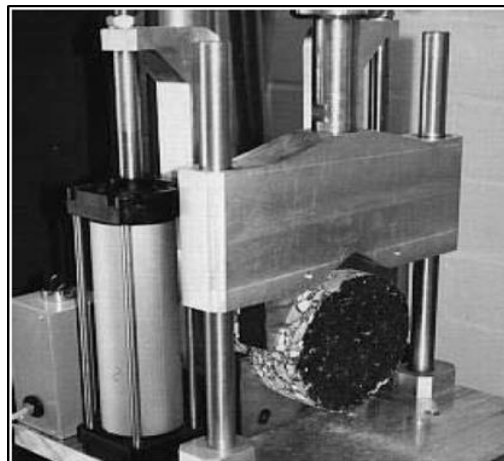


Figura 3. Método de ensayo LPDS.

Fuente: Raab, y otros, 2004.

La prueba de Leutner

Se desarrolló en Alemania a finales de los años setenta, como un medio sencillo para llevar a cabo una prueba de corte directo, es decir aplicación de una fuerza normal sobre la interfaz de dos

capas de mezcla asfáltica y, monitorear el comportamiento del cuerpo de prueba en su fase elástica y plástica, al aplicarle carga hasta finalmente llevarlo a la falla (Figura 4) (Collop et al., 2009).

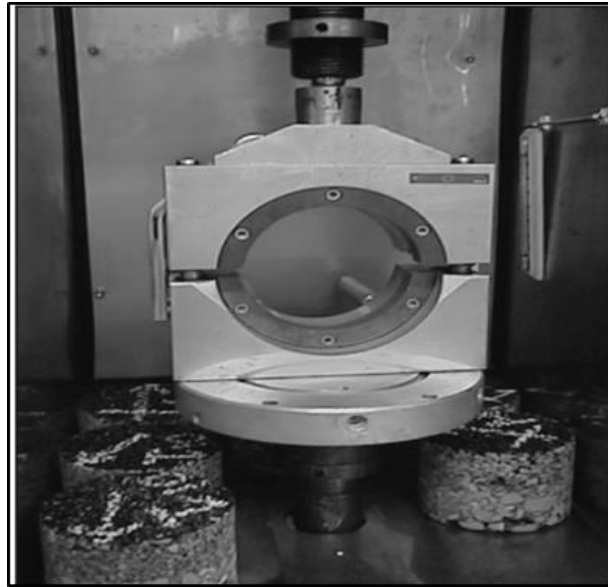


Figura 4. Equipo Leutner.
Fuente: Collop, y otros, 2003.

Partes del equipo Leutner (Figura 5):

- Mordazas: las mordazas son dos segmentos cilíndricos. La mordaza inferior se ubica sobre la base plana, con dos varillas perpendiculares en cada extremo para sujetar la mordaza superior.
- Medidor de desplazamiento: el medidor está apoyado en la mordaza superior y el vástago se apoya en una palanca ajustable acoplada a la mordaza inferior.
- Prensa: se utiliza una prensa mecánica o hidráulica que aplica la carga normal a 50 mm/min.

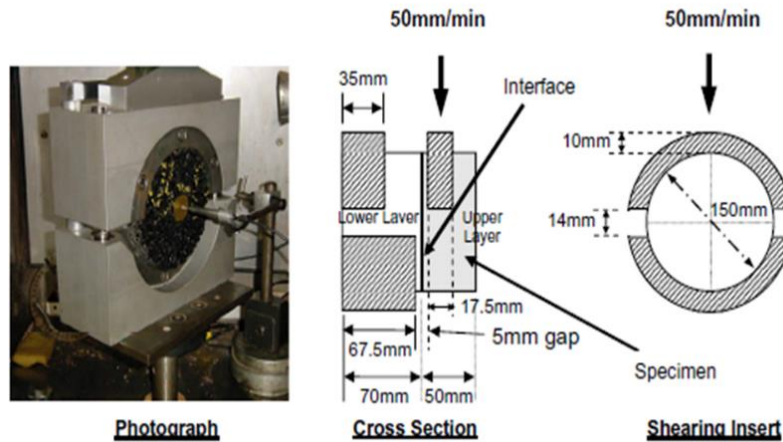


Figura 5. Partes del equipo Leutner.

Fuente: Collop, y otros, 2009.

En la Figura 6, se muestra el ensayo de corte mediante el equipo Leutner.



Figura 6. Método de ensayo Leutner.

Fuente: Guimarães, 2013.

A continuación, se exponen los estudios desarrollados con el equipo Leutner:

Evaluación del estado del enlace en la carpeta asfáltica (Collop, et al 2003): Se investigó el enlace en dos interfaces superiores de una estructura típica de pavimento flexible o semi-rígida, todos los materiales fueron diseñados de conformidad con la norma británica. Las dimensiones de los cuerpos de prueba fueron: 305 mm por 305 mm y 120 mm en espesor, cada uno se fabricó en dos capas y se compactó con rodillos para simular las condiciones más cerca posibles a la construcción de la carpeta en vía.

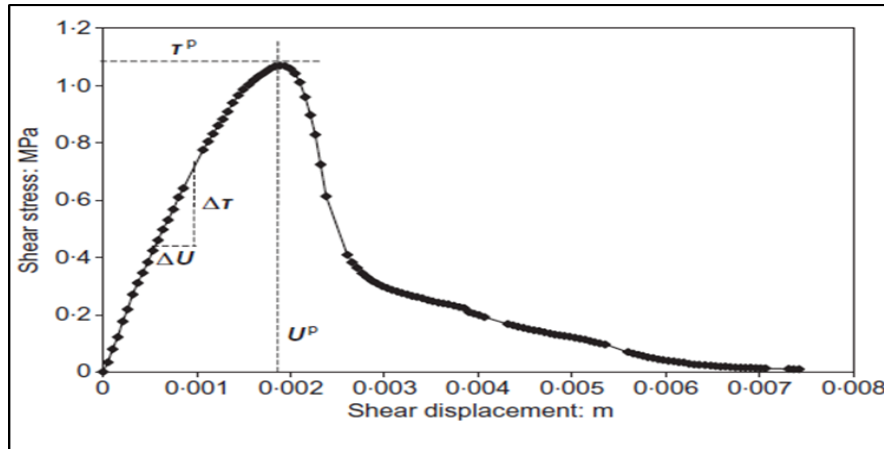


Figura 7. Gráfico del esfuerzo cortante vs desplazamiento por cizallamiento del ensayo de Leutner.
Fuente: Collop, y otros, 2003.

Una vez fabricados los cuerpos de prueba, se introdujeron en un horno a temperatura controlada a 20°C, luego se instalaron en el quipo Leutner, para fallar las briquetas a velocidad de carga de prueba estándar (50 mm/min), se midió la fuerza y el desplazamiento. Finalmente, se graficó la curva de esfuerzo cortante vs deformación, que describe el comportamiento de los cuerpos de prueba, como se muestra en la Figura 7.

Se concluyó que, para una combinación particular de materiales, hay una relación lineal aproximada entre la resistencia al corte en la interfaz y el correspondiente desplazamiento independiente de la condición de enlace. Además, no existe una relación fuerte entre la tangente el módulo de reacción y la resistencia al corte de la interface.

Evaluación del esfuerzo absorbido por la capa intermedia (Ogundipe, 2013): Se investigó el comportamiento de cinco mezclas, las cuales una vez elaboradas se colocaron en un horno de acondicionamiento de temperatura controlada de ensayo (10°C, 20°C y 30°C) durante 5 horas. Después, cada muestra se colocó en el equipo de prueba de Leutner y se aplicó la carga a una velocidad de 50 mm / min hasta llegar a la falla y se graficó el esfuerzo cortante frente al desplazamiento, como se muestra en la Figura 8.

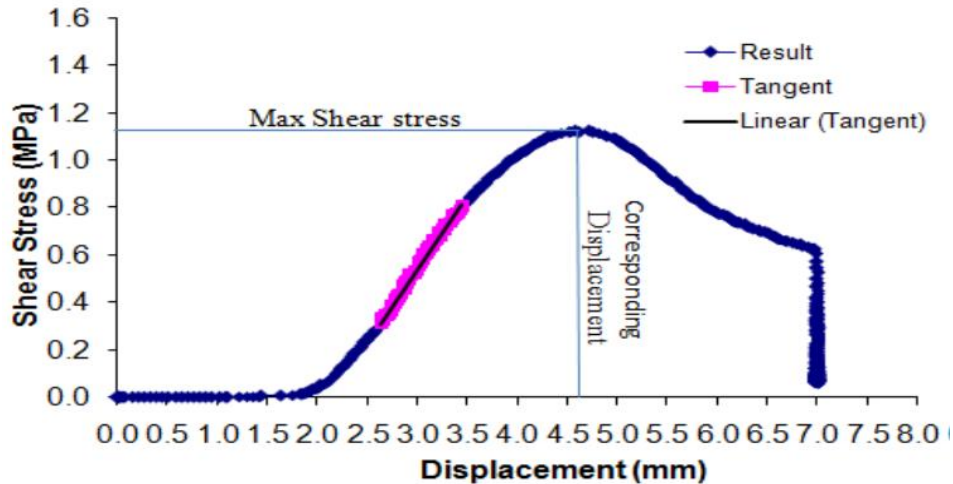


Figura 8. Gráfico típico de esfuerzo cortante vs desplazamiento.

Fuente: Ogundipe, 2013.

A partir del estudio, se concluyó que la unión entre la capa superior y las capas intermedias disminuyó con el aumento de la temperatura. Las intensidades de corte y las rigideces de la capa intermedia varían de acuerdo a la composición de los materiales de cada mezcla, lo que indica que el tipo de material en contacto afecta a la unión de la capa intermedia con la mezcla asfáltica.

Estudio de adherencia entre capas de pavimento asfáltico (Guimarães, 2013): Este estudio tuvo como objetivo evaluar: i) la influencia del tipo de capa de adherencia (emulsión asfáltica pura o modificada con polímeros), ii) la tasa de aplicación, iii) el tipo de superficie, y iv) la presencia, o no, de fisuras intercaladas (geotextil y geomalla de fibra de vidrio), en las propiedades de adhesión entre las capas de mezcla asfáltica.

La adherencia entre las capas se probó a través de la prueba de corte de Leutner, en muestras de laboratorio y campo. Se produjo un sistema de doble capa intermedia de membrana que absorbe el esfuerzo, variando el tipo riego de liga (RR-1C, RR1C-E y RR-2C-E), la razón aplicada a la interfaz (0,0; 0,25; 0,50 y 0,75 l/m²) y el diámetro de las muestras (100 y 150 mm). Se utilizó la velocidad de desplazamiento de corte estándar de 50 mm/min, y la temperatura de prueba se estableció a 20°C.

El mismo procedimiento se realizó con una razón de desplazamiento de 1mm/min, para evaluar su influencia sobre la adhesión de tres emulsiones asfálticas utilizadas como ligante. se construyó una sección de prueba experimental en Rodovia Ayrton Senna (SP-070), en el tramo desde el km 38+000 hasta km 39+500, y se extrajeron núcleos (100 mm de diámetro). Los resultados del

corte máximo demuestran la influencia del tipo de recubrimiento del ligante, el tipo de superficie, el diámetro de la muestra, la tasa de desplazamiento de prueba y la presencia de un geotextil / geomalla sobre la adhesión en la interfaz entre las capas asfálticas.

Las muestras con geomalla, en la interface presentaron resultados similares cuando se compararon con las muestras que solo tenían emulsión asfáltica como ligante. Sin embargo, las muestras con geotextil presentaron valores significativamente menores de tensión máxima de corte. Los resultados obtenidos mostraron que no siempre las emulsiones de asfalto modificadas presentan mayor resistencia al corte en comparación con las emulsiones de asfalto puro (Figura 9).



Figura 9. Ruptura por corte mediante el equipo Leutner.
Fuente: Guimarães, 2013.

Evaluación de la unión entre capas asfálticas (Muslich, 2009): El objetivo principal de esta tesis fue proporcionar una guía para evaluar la unión entre las capas de asfalto, a fin de facilitar la construcción de vías que cumplan más requisitos de diseño. Se hicieron modificaciones adicionales a la prueba de Leutner. También se llevó a cabo una investigación sobre la prueba de torsión y el efecto del tráfico en la unión de las capas. Se ha realizado un análisis para estimar los valores alcanzables de las tensiones en la interface de carreteras típicas construidas en el Reino Unido obtenidas de la base de datos. Luego, los valores se compararon con los resultados de un análisis analítico para predecir la fortaleza de la unión requerida en la interface y otras normas en Alemania y Suiza, para recomendar límites de especificación de la resistencia de la interface (Figura 10).

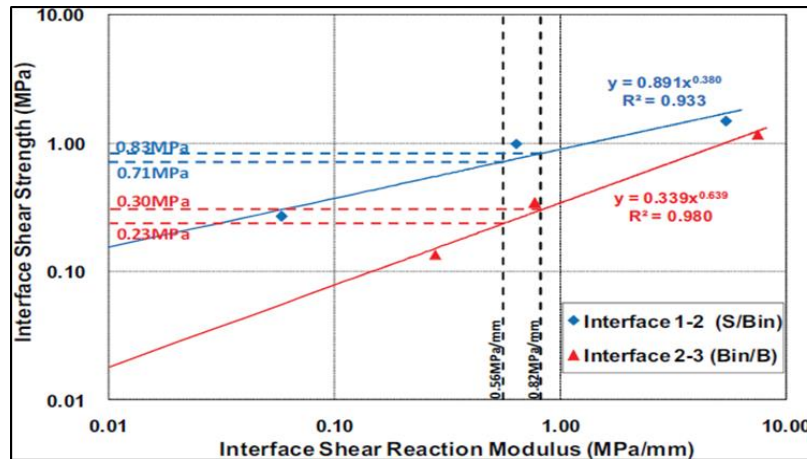


Figura 10. Módulo de reacción de corte de la interfaz vs la fuerza de corte de interfaz.
Fuente: Muslich, 2009.

Una investigación sobre la resistencia de la unión de la interfaz del concreto asfáltico reforzado con geosintéticos usando la prueba de corte de Leutner (Sudarsanan & otros, 2018)

Se utilizaron tres materiales de refuerzo geosintéticos hechos de fibra de coco, yute y glasgrid para la evaluación de la resistencia de la unión. La fuerza de las muestras de interface no reforzadas también se evalúa para comparación. Se construyó una sección de pavimento de prueba para obtener las muestras reforzadas y no reforzadas para el trabajo de investigación. El objetivo principal fue estudiar los efectos de estos productos geosintéticos a diferentes temperaturas en el comportamiento de la resistencia al corte de la interfaz de la capa de mezcla asfáltica reforzada. Las pruebas de corte de Leutner se emplearon para estimar la resistencia al corte de estas muestras. Las pruebas se realizaron a cinco temperaturas diferentes, 10, 0, 10, 20 y 30 °C para comprender los efectos térmicos en la interface.

Las pruebas desarrolladas mediante el ensayo de Leutner a una velocidad de carga de 50 mm/min, mide el esfuerzo y la deformación para obtener la fuerza de corte máxima (F_{max}) y el desplazamiento de adhesión (S_{max}) en la sección transversal A de la muestra cilíndrica con diámetro D como (Sudarsanan & otros, 2018).

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{4F_{max}}{\pi D^2} \quad (2)$$

En la siguiente figura se muestra el comportamiento típico de la unión entre la interface y el comportamiento de desplazamiento por corte. El desplazamiento en la tensión máxima (S_{max}) se mide como la distancia desde el punto de compensación inicial hasta el desplazamiento

correspondiente a la tensión máxima. Además, el módulo de reacción máxima de cizallamiento (K_{peak}) se evalúa de la siguiente manera, (Sudarsanan & otros, 2018) (Figura 11).

$$K_{peak} = \frac{\tau_{max}}{s_{max}} \quad (3)$$

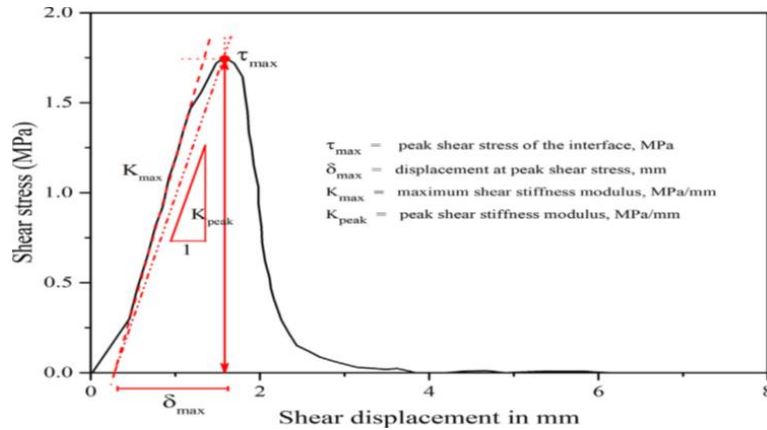


Figura 11. Gráfico esfuerzo de deformación típico del ensayo de Leutner.

Fuente: Sudarsanan, Karpurapu & Amrithaigan, 2018.

Se realizaron un total de tres cuerpos de prueba por tasa de aplicación del ligante y tipo de geomalla, con el objetivo de verificar consistencia de los datos obtenidos en el ensayo de Leutner, se calcula la desviación estándar de los mismos y se hace el chequeo con la desviación estándar permisible para la fuerza máxima (τ_{max}) y la desviación estándar del desplazamiento (s_{max}):

$$\sigma(\tau_{max}) = 0,074 + 0,04 \times \tau_{max} \quad (4)$$

$$\sigma(s_{max}) = 0,38 \text{ mm} \quad (5)$$

Se concluyó que las resistencias de adherencia observadas mostraron una amplia dispersión a una tasa de tensión más baja y temperaturas más altas en comparación con los resultados a tasas de tensión más grandes. La amplia dispersión puede atribuirse a la influencia del peso propio del material que actúa en la dirección de corte, así como al comportamiento viscoso de la capa de asfalto y la carpeta asfáltica a temperaturas superiores a 20 °C. Se recomendó tener mucho cuidado durante la prueba a temperaturas más altas y con tasas de tensión más bajas al reducir el intervalo de tiempo entre el ensamblaje de la muestra y la carga durante las pruebas.

Las pruebas de cizallamiento realizadas a una tasa de deformación de 50 mm / min mostraron un aumento de la resistencia en un 10-15% con un cambio en la temperatura de -10 a 10°C, seguido de una reducción del 80% en la resistencia hasta 30°C. Se observó que resistencia al corte de las

muestras de interface reforzadas con geosintéticos se reduce en un 20–50% en comparación con las muestras no reforzadas, según el tipo de material geosintético.

2.2.8. Otros factores que influyen en riegos de adherencia

Dosificación

Con tal de determinar la importancia de la dosificación en la mezcla, se han realizado diversos estudios sobre la resistencia al deslizamiento con riego de adherencia y sin el en la interfase de capas. (Flintsch, de León, McGhee, & Al-Qadi, 2003) realizaron importantes estudios en los que utilizaba tres parámetros, que eran el coeficiente de fricción de la cara donde se aplica el riego después de rotura, el módulo de la pendiente de la curva de rotura y el cortante máximo. Concluyó que en muestras sin riego solo varían el módulo y el máximo esfuerzo cortante. Varios estudios posteriores concluyeron que los especímenes sin riego de adherencia tenían menos resistencia a fatiga. Estos resultados se muestran en la siguiente figura (donde PSD es el permanente shear displacement).

(Soto, 2006) determinó la importancia del riego de adherencia mediante ensayos de corte. Sus investigaciones dieron lugar a la importancia de la existencia de un riego de adherencia cuando la capa de rodadura es fina. También llegó a la conclusión de la necesidad de la calidad de la emulsión bituminosa, la correcta ejecución de ésta, y la dotación, ya que si no se aplica cuidadosamente puede reducir considerablemente la vida útil del firme.

Tipo de ligante

El ligante usado tiene un cierto peso en la resistencia al corte de la interfaz de las capas. Soto (2006) determinó que cuando se usan emulsiones de alta calidad para riegos de adherencia entre capas, la rotura se produce en la capa bituminosa y no en la zona de unión entre las capas. Otras investigaciones complementaron este análisis llegando a la conclusión de que el tipo de riego utilizado tiene más importancia que la dosificación. (Fuentes, Gunaratne, & Hess, 2010) entre muchos otros, concluyeron que la emulsión termo-adherente es al menos tan adecuada como las convencionales, mejorando la adherencia respecto a estas. Según estos estudios la dotación más adecuada para dicha emulsión termo-adherente está situada en un rango de 300 g/m² a 400 g/m² de betún residual.

Tipo de mezcla

La resistencia de la unión entre las capas está relacionada directamente con los materiales utilizados para su construcción. El tipo de mezcla es un factor fundamental en lo que se refiere a la adherencia entre capas de asfalto debido al contenido de huecos y el ligante de la capa bituminosa. Gordillo (1997) observa que la técnica de microaglomerados en caliente, ya que una de las ventajas que tienen es tener distinto esqueleto mineral, mejora la textura, aumentando la impermeabilidad y aumenta su capacidad portante respecto a las cargas del tráfico.

Para reparación de fisuras y prevención de estas se puede colocar un material geosintético entre las capas. De estos estudios se obtienen que los materiales del pavimento tienen una importancia en la resistencia al corte de éste. Va ligado con la dotación de la emulsión y se deberían de establecer unas correlaciones para este parámetro.

Superficie

La superficie es un factor importante, ya que sobre ella se aplica el riego de adherencia, y la posible existencia de humedad o polvo puede influir en las características de adherencia del pavimento. (Fumado, 1995) y más investigadores obtuvieron que la presencia de humedad afecta a la adherencia sin la aplicación de un riego, y en cambio si éste es aplicado las diferencias son muy pequeñas, por lo que respecta a la adherencia del pavimento. Los métodos de limpieza son un factor a tener en cuenta por lo que respecta a la capa inferior al pavimento.

Por otra parte, también se tendrá que tener en cuenta el estado superficial de la capa antes de su aplicación, ya que, a la hora de aplicarlo en obra, si se dan situaciones climatológicas desfavorables o la aparición de suciedad, podrían influir seriamente en la adherencia entre las capas. Esto podría reducir considerablemente la resistencia al corte de las capas una vez que la emulsión ha roto ya que la dotación de la emulsión se vería reducida. Teniendo estos resultados en cuenta, se puede concluir que la adherencia que un pavimento tiene depende del estado superficial de las capas. Por lo tanto, para dar solución a este posible problema se debería garantizar unas condiciones mínimas con el fin de reducir la existencia de suciedad o polvo, así como la presencia de humedad o agua, para garantizar una mayor adherencia.

Temperatura

La temperatura es un factor que influye en el comportamiento del ligante, porque podría cambiar las características del betún de la emulsión y por lo consiguiente las del propio pavimento. Estas variaciones de temperatura se pueden dar desde la salida de la mezcla de fábrica hasta obra y se produce un enfriamiento de la mezcla. Esto se denomina segregación térmica y es especialmente peligrosa si se produce en capas finas de rodadura. El efecto de este enfriamiento fue estudiado por Álvarez (2007). En esta investigación se ensayaron dos capas con dos emulsiones (una de rotura rápida y otra termo adherente), en la que la temperatura de compactación de la segunda muestra fue disminuida, y en ambos casos la resistencia al corte disminuye para probetas con y sin riego de adherencia.

3. Metodología

3.1. Materiales utilizados

Es importante resaltar que en nuestro medio el método utilizado más comúnmente para el diseño de pavimentos es el método AASHTO (American Association of state Highway and Transportation Officials) y el método aplicado por el Instituto Nacional de Vías –INVIAS. Si bien la propiedad fundamental para caracterizar los materiales que constituyen la sección del pavimento en una carretera es la selección adecuada de los materiales granulares para su óptima aplicación, lo cual garantiza la calidad de los pavimentos acorde a las especificaciones INVIAS, no es muy favorable el hecho de que sobre el material proveniente de las diferentes minas la información sobre sus propiedades físicas es muy escasa y desactualizada conllevando en muchas ocasiones a generar pavimentos de mala calidad y poca durabilidad.

Por tal razón, a continuación, se pretende entregar una información real sobre las características físicas del material pétreo proveniente de la mina AGRESUR S.A.S., ubicada en el Municipio de Funes, el cual es insumo inicial y necesario para poder realizar el ensayo Marshall y posteriormente determinar si la mezcla asfalto – geosintético, probado mediante ensayos de laboratorio, incide en la adherencia de la capa asfáltica.

Los materiales utilizados en el presente estudio son los requeridos para mezcla asfáltica en caliente MDC-19, con la aplicación de riego de liga y adición de geosintéticos. Los materiales pétreos fueron adquiridos en la planta de AGRESUR S.A.S., acopiados en el laboratorio de la Universidad del Cauca para posteriormente fabricar los cuerpos de prueba requeridos para el estudio. Cabe resaltar que todos los cuerpos de prueba fueron elaborados con materiales que cumplen con las especificaciones técnicas de INVIAS – 2013.

3.1.1. Agregado pétreo

El agregado pétreo fue extraído del río Téllez ubicado en el corregimiento de Pilcuan, municipio de Funes Nariño, el material fue triturado mediante trituradoras primaria y secundaria, luego tamizado para finalmente, conformar la distribución de tamaños de las partículas que se muestra en la Tabla 1

Tabla 1. Granulometría de los agregados para la mezcla asfáltica.

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

Fuente: Esta investigación.

La granulometría del material granular para elaboración de la mezcla asfáltica está constituido en un 45% por grava, 47% por arena y 8% por llenante mineral. Adicionalmente se encontró un coeficiente de uniformidad $cu = 32,5$ y un coeficiente de curvatura $cc = 2,03$, con lo cual se clasifica como una arena pobremente gradada SW-SM o A-2-6 (0), se muestra la distribución granulométrica en la Figura 12.

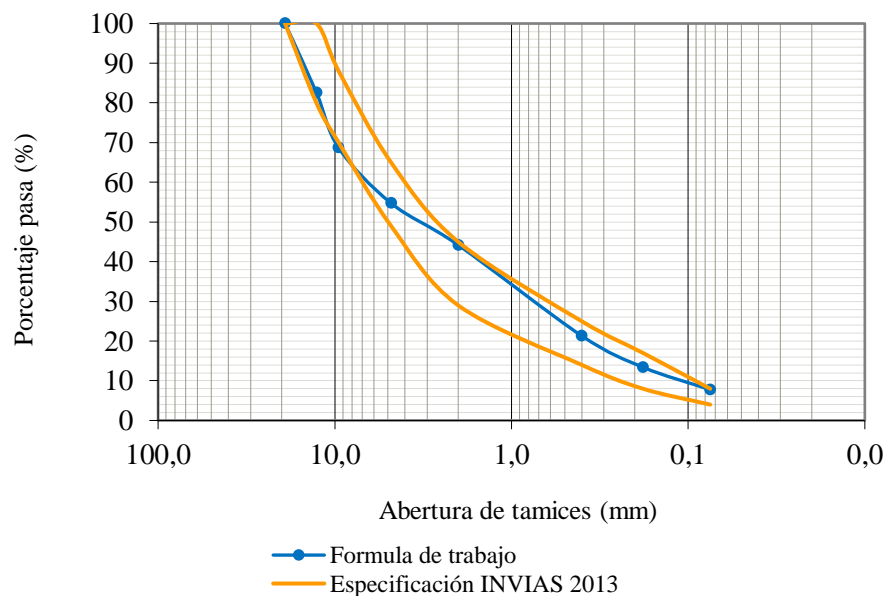


Figura 12. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.

Fuente: Esta investigación.

Se observa que la mezcla de diseño para materiales granulares se encuentra dentro de la franja estipulada por el Instituto Nacional de Vías en especificación 450-13.

3.1.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico es proveniente de la refinería de Barrancabermeja, el cual se adicionó en una proporción de 5.0% en masa total de la mezcla según el diseño Marshall. Además, según la variación de la viscosidad del cemento asfáltico en función de la temperatura, para llevar a cabo la mezcla con los agregados pétreos la temperatura es de $149\pm 1^{\circ}\text{C}$ y la de compactación en laboratorio es de $139\pm 1^{\circ}\text{C}$. Entre los ensayos de caracterización realizados a este material se destaca la curva reológica. En la Tabla 2, se presentan los resultados de los ensayos de caracterización.

Tabla 2. Resultados de caracterización de cemento asfáltico.

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

Fuente: Esta investigación.

En la Figura 13 se muestra la curva reológica del cemento asfáltico utilizado para la elaboración de los cuerpos de prueba.

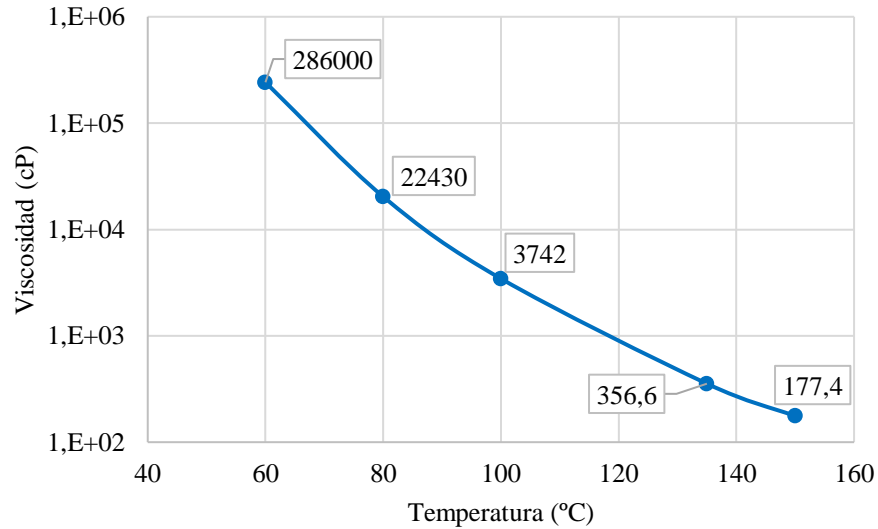


Figura 13. Curva reológica del cemento asfáltico.
Fuente: Esta investigación.

3.1.3. Geosintéticos

Se utilizaron dos tipos de geosintéticos, específicamente geomallas utilizadas para el refuerzo de mezclas asfálticas, Geomalla 1 y Geomalla 2.



Fotografía 1. Geomalla 1
Fuente: Esta investigación.

Geomalla 1: es una geomalla biaxial de fibra de vidrio, diseñadas para reforzar y controlar el reflejo de agrietamientos en capas de concreto asfáltico. Esta impregnada con una solución bituminosa que las hace compatibles con el asfalto y facilitan su adherencia a las capas asfálticas; el tamaño de sus aberturas permite una alta interacción con el agregado que compone la mezcla y el contacto directo entre las superficies involucradas.

En la investigación se utilizó la geomalla 1, se muestra en la Fotografía 1 y en la Tabla 3 se encuentran las propiedades y características.

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas de la Geomalla 1.

Propiedades mecánicas	Norma de ensayo	Unidad	Datos Marv Fv 100
Resistencia a la tensión última MD/ TD	ASTM D 6637	kN/m	100,0 / 100,0
Deformación a la tensión última MD / TD		%	2,4 / 2,3
Propiedades de retracción @ 200°C después de 15 minutos	MEDIDO	%	< 0,5
Propiedades Físicas			
Material			Fibra de vidrio
Resistencia a altas temperaturas (punto de ablandamiento)	ASTM D 276	°C	> 650 Fibra > 218 recubrimiento
Tamaño de abertura MD/ TD	MEDIDO	mm	25,4 x 25,4
Presentación del rollo			
Ancho		m	3,90
Largo	MEDIDO	m	50,0
Área		m ²	195,0

Fuente: Esta investigación.

Geomalla 2: geomalla biaxial de poliéster de alta tenacidad (PET) diseñadas para reforzar y controlar el reflejo de agrietamientos en capas de concreto asfáltico, están impregnadas con una solución bituminosa que las hace compatibles con el asfalto y facilitan su adherencia a las capas asfálticas; el tamaño de sus aberturas permite una alta interacción con el agregado que compone la mezcla y el contacto directo entre las superficies involucradas, lo cual aumenta la resistencia a la tensión en la nueva capa asfáltica, incrementando así la resistencia al reflejo de los agrietamientos y la vida de fatiga, reduciendo los costos de mantenimiento y aumentando la vida útil de la sobrecapa.

En la investigación se utilizó la geomalla geomalla 2, se muestra en la Fotografía 2 y en la Tabla 4 se encuentran las propiedades y características.



Fotografía 2. Geomalla 2.
Fuente: Esta investigación.

Tabla 4. Propiedades físicas y mecánicas de la Geomalla 2.

Propiedades mecánicas	Norma de ensayo	Unidad	Valores MARV ASPHALT 100
Resistencia (MD)	ASTM D 6637	kN/m	100,0
Resistencia (TD)			100,0
Elongación (MD)		%	13,9
Elongación (TD)			12,2
Resistencia a la carga cíclica			Alta vida de fatiga en ciclos de cizallamiento y tensión - compresión
Propiedades físicas			
Tipo de polímero			PET (3)
Material			Fibras multifilamento de poliéster de alta tenacidad PET, recubiertas con copolímero bituminoso de alto desempeño
Resistencia a altas temperaturas (punto de ablandamiento)	ASTM D 276	°C	240
Tamaño de abertura (MD)	medido	mm	22,2
Tamaño de abertura (TD)	medido	mm	22,0
DURABILIDAD			
Peso molecular fibra	GI GG8	g/mol	27977
Nivel de grupo carboxilo	GI GG7	m mol/kg	15,2
Presentación del rollo			
Ancho x largo	medido	m	2,65 x 60
Área		m ²	159,0
Ancho x largo		m	3,80 x 50
Área		m ²	190,0
Ancho x largo		m	
Área			

Fuente: Esta investigación.

3.1.4. Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica empleada para el desarrollo de esta investigación fue una mezcla densa en caliente tipo MDC-19, el diseño de la mezcla fue suministrado por la Universidad de Nariño ubicada en la ciudad de Pasto, Departamento de Nariño. Los agregados fueron transportados hasta el laboratorio de la Universidad del Cauca, donde se hizo el tamizado, secado y pesaje de acuerdo al diseño de mezcla (ver Fotografías 3, 4, 5 y 6), luego se metieron en el horno termostático para ser calentadas a una temperatura de 160°C (11°C por encima de la temperatura de mezcla del ligante).



Fotografía 3. Pesaje del agregado grueso.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 4. Pesaje del agregado fino.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 5. Distribución de cantidades de agregado.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 6. Agregado para la mezcla asfáltica mezclado.
Fuente: Esta investigación.

El cemento asfáltico se calentó a la temperatura de 149°C, luego se adicionó a la mezcla de agregados pétreos proporcionados de acuerdo al diseño Marshall (Fotografía 7). Se mezclan los materiales hasta que los agregados estuvieron completamente recubiertos con el asfalto (Fotografía 8), se dejó enfriar la mezcla asfáltica hasta que adquirió la temperatura de compactación: 139°C para luego compactar la mezcla asfáltica con el compactador giratorio (Fotografía 9).



Fotografía 7. Adición de cemento asfáltico.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 8. Mezclado homogéneo con agregado.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 9. Compactación de capa inferior en compactador giratorio.
Fuente: Esta investigación.

3.1.5. Riego de liga

Se utilizó un tipo de ligante bituminoso como riego de liga, es una emulsión catiónica de rotura lenta CRL-1, a continuación, se muestra la caracterización de la emulsión asfáltica en la Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización de emulsión asfáltica CRL-1.

Propiedad	Norma de ensayo INV	Resultado	Unidad	Requisito INV Art. 415-13
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	E-763	27.80	s	≤ 100
Contenido volumétrico de agua	E-761	38.89	%	≤ 43
Estabilidad en almacenamiento (24horas)	E-764	0.87	%	≤ 1
Sedimentación a los 5 días Destilación		2.23	%	≤ 5
Contenido de asfalto residual	E-762	61.11	%	≥ 57
Contenido de disolventes		0.0	%	0
Tamizado				
Retenido tamiz N° 20	E-765	0.0971	%	≤ 0.10
pH	E-768	1.93		≤ 6
Ensayos sobre residuo de destilación				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	E-706	68.9	0.1 mm	60 – 100
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	E-702	>100	cm	≥ 40
Solubilidad en tricloroetileno	E-713	99.99	%	≥ 97.5

3.2. Elaboración de cuerpos de prueba

3.2.1. Elaboración de la primera capa de mezcla asfáltica.

Se elaboraron los cuerpos de prueba de forma cilíndrica, con diámetro de 15 cm y 12 cm de altura, los especímenes fueron constituidos por dos capas de mezcla asfáltica, la primera capa tiene 7 cm y la segunda capa 5 cm, se adhirieron en su superficie de contacto riego de liga con emulsión asfáltica. Se elaboraron tres grupos así:

- Primer grupo se elaboró sin geomalla y razón de emulsión asfáltica de 350 g/m^2 , porque esta tasa de aplicación o dosificación residual del riego de liga tiene un efecto importante sobre la resistencia al esfuerzo cortante que desarrolla la interfase adherida de las capas asfálticas para los riegos con CRL-1 (Dorado & Rosero, 2018).
- Segundo grupo: los cuerpos de prueba fueron elaborados en dos capas con geomalla 1 y variación de la razón de riego de liga (250 g/m^2 , 350 g/m^2 , 450 g/m^2 , 550 g/m^2 , 550 g/m^2 y 650 g/m^2).
- Tercer grupo: los cuerpos de prueba fueron elaborados en dos capas con geomalla 2 y variación de la razón de riego de liga (250 g/m^2 , 350 g/m^2 , 450 g/m^2 , 550 g/m^2 , 550 g/m^2 y 650 g/m^2).

La primera capa de 7 cm fue elaborada con la gradación del diseño de mezcla asfáltica (Fotografía 10), se adicionó el asfalto precalentado (Fotografía 11) y se compactó mediante el compactador giratorio con 160 giros, presión vertical constante de 600 Kpa y velocidad de giro de 30 rpm (Fotografía 12).



Fotografía 10. Granulometría para mezcla asfáltica.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 11. Mezclado homogéneo con agregado y asfalto.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 12. Compactación de capa inferior en compactador giratorio.
Fuente: Esta investigación.

3.2.2. Ensayo de retención de residuos de emulsión asfáltica

Se evaluó la cantidad de asfalto que puede absorber cada una de las geomallas utilizadas para el desarrollo de este estudio: geomalla 1 y geomalla 2, con el propósito de conocer la cantidad de asfalto que retiene cada tipo de geomalla.

Las muestras de geomalla se introdujeron en asfalto caliente (Fotografía 13), se colgó la geomalla 1 (Fotografía 14) y la geomalla 2 (Fotografía 15) para quitar el exceso de asfalto.



Fotografía 13. Se introducen las muestras al horno.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 14. Muestras de Geomalla 1.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 15. Muestras de Geomalla 2.
Fuente: Esta investigación.

Se procesó la información producto del ensayo de retención de residuos y se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 6.

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

Material	Muestra	Peso inicial gr	Peso final gr	Residuo gr	Área de la muestra m ²	Gravedad específica del cemento asfáltico g/l	Por CP l/m ²	Media l/m ²
Geomalla 1	1	14,37	20,07	5,7	0,022	1000	0,25	0,258
	2	14,09	19,56	5,47		1000	0,24	
	3	13,98	19,86	5,88		1000	0,26	
Geomalla 2	1	9,66	19,54	9,88	0,014	1000	0,70	0,69
	2	9,57	19,44	9,87		1000	0,70	
	3	9,46	18,96	9,5		1000	0,67	

Fuente: Esta investigación

La geomalla 1 está elaborada con fibra de vidrio y la geomalla 2 con poliéster de alta tenacidad, la diferencia de los materiales de cada geomalla marca la variación del nivel de absorción. Se evidencia en los resultados del ensayo de absorción de asfalto (Tabla 6 y Figura 14) que la geomalla 2, absorbe tres veces la cantidad de asfalto que la geomalla 1.

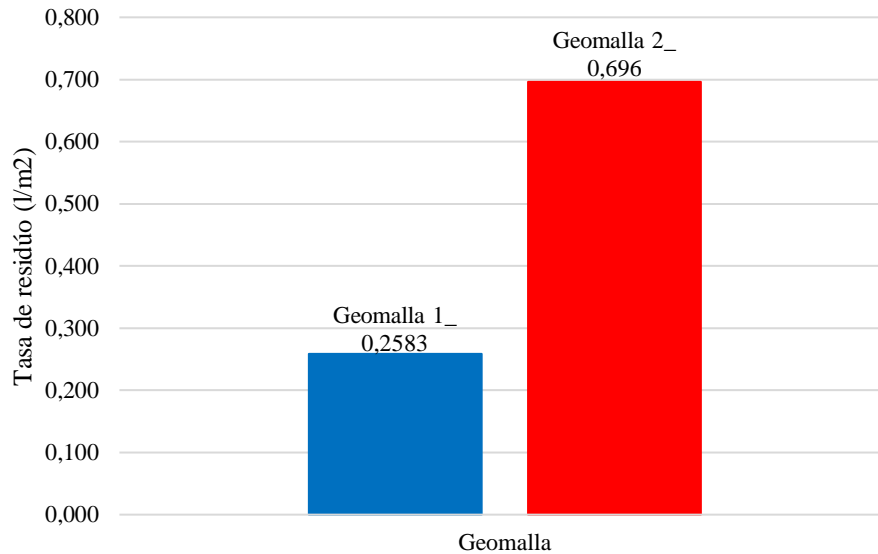


Figura 14. Medida de la tasa de retención de asfalto en las geomallas.
Fuente: Esta investigación.

Se calcularon las tasas recomendadas para la aplicación de asfalto propuesta de acuerdo a Button et al. (1982) citado en (Fonseca, 2015), teniendo en cuenta que el procedimiento matemático de este autor es para geotextiles, no para geomallas. En este trabajo se utilizó este procedimiento para conocer el comportamiento y cantidad de retención de asfalto en la geomalla 1 y geomalla 2. En la Tabla 7 se muestran los resultados.

Tabla 7. Tasas de residuo de proyecto

Geomalla			
Geomalla 1		Geomalla 2	
Tasa de saturación Qs (l/m²)	Tasa del proyecto QD (l/m²)	Tasa de saturación Qs (l/m²)	Tasa de saturación Qs (l/m²)
0,25	0,92	0,69	1,36

Fuente: Esta investigación.

Al aplicar la metodología propuesta por Button et al. (1982) citado en (Fonseca, 2015) y compararla con las tasas aplicadas en este estudio, se evidencia que las tasas de proyecto obtenidas fueron mayores, aun así, teniendo en cuenta que la muestra de cada geomalla es una red de

elementos y no un elemento rectangular. Se evidenció que la razón de retención de la geomalla 1 y la geomalla 2 superan las tasas de proyecto en un 30% y 52% respectivamente.

3.2.3. Ensayo de macha de arena

Una vez se elaboraron la primera capa de todos los cuerpos de prueba, se realizó la prueba mancha de arena de acuerdo a la especificación INV E-791-13 Medida de la macrotextura superficial de un pavimento empleando la técnica volumétrica para parametrizar las condiciones de adhesión entre las capas y los geosintéticos (Fonseca, 2015), en las Fotografías 16, 17 y 18 se muestra el proceso del ensayo.



Fotografía 16. Pesaje de la arena.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 17. Esparcimiento de la arena.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 18. Esparcimiento de la arena.
Fuente: Esta investigación.

Teniendo en cuenta que la textura de la superficie interfiere con las condiciones de adhesión entre las capas, se realizaron mediciones de la altura del punto de arena en la superficie de la primera capa de todos los cuerpos de prueba (Fonseca, 2015). Los resultados obtenidos no varían, razón por la cual se muestra el resultado de (15) especímenes en la Tabla 8.

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

Cuerpos de prueba	
Emulsión CRL 1	
Muestra	Altura de arena (mm)
1	0,28
2	0,28
3	0,28
4	0,28
5	0,28

Cuerpos de prueba	
Emulsión CRL 1	
Muestra	Altura de arena (mm)
6	0,28
7	0,28
8	0,28
9	0,28
10	0,28
11	0,28
12	0,28
13	0,28
14	0,28
15	0,28
Promedio	0,28

Fuente: Esta investigación.

Los resultados indican que la superficie puede considerarse con una textura muy fina, esto quiere decir que el área de contacto entre las capas de mezcla asfáltica y/o capas de mezcla asfáltica geomalla es mayor.

3.2.4. Interface

Después de la realización del ensayo de macrotextura, se procedió a limpiar la arena de las muestras (primera capa) de mezcla asfáltica y se aplicó la emulsión asfáltica (previamente calentada): se instaló una cinta adhesiva alrededor de la muestra para evitar la pérdida de emulsión asfáltica, se colocó la muestra en la balanza y se taró para la instalación del riego de liga con una brocha, dicha cantidad se pesó y corresponde a la cantidad material previamente calculado.

La aplicación de la emulsión asfáltica como riego de liga se hizo de acuerdo al área del cuerpo de prueba (diámetro 15 cm) y el contenido de asfalto residual de los riegos: en este caso, la emulsión asfáltica tiene es de 61,31% para la emulsión CRL-1. Así pues, las tasas de emulsión aplicadas para lograr la dotación de asfalto residual deseada se muestran en la Tabla 9.

La condición que se evalúa en este estudio es la variación de la tasa del riego de liga (250 g/m^2 , 350 g/m^2 , 450 g/m^2 , 550 g/m^2 y 650 g/m^2) acompañada con cada una de las geomallas 1 y 2. La muestra patrón sin geomalla se elaboró con 350 g/m^2 como referencia.

Tabla 9. Relación entre asfalto residual y emulsión por aplicar.

Asfalto residual (g/m ²)	250	350	450	550	650
Emulsión CRL-1 (g)	7,2	10,0	12,9	15,8	18,7

Fuente: Esta investigación.

Proceso de instalación de la geomalla: Previamente se determinó la cantidad de asfalto que podía ser absorbida de acuerdo a la norma ASTM D 6140 (Fotografías 19 y 20). La geomalla fue cortada en cuadrados de (15 cm) de lado, se buscó un área que no tuviera alteraciones posteriormente de cortó cada muestra en una circunferencia de (15 cm) de diámetro cuidando que la mayor cantidad de módulos de la geomalla están dentro del área de la muestra (Fotografía 21). Una vez rompió la emulsión asfáltica se colocó la geomalla en la primera capa de mezcla asfáltica (Fotografía 22).

**Fotografía 19. Aplicación de riego de liga.**
Fuente: Esta investigación.**Fotografía 20. Especímenes con emulsión asfáltica**

Fuente: Esta investigación.

**Fotografía 21. Geomalla.**
Fuente: Esta investigación.**Fotografía 22. Instalación de geomalla.**
Fuente: Esta investigación.

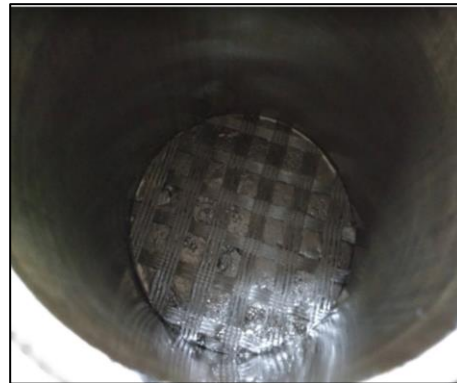
3.2.5. Elaboración de la segunda capa de mezcla asfáltica.

Para la segunda capa, se utilizó el mismo molde del equipo compactador giratorio (Fotografía 23), se insertó la primera capa de la briqueta (altura 7 cm) con la geomalla instalada (Fotografía 24), luego se preparó la cantidad de mezcla asfáltica para elaboración de la segunda de (5 cm) de altura (Fotografía 25), posteriormente, se compactó con una energía de compactación de 30 rpm y 160 giros mediante el compactador giratorio (Fotografía 26). Después del enfriamiento del conjunto bicapa de mezcla asfáltica con geomalla adherida con emulsión asfáltica se obtuvo el cuerpo de prueba para estudio de la adherencia.

Todos los cuerpos de prueba fueron marcados (Fotografía 27) y agrupados de acuerdo al tipo de geomalla y cantidad de riego de liga adicionado (Fotografía 28).



Fotografía 23. Molde para elaboración
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 24. Primera capa con geomalla dentro del molde.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 25. Elaboración de la segunda capa.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 26. Desmoldado.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 27. Cuerpos de prueba.
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 28. Cuerpos de prueba elaborados.
Fuente: Esta investigación.

El equipo Marshal fue acondicionado para hacer la rotura de los cuerpos de prueba, se instaló un aditamento compuesto de dos mordazas que van a sostener la primera capa de mezcla asfáltica (7cm) y una tercera mordaza móvil para la aplicación de la carga, como se muestra en la (Fotografía 29).



Fotografía 29. Dispositivo de ensayo y cuerpo de prueba.
Fuente: Esta investigación.

A continuación, se muestra el cuerpo de prueba dentro del aditamento e instalados en el equipo Marshall para hacer el Ensayo de Leutner (Fotografía 30) y el estado final de un cuerpo de prueba fallado a cortante (Fotografía 31):



Fotografía 30. Vista lateral rotura de cuerpos de prueba
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 31. Rotura de cuerpo de prueba.
Fuente: Esta investigación.

3.2.6. Descripción del equipo y ejecución del ensayo de adherencia

El equipo de Leutner no es comercial en Colombia, por lo tanto, se adaptó la prensa Marshall para el desarrollo de la prueba. Se fabricó un aditamento conformado por un par de mordazas para sostener el cuerpo de prueba en la primera capa (7cm) y un cabezote de tal forma que la interface y la segunda capa (5 cm) se encuentran en voladizo para soportar la carga vertical, las partes del equipo desarrollado para este estudio fueron las siguientes:

Prensa Marshall: equipo fabricado por PINZUAR modelo: PS-25 (Figura 15), tiene las siguientes características:

- 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.
- El anillo de carga es marca BAKER, modelo: TYPE J62 y número de serie. de serie: 3714 E6819.



Figura 15. Prensa Marshall.
Fuente: Esta investigación.

Aditamento: se compone por dos mordazas que sujetan la primera capa del cuerpo de prueba (7cm), dos varillas perpendiculares en cada extremo para sujetar la mordaza superior (Fotografías 32 y 33).



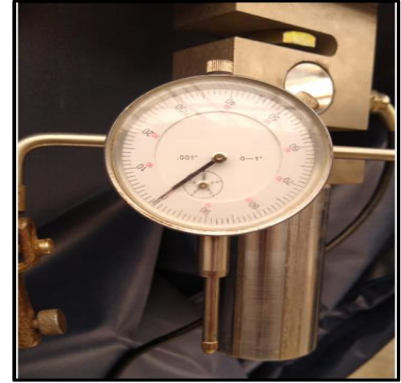
Fotografía 32. Vista frontal del aditamento.

Fuente: Esta investigación.



Fotografía 33. Vista lateral del aditamento.

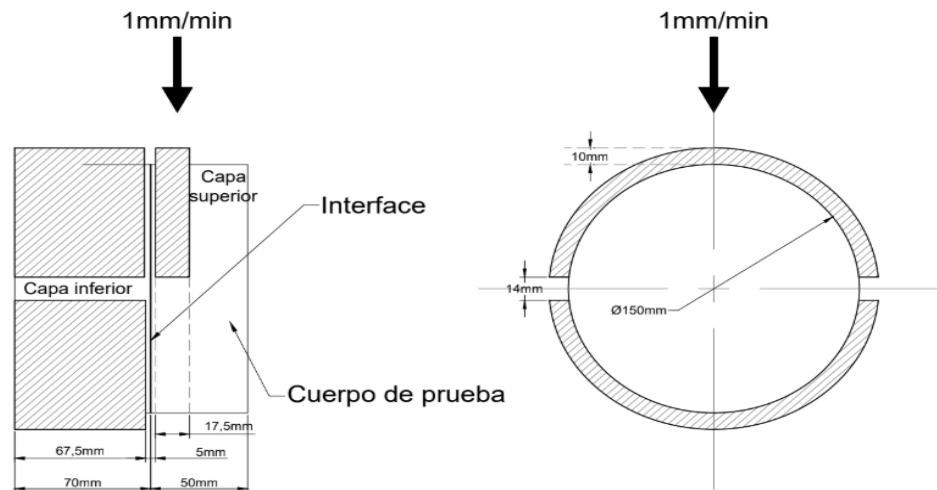
Fuente: Esta investigación.



Fotografía 34. Deformímetro precisión 1 milésima de pulgada a 1".

Fuente: Esta investigación.

El funcionamiento del equipo consiste en la aplicación de una carga tangencial sobre la unión o interface entre las capas a una velocidad constante de (50 mm/min), sin embargo, no fue posible hacer las pruebas a esta velocidad por la dificultad al tomar las medidas con el deformímetro (Fotografía 34), por lo tanto, la velocidad de ensayo para este estudio fue de (1 mm/min). El resultado es la carga máxima de resistencia a la rotura y la determinación del módulo de reacción de la interfaz (Fonseca, 2015). La Fotografía 35 muestra un esquema del molde fabricado para el desempeño de cizalla de Leutner y el aditamento utilizado en las pruebas se muestran en la fotografía 35.



Fotografía 35. Esquema del aditamento para desarrollo del ensayo de Leutner.

Fuente: Esta investigación.

El ensayo de Leutner no se realiza en Colombia, razón por la cual se adaptó la prensa Marshall Eléctrica utilizada para el ensayo Marshall, manual para CBR y compresión confinada, cumple con las normas ASTM D1559, la aplicación de carga se hace a velocidad prefijada para prueba

Marshall, correspondiente a 50mm/min. Permite medir de manera rápida y exacta la resistencia al flujo plástico de las mezclas bituminosas.

A pesar de que la velocidad de aplicación de carga es ideal para la realización del ensayo, fue necesario hacer la rotura de los cuerpos de prueba a velocidad de 1mm/min. Debido a que el equipo no cuenta con software para transferir los datos a un ordenador, se procedió a tomar los datos manualmente y por esta razón se reduce la velocidad.

Temperatura de rotura de los cuerpos de prueba: La prueba se debe llevar a cabo a la temperatura típica de 20°C de acuerdo a la norma NG 954 (05/18), se procedió a verificar la temperatura de los especímenes teniendo en cuenta que las pruebas se desarrollan en la ciudad de Pasto en el Departamento de Nariño.

Partiendo de la altitud media de la ciudad y haciendo uso de la siguiente expresión (Sánchez y Campagnoli, 2016):

$$T = 30 - \frac{6.3H}{1000} \quad (6)$$

Siendo,

T = Temperatura media anual, °C

H = Altura sobre el nivel del mar, m

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

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

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

$$M_p = M_a \left(1 + \frac{1}{z + 4} \right) - \frac{34}{z + 4} + 6 \quad (7)$$

Siendo,

M_p = Temperatura media de la mezcla, °F

M_a = Temperatura media ponderada del aire, °F

z = Profundidad bajo la superficie, pulgadas

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

De acuerdo a lo anterior, la temperatura de los materiales es acorde a la temperatura de ensayo la norma NG 954 (05/18), por lo tanto, se procede a hacer la rotura.

4. Resultados y análisis

El ensayo de Leutner se desarrolló para evaluar la adherencia entre dos capas de mezcla asfáltica con dos tipos de geomalla: geomalla 1 y geomalla 2, con cinco condiciones de Riego de liga, también, se elaboró un grupo de briquetas sin geomalla con una tasa de ligante de 350 g/m². Los cuerpos de prueba fueron fabricados a partir de una misma mezcla bituminosa y se aplicó una emulsión CRL-1 como un riego de liga.

Las tasas de aplicación del ligante asfáltico se escogieron partiendo de la normatividad del Instituto Nacional de Vías en su especificación INV 421-13, donde la razón recomienda es de 200 g/m² a 300 g/m² para geotextiles, adicionalmente, se tuvo en cuenta la recomendación de (Dorado & Rosero, 2018) como riego de adherencia óptimo para dos capas de mezcla asfáltica convencional de 350 g/m² sin adición de geosintéticos, a fin de conocer el comportamiento, se escogió un punto por debajo: 250 g/m² que es el punto medio de la normatividad mencionada y se varía la dosificación cada 100 g/m², de esta manera se estableció la dosificación de ligante residual mínimo de 250 g/m², 350 g/m², 450 g/m², 550 g/m², 650 g/m². Se probaron un total de (33) briquetas, con los cuales se procedió a realizar cálculos para determinar la fuerza cortante máxima (kN) y el desplazamiento máximo (mm). A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

4.1. Resultados

4.1.1. Fuerza cortante (kN)

Se elaboraron cuerpos de prueba para cada dosificación de ligante asfáltico y dos tipos de geomalla, además de una muestra patrón que se elaboró con 350 g/m², los cálculos se hicieron con la fuerza aplicada por el pistón de carga del equipo, se identificó la fuerza máxima que resistió en espécimen. En las tablas 10, 11 y 12 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de Leutner: Fuerza cortante máxima con su respectivo desplazamiento.

Tabla 10. Resultados obtenidos en el ensayo de Leutner – Sin geomalla.

Sin geomalla	
Tasa del ligante (g/m²)	350
Fuerza cortante máxima Fmax (kN)	151,00 148,29 149,65
Media	149,65
σ	1,36
CV	0,9%

Tabla 11. Resultados obtenidos en el ensayo de Leutner – Geomalla 1

Geomalla 1					
Tasa del ligante (g/m²)	250	350	450	550	650
Fuerza cortante máxima F_{máx} (kN)	126,16	130,67	137,45	132,48	151,00
	126,16	126,16	129,77	142,42	142,42
	121,19	123,90	129,32	139,71	146,03
Media	124,50	126,91	132,18	138,20	146,49
σ	2,87	3,45	4,57	5,14	4,31
CV	2,3%	2,7%	3,5%	3,7%	2,9%

Fuente: Esta investigación.

Tabla 12. Resultados obtenidos en el ensayo de Leutner – Geomalla 2.

Geomalla 2					
Tasa del ligante (g/m²)	250	350	450	550	650
Fuerza cortante máxima F_{max} (kN)	142,87	148,74	143,32	145,13	144,68
	139,71	144,23	144,23	142,42	149,20
	144,23	135,64	144,68	150,55	151,91
Media	142,27	142,87	144,08	146,03	148,59
σ	2,32	6,65	0,69	4,14	3,65
CV	1,6%	4,7%	0,5%	2,8%	2,5%

Fuente: Esta investigación.

4.1.2. Resistencia al esfuerzo cortante (MPa)

Se continuó con el procesamiento de la información, con el cálculo del Esfuerzo Cortante Máximo (Mpa) para el área del cuerpo de prueba, se hizo el chequeo de la desviación estándar partiendo de los datos obtenidos en el ensayo de Leutner: Fuerza de corte máxima y desplazamiento máximo, se encontró que todos los resultados de esfuerzo cortante y desplazamiento no sobrepasan la desviación permisible de acuerdo a (Sudarsanan & otros, 2018) y finalmente se calcula el Módulo de reacción (K_{peak}).

Se calculó la desviación estándar de los mismos y se hace el chequeo con la desviación estándar permisible para el esfuerzo máxima ($\tau_{máx}$) y la desviación estándar del desplazamiento máximo ($s_{máx}$) (Tabla 13):

$$\sigma(\tau_{máx}) = 0,074 + 0,04 \times \tau_{máx}$$

$$\sigma(s_{m\acute{a}x}) = 0,38 \text{ mm}$$

Tabla 13. Desviación estándar permisible para el Esfuerzo cortante máximo y el desplazamiento máximo.

Material	Tasa de Ligante	No. muestras	Esfuerzo Cortante Máximo			Desplazamiento máximo		
			$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	σ	σ_r	$S_{m\acute{a}x}$ (mm)	σ	σ_r
Sin geomalla	350	3	8,47	0,08	0,41	7,88	0,24	0,38
	250	3	7,05	0,16	0,36	7,73	0,18	0,38
Geomalla 1	350	3	7,18	0,20	0,36	15,50	0,24	0,38
	450	3	7,48	0,26	0,37	15,72	0,27	0,38
	550	3	7,82	0,29	0,39	16,40	0,24	0,38
	650	3	8,29	0,24	0,41	16,56	0,33	0,38
	250	3	8,05	0,13	0,40	7,41	0,24	0,38
Geomalla 2	350	3	8,08	0,38	0,40	15,88	0,16	0,38
	450	3	8,15	0,04	0,40	16,14	0,09	0,38
	550	3	8,26	0,23	0,40	16,62	0,09	0,38
	650	3	8,41	0,21	0,41	16,77	0,24	0,38

Fuente: Esta investigación.

La información que se obtuvo en la rotura de los cuerpos de prueba mediante el ensayo de Leutner es consistente, satisfacen los resultados de desviación estándar permisible para el esfuerzo cortante máximo y desplazamiento máximo.

4.1.3. Módulo de reacción (MPa/mm)

Se calculó el Módulo de reacción de la interface así:

$$K_{peak} = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{S_{m\acute{a}x}} \quad (8)$$

Se muestran los resultados del Módulo de reacción en las Tablas 14, 15 y 16

Tabla 14. Resultados de Módulo de reacción Sin geomalla

Sin geomalla	
Tasa del ligante (g/m²)	350
Módulo de reacción interfase Kpeak (MPa/mm)	1,12 1,06 1,05
Media	1,07
DE	0,04
CV	3,8%

Fuente: Esta investigación.

Tabla 15. Resultados de Módulo de reacción Geomalla 1

Geomalla 1					
Tasa del ligante (g/m²)	250	350	450	550	650
Módulo de reacción interfase Kpeak (MPa/mm)	0,94 0,90 1,00	0,47 0,47 0,45	0,50 0,46 0,47	0,46 0,50 0,47	0,53 0,48 0,49
Media	0,95	0,46	0,48	0,48	0,50
DE	0,05	0,01	0,02	0,02	0,02
CV	5,4%	2,4%	4,5%	4,1%	4,7%

Fuente: Esta investigación.

Tabla 16. Resultados de Módulo de reacción Geomalla 2

Geomalla 2					
Tasa del ligante (g/m²)	250	350	450	550	650
Módulo de reacción interfase Kpeak (MPa/mm)	1,06 1,11 1,09	0,54 0,51 0,48	0,50 0,50 0,51	0,50 0,48 0,51	0,50 0,50 0,51
Media	1,09	0,51	0,51	0,50	0,50
DE	0,02	0,03	0,00	0,01	0,01
CV	2,2%	5,6%	1,0%	2,8%	1,0%

Fuente: Esta investigación.

4.2. Análisis de resultados

4.2.1. Fuerza cortante (kN)

El comportamiento a la fuerza cortante sobre cada uno de los cuerpos de prueba con la variación del ligante asfáltico se evidencia claramente en la siguiente figura:

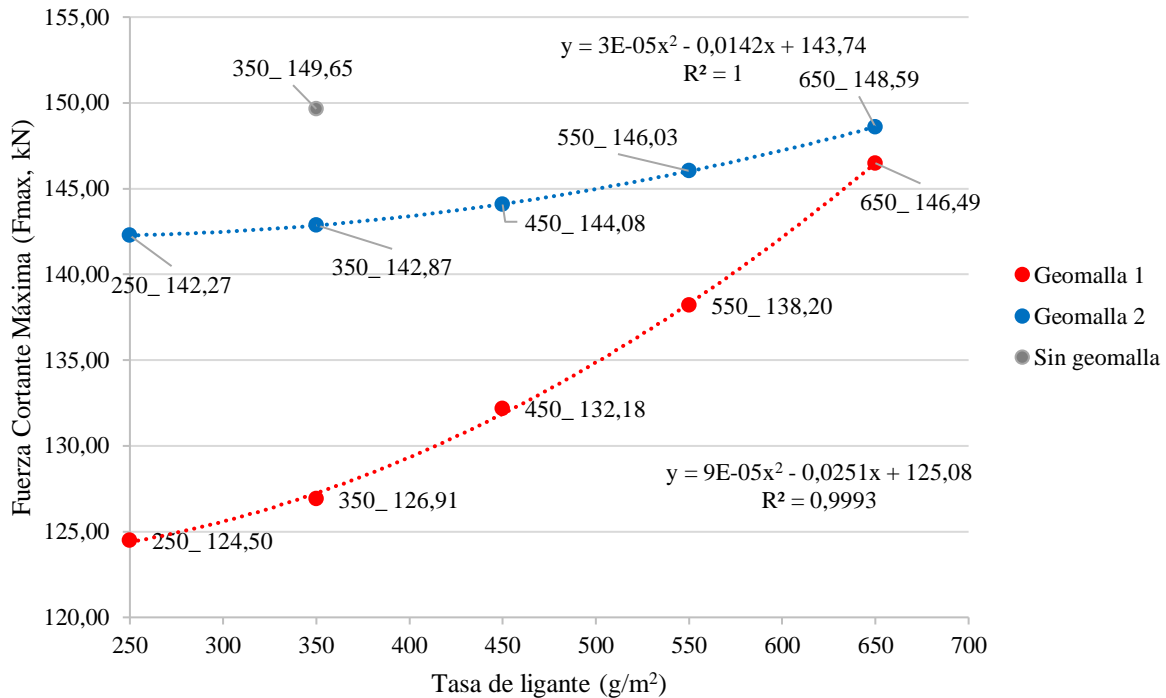


Figura 16. Resultados del ensayo de Leutner con CRL-1.

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento en la interface al aumentar el ligante asfáltico es claro, aumenta y se observa cómo se acerca a la fuerza cortante máxima de la muestra patrón (149,65 kN), sin embargo, cabe anotar que la unión es más grande en los cuerpos de prueba con mayor cantidad de ligante más la geomalla, al comparar con la muestra patrón que tiene solo emulsión asfáltica. La geomalla 1, es un material rígido y al mismo tiempo frágil por los elementos que la componen, absorbe 30% menor cantidad de emulsión asfáltica que la geomalla 2, esto limita a la geomalla 1 en el momento de adherirse a las dos capas de mezcla asfáltica con pequeñas cantidades de ligante y se evidencia en los resultados obtenidos, porque necesita mayor cantidad de ligante asfáltico para soportar mayor fuerza a cortante en la interface. Mientras que la geomalla 2, es un material dócil con gran capacidad de absorción, alcanza a soportar mayor fuerza cortante en la interface con poco cantidad de ligante, sin embargo su desarrollo es muy corto y notamos que en cantidades de ligante de

650 g/m², la fuerza cortante difiere en 2kN por encima de la geomalla 1, en este orden de ideas se podría llegar a pensar que las interfaces con geomalla 1 y riegos de liga superiores a 650 g/m² tendrá una mejor reacción a la fuerza cortante que las interfaces con geomalla 2 y las mismas condiciones tasa de ligante.

4.2.2. Resistencia al esfuerzo cortante (MPa)

El desplazamiento se encuentra marcado por la adherencia de la interface mezcla asfáltica – geomalla (Figura 17), nótese la variación de los resultados al pasar de la tasa de ligante asfáltico de 250 g/m² a 350 g/m², tienen una diferencia de 7,77 mm en cuerpos de prueba con geomalla 1 y 8,47 mm con geomalla 2, indicando que a una tasa de ligante de 250 g/m², las capas de mezcla asfáltica no se adhirieron lo suficiente a la geomalla y se deslizó rápidamente la segunda capa.

Adicionalmente, para dosificaciones de ligante asfáltico de 250 g/m² con la geomalla 1 y geomalla 2, el desplazamiento y el esfuerzo son cercanos a la muestra patrón elaborada con 350 g/m², obteniendo diferencias en cuanto al desplazamiento de 0,2 mm y 0,47 mm de la geomalla 1 y geomalla 2 respectivamente, en cuanto al esfuerzo cortante, las diferencias son de 0,97 MPa y 0,42 MPa de la geomalla 1 y geomalla 2 respectivamente (al comparar los resultados con la muestra patrón).

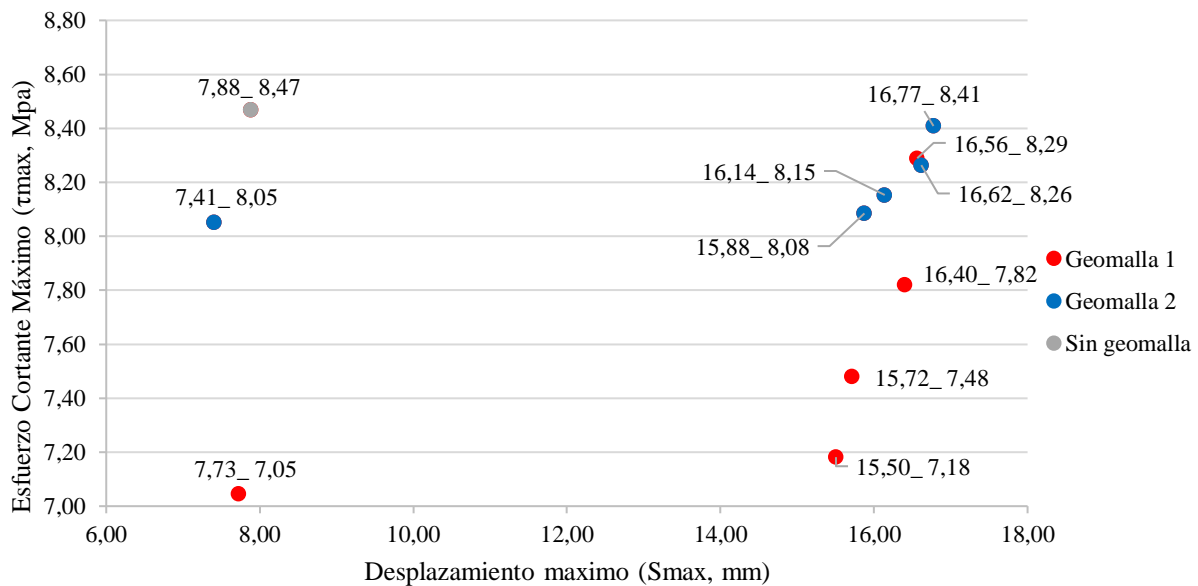


Figura 17. Esfuerzo cortante
Fuente: Elaboración propia.

Para las razones de riego de liga de 350 g/m^2 a 650 g/m^2 , se evidencia que la interface mejora su comportamiento notoriamente en cuanto al desplazamiento en un 50%, lo mismo sucede en cuanto al esfuerzo cortante, pero el desarrollo de la interface con geomalla es diferente, se nota que la interface con geomalla 2 puede resistir mayor esfuerzo cortante con adición de tasas bajas de ligante asfáltico, mientras que en la interface con geomalla 1 necesita mayor cantidad de ligante para que las dos capas de mezcla asfáltica puedan unirse.

Por otro lado, según (Walubita, et al 2018) las muestras que tienen geomalla a base de poliéster tienen resultados superiores a geomallas a base de fibra de vidrio en términos de rendimiento de la resistencia al esfuerzo cortante en la unión entre capas. Sin embargo, en este estudio la geomalla a base de fibra de vidrio (geomalla 1) tiene mejor desarrollo en resistencia al aumentar la tasa de ligante y se aproxima a los resultados obtenidos con la geomalla 2, por lo tanto, para tasas de riego de liga superiores de 650 g/m^2 podría cambiar la valoración.

4.2.3. Módulo de reacción (MPa/mm)

El módulo de reacción es mayor en interfaces pequeñas, y el desplazamiento es la mitad de los resultados obtenidos en cuerpos de prueba con cantidades de emulsión asfáltica entre 350 g/m^2 y 650 g/m^2 , en este último grupo se observa que el módulo de reacción se reduce el 50% al compararlo con muestras no reforzadas, tal como lo exponen (Sudarsanan & otros, 2018) en su investigación, se nota que el tipo de material de la geomalla 1 y la geomalla 2 influyen en la capacidad de reacción de cada interface, porque la geomalla 1 es más rígida y desarrolla módulos de reacción más bajos que la geomalla 2, lo mismo muestra (Ogundipe, 2013) en su investigación donde concluye que las intensidades de corte y las rigideces de la capa intermedia o interface varían de acuerdo a la composición de los materiales de cada mezcla, lo que indica que el tipo de material en contacto afecta a la unión de la capa intermedia con la mezcla asfáltica, sin embargo, la geomalla 1 con tasa de ligante de 650 g/m^2 muestra mejores resultados alcanzando los resultados de los cuerpos de prueba con geomalla 2 e igual condición de ligante. Por otro lado, se nota el aumento del módulo de reacción en los cuerpos de prueba con geomalla 1 y geomalla 2, a pesar que el módulo aumenta, lo hace entre el 5% y 6% para el primero y entre el 1% y 2% para el segundo. Es claro que el comportamiento de la interface con geomalla 1 a razón de 650 g/m^2 de ligante residual, donde difiere en 0,12 MPa/mm de la interface que contiene geomalla 2 (Figura 18).

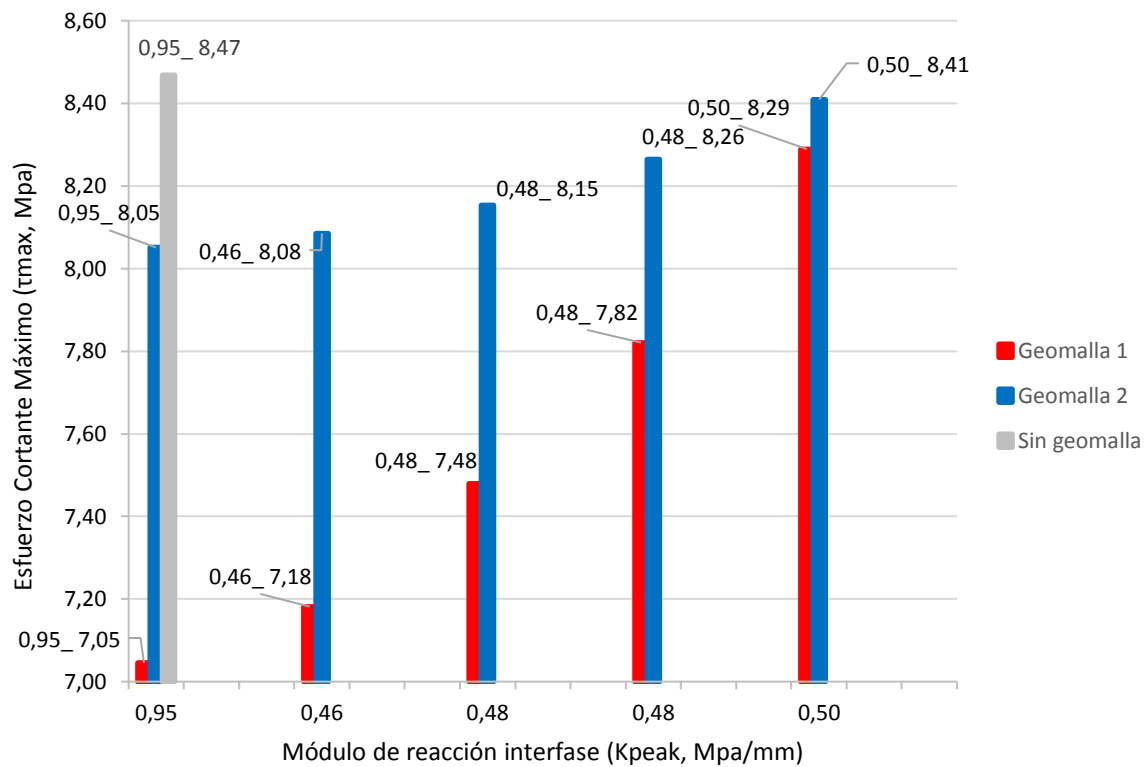


Figura 18. Módulo de reacción en la interface.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Tasa de ligante

La razón de aplicación del riego de liga en capas de mezcla asfáltica es uno de los factores que determina el comportamiento de la carpeta asfáltica construida en dos capas con y sin geomalla, en este estudio se limitaron las variables para conocer el comportamiento del conjunto de materiales utilizados, en la Figura 19 se presenta cada uno de los resultados individuales calculados para el esfuerzo cortante de cada geomalla con diferentes condiciones de emulsión asfáltica.

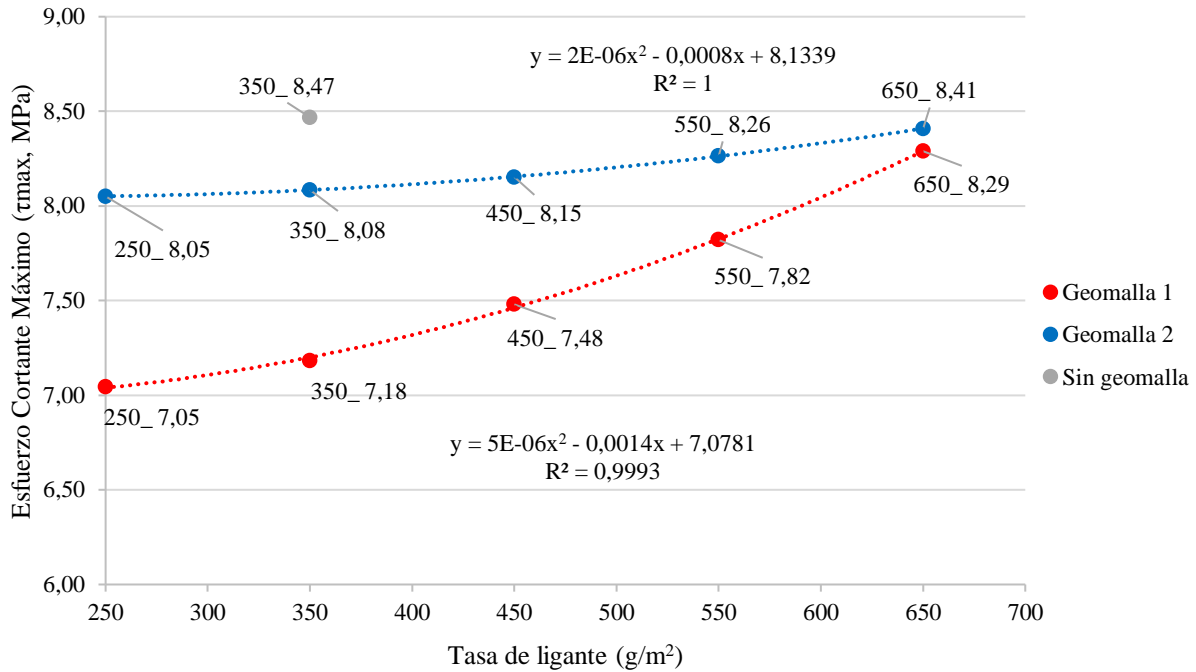


Figura 19. Resistencia al esfuerzo cortante según dosificación de ligante y tipo de geomalla.
Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de cada grupo de las interfaces analizadas con geomalla 1 y geomalla 2 ante el esfuerzo cortante con respecto a la tasa de aplicación de ligante asfáltico, dibujan una curva polinómica grado 2, se evidencia la tendencia en mejora de cada una de las geomallas al aumentar la razón de ligante asfáltico, por lo tanto, para este estudio se considera que la dosificación óptima para obtener mejores resultados es de 650 g/m².

Tabla 17. Tasas óptimas de riego de liga

Tipo de geomalla	Tasa óptima de riego de liga (g/m ²)	Esfuerzo cortante (MPa)
Geomalla 1	650	8,41
Geomalla 2	650	8,29

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, (Bueno, et al 2014) en su investigación con geotextiles encontró que una tasa de recubrimiento con ligante asfáltico igual a la capacidad de retención de asfalto es la cantidad más beneficiosa para la impregnación de todos los geotextiles evaluados. Está claro que la tasa óptima que conduce a un comportamiento mecánico mejorado de los geotextiles, ya que todos los materiales probados mostraron que la mayor cantidad de impregnación no conduce a la mayor resistencia a la tracción o respuesta de rigidez.

Adicionalmente, los investigadores tienen diversas opiniones respecto a razón del riego de liga óptimo para mejorar la adherencia en la interface: (Zamora et al., 2010) hicieron diferentes combinaciones de geotextiles y dosis de emulsión ECR-3, y obtuvieron los mejores resultados con valores de dosis de emulsión en el rango de 0.65 a 0.93 lb/yd² (0.35–0.5 kg/m²) de asfalto residual. (Wang, et. al 2017) menciona en su estudio que la especificación del Instituto del Asfalto (AI), informó que en capas adheridas las tasas de aplicación oscilaron entre 0.05 y 0.15 Gal/yd² (0.23–0.68 l/m²). Asimismo, el contenido residual de asfalto, tal como se especifica en el Manual de Pavimentación de HMA 2000, debe oscilar entre 0.04 y 0.06 Gal / yd² (0.18–0.27 l/m²). También indica que Deysarkar propuso que se obtuvieron mejores resultados en muestras con 0.1 Gal / yd² (0.45 l/m²) y Sholar et al. creían que el rango de dosificación de emulsión menos eficiente estaba entre 0,02 y 0.08 Gal / yd² (0.091 y 0.362 l / m²). Existen muchas recomendaciones basadas en investigaciones tal como lo expone (Walubita, et al 2018), diversos factores influyen en la resistencia de la unión de mezcla asfáltica con la capa intermedia, incluidos el tipo de mezcla, la temperatura, el tamaño del agregado, el tipo de capa adhesiva, la tasa de aplicación de la capa adhesiva, la rugosidad de la superficie, la edad, el tráfico, etc. No obstante, estudios limitados se han centrado específicamente en los efectos de la fuerza de unión de la geomalla. Por ejemplo, (West et al. 2005) y (Al-Qadi et al. 2008) observaron una disminución de la resistencia de la unión con un aumento de la temperatura. Se puede inferir que las muestras preparadas en el laboratorio sobreestimaron extremadamente la resistencia al corte de la interfaz. (Mohammd, et al 2010), por esta razón es necesario magnificar y llevar este tipo de investigaciones a escala real para conocer el comportamiento en campo.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo de grado se enfocó a evaluar, mediante trabajo de investigación desarrollado en el laboratorio, la adherencia geosintético – mezcla asfáltica mediante la realización del ensayo Leutner variando la aplicación del ligante asfáltico y analizando el comportamiento de dos tipos de geomallas:

- El comportamiento en el laboratorio y análisis cuantitativamente demuestran que la permeabilidad de la geomalla 2, facilita que el asfalto pase por las fibras de la malla y sea embebido en la geomalla, de esta forma toca las caras de las dos capas de mezcla asfáltica para adherirlas. En cuanto a la geomalla 1: el asfalto pasa con dificultad por la malla de fibra de vidrio, material rígido que limita la adherencia de las capas, por esta razón se necesita mayor cantidad de ligante para poder conformar una carpeta asfáltica monolítica y que la geomalla 2 mejore su desempeño a cortante.
- La adherencia entre dos capas de mezcla asfáltica con geosintéticos a diferentes razones de riego de adherencia y un grupo de muestras patrón con 350 g/m^2 , fue evaluado mediante el ensayo de Leutner, se hizo el procesamiento de la información calculando la fuerza máxima aplicada, el desplazamiento máximo que alcanzó cada cuerpo de prueba, posteriormente, se calculó el esfuerzo cortante y módulo de reacción. Obteniendo que la muestra patrón tiene un mejor comportamiento a cortante porque la interface que genera el riego de adherencia es muy pequeño comparado con la interface que genera la geomalla 1 y la geomalla 2.
- No se puede definir el rango de dosificación óptimo de riego de liga para adicionar a los tipos de geomalla estudiados. La geomalla 1 y la geomalla 2 muestran comportamientos definidos con las diferentes condiciones de emulsión asfáltica adicionada, llegando cada una a dosificación óptima de 650 g/m^2 de asfalto residual para este estudio. En esta condición particularmente, se obtuvieron resultados de esfuerzo cortante máximo muy cercanos, dónde la geomalla 2 supera solo en un 2% el resultado obtenido con la geomalla 1.
- El módulo de reacción a cortante disminuye en un 50% drásticamente, al cambiar la condición de riego de liga de 250 g/m^2 a 350 g/m^2 , este comportamiento se atribuye en

gran parte al aumento de la superficie de falla, debido a que la interface está conformada por la geomalla y una película de ligante asfáltico que aumenta a razón de 100 g/m^2 , por esta razón incrementa su espesor y reduce la capacidad de reacción a cortante.

5.2. Recomendaciones para futuras investigaciones

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

- Importante sería dar continuidad a estas investigaciones evaluando el comportamiento de otro tipo de dosificaciones de asfalto residual y con otros geosintéticos a fin de determinar el comportamiento de estos materiales a la resistencia al corte.
- Partiendo de la información obtenida en esta investigación a nivel de laboratorio, se considera oportuno hacer un tramo de prueba a escala real para magnificar: el trabajo hecho en el laboratorio y elaborar el proceso constructivo idóneo para determinar el mejor mecanismo de construcción, asimismo, evaluar de manera real el comportamiento de la adherencia geomalla – mezcla asfáltica.
- La presente investigación se desarrolló con la aplicación de un riego de liga, teniendo en cuenta que varios fabricantes de geomallas recomiendan la instalación de dos riegos de liga, es viable analizar el comportamiento de la carpeta asfáltica y la geomalla con esta condición a nivel de laboratorio y escala real.
- Analizar la adherencia en los pavimentos asfálticos que necesitan ser rehabilitados con una sobrecarpeta, utilizando geomallas en la unión de la carpeta existente y la carpeta nivel a nivel de laboratorio y a escala real.
- En el mismo contexto se recomienda estudiar otro tipo de mezclas de asfalto: semidensas, gruesas y mezclas de alto modulo, debido a que los resultados expuestos en la presente investigación se ven influenciados por la calidad de materiales exclusivos para mezclas densas en caliente MDC – 19.

- Evaluar la adherencia en mezcla asfáltica – geomalla, con emulsiones asfálticas modificadas, dónde la propiedad potencializada sea la viscosidad, para determinar el comportamiento de los materiales al esfuerzo cortante.
- Elaborar una ecuación para determinar la cantidad de ligante que puede absorber una geomalla, determinar los coeficientes para cada tipo de material y engranar con el ensayo de macrotectura, para determinar con claridad la cantidad ligante asfáltico a utilizar como riego de liga.
- Desarrollar el mismo estudio con otros tipos de geomallas, variación de temperaturas de rotura de cuerpos de prueba y aplicar riegos de liga cercanos a la tasa de absorción de cada geosintético.

6. Referencias bibliográficas

- Aguiar, L., Elizondo, J., Torres, F., & Loria, N. (2017). *Evaluación de la adhesión de emulsiones asfálticas utilizadas en riegos de liga para pavimentos asfálticos*. Medellín.
- Alcaldía de Pasto. (s.f.). *Información General - Pasto - Nariño - Colombia*. Obtenido de <http://www.pasto.gov.co/>.
- Álvarez-Calisto, C.F. 2007, *Experimental study of bond strength between layers in the hot asphalt layers*. [Estudio experimental de la resistencia de la adherencia entre capas en la construcción de carpetas asfálticas en caliente.], Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil.
- Al-Qadi, L., Carpenter, S. H., Leng, Z. & Ozar, H. (2008). *Interface Bonding between Hot-Mix Asphalt and various Portland Cement Concrete Surfaces: Laboratory Assessment*. *Journal of the Transportation Research Board*, p 46-53.
- Amrithalingam, V., Karpurapu, R. & Sudarsanan, N. (2018). *An investigation on the interface bond strength of geosynthetic reinforced asphalt concrete using Leutner shear test*. *Construction and Building Materials* 186, p 423–437.
- D'Andrea, A., Tozzo, C. (2012). *Interlayer shear failure evolution with different test equipments*. Elsevier. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 53: p 556–567.
- Aravena, M. (2007). *Desarrollo de emulsión termoadherente*. Tesis de Pregrado Universidad de Chile. Santiago de Chile. Chile. Tesis con embargo temporal según petición del autor (disponible en mayo 2019).
- Asce, S. M., Asce, M., Bueno, B. S., & Correia, N. S., (2014). *Behavior of Impregnated Paving Geotextiles: Study of Optimum Tack Coat Rate*. American Society of Civil Engineers. *J Mater. Civ. Eng.* 26.
- ASTM International. (2012). *ASTM E867-06(2012) Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/E0867-06R12>.
- ASTM International. (2015). *ASTM D4402/D4402M-15 Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. Obtenido de https://doi.org/10.1520/D4402_D4402M-15

- ASTM International. (2015). *ASTM D907-15 Standard Terminology of Adhesives*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D0907-15>
- ASTM International. (2016). *ASTM D4052-16 Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D4052-16>
- ASTM International. (2016). *ASTM D92-16b Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D0092-16B>
- ASTM International. (2017). *ASTM D8-17 Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D0008-17>.
- Bae, A., Button, J., Elseifi, M. A., Mohammad, L. N., Patel, N., & Scherocman, J. A. (2012). *Optimization of Tack Coat for HMA Placement*. NCHRP Report 712, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., EE.UU.
- Baker, T., Nam, K., Papagiannakis, T., Pierce, L., Tashman, L., & Willoughby, K. (2008). *Evaluation of construction practices that influence the bond strength at the interface between pavement layers*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 22, No. 3: 154–161.
- Bernucci, L.L.B., da Motta, L.M.G., Ceratti, J.A.P. & Soares, J.B. 2007, *Asphalt paving: basic formation for engineers*. [Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.], 1st edn, Petrobrás, Rio de Janeiro (Brasil).
- Bustos, G., Pérez, E. (2004). *General Technical Specification for Road and Bridge Works (PG-3)*. Article 531: Tack coats. [Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Orden circular 531: Riegos de adherencia], Madrid.
- Castro, D., Movilla, D., Raposeiras, A. C. (2014). *Optimización de adhesividad y la adherencia en mezclas bituminosas en función de la naturaleza del filler y la dotación de riego utilizada*. *Plataforma Tecnológica Española de la carretera*. Cuadernos Tecnológicos de la PTC, No. 1.
- Canestrari, F., Ferrotti, G., Parl, M. N. & Santagata E. (2005). *Advanced testing and characterization of interlayer shear resistance*. *Transp Res Rec No. 1929*, p 69 - 78.

- 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.*
- Cepeda, L. (2011). Valoración de la adherencia en intercapas mediante uso de geosintéticos como sistema retardador de fisura refleja. Tesis Becarios de Investigación. Universidad de Buenos Aires. LEMaC Centro de Investigaciones viales. Argentina. “Soluciones tecnológicas asociadas al uso de geosintéticos en la obra vial” Código UTN: CCINLP-*
- Cepeda, L., Delbono, H. L., Fensel, E. A. (2016). Estudio de adherencia entre capa de pavimentos, interponiendo geosintéticos. Métodos y materiales. Universidad de Costa Rica. Lanamme UCR, volumen 6, número 1. ISSN impreso: 2215-342X. ISSN electrónico: 2215-4558, 9829: 49 – 54.*
- Cepeda, L., Delbono, H. L., Fensel, E. A. (2016). Estudio de adherencia entre capa de pavimentos, interponiendo geosintéticos. Métodos y materiales. Universidad de Costa Rica. Lanamme UCR, volumen 6, número 1. ISSN impreso: 2215-342X. ISSN electrónico: 2215-4558, 9.*
- Chaignon, F., & Roffe, J. (2001). Characterization Tests on Bond Coats: Worldwide Study, Impact Tests, Recommendations. Toronto: Canadian Technical Asphalt Association. tomado de <https://trid.trb.org/view/681964>.*
- Collop, A., Thom, N., & Sangiorgi, C. (2003). Assessment of bond condition using the Leutner shear test, Journals Departament, Institution of Civil Engineers, Transport 156 Issue TR4: 211–217.*
- Collop, A. C., Sutanto, M. H., Airey G. D. Elliott R. C. (2009). Shear bond strength between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores. Construction and Building Materials, 23: p 2251 – 2258.*
- Del Campo, J. (1983). Cold bituminous pavements [Pavimentos bituminosos en frío]. Barcelona (España): Editores Técnicos Asociados S.A. 411 p.*
- Dorado, G. A. & Rosero, L. C. (2018). Efecto de la tasa de aplicación y el tipo de ligante en la adherencia de capas asfálticas evaluadas por medio del ensayo LCB. Trabajo de grado de Maestría, Universidad del Cauca, Popayán. 62 p.*
- Ferre, P. (2005). Las emulsiones de betún. Su química-física. Madrid: 1st edn, Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas.*

- Flintsch, G., de León, E., McGhee, K., & Al-Qadi, I. (2003). *Pavement surface macrotexture measurement and applications*. *Journal of the Transportation Research Board*, p 168-177.
- Fonseca, L. L. (2015). *Avaliação em laboratório do comportamento de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos*. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte Brazil. 162 p.
- Fuentes, L., Gunaratne, M., & Hess, D. (2010). *Evaluation of the effect of pavement*. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 136, p 640-653.
- Fumado, J. (1995). *The new technique of the simultaneous application of tack coat and the asphalt layer spreading using the "Vogele"*. V Jornadas de conservación de carreteras. Los contratos de conservación.
- Gordillo, J. 1997. *Microasphalt hot concrete: Evolution, types, characteristics and fields*. Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera, No. 91.
- Guerrero, S. (2015). *Buenas practicas constructivas en la aplicacion de riego de liga para la colocacion de sobrecapas asfalticas*. San Jose Costa Rica.
- Guimarães, P.A. (2013). *Estudo da aderência entre camadas asfálticas de pavimentos*. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. Brazil, 189 p.
- Hachiya, Y., & Sato, k. (1997). *Effect of tack coat on bonding characteristics at interface between asphalt concrete layers*. *Proceedings of the 8th international conference on asphalt pavements*, p 349-362.
- Higuera, C. H., (2009). *Nociones sobre metodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras – Volumen 1*. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. Facultad de ingeniería. Escuela de transporte y vías. Tunja. Colombia, p 290.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Kentucky: Pearson Prentice Hall.
- IDEAM. (2014). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/>
- Instituto Nacional de Vías. (1998). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito*.

- Instituto Nacional de Vías. (2013). Art. 411-13 Suministro de emulsión asfáltica. En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Art. 415-13 Suministro de emulsión asfáltica modificada con polímeros. En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Art. 421-13 Riego de liga. En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Art. 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico). En Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-125-13 Determinación del límite líquido de los suelos. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-126-13 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-133-13 Equivalente de arena de suelos y agregados finos. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-213-13 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-218-13 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de Los Angeles. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-220-13 Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-222-13 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-223-13 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-224-13 Determinación del valor del 10% de finos. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-227-13 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-235-13 Valor de azul de metileno en agregados finos. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-237-13 Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-238-13 Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-239-13 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría). En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-240-13 Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-702-13 Ductilidad de los materiales asfálticos. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-706-13 Penetración de los materiales bituminosos. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.

- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-712-13 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola). En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-713-13 Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-720-13 Efecto del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-761-13 Contenido de agua en una emulsión asfáltica. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-762-13 Destilación de emulsiones asfálticas. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-763-13 Viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-764-13 Sedimentación y estabilidad de las emulsiones asfálticas durante el almacenamiento. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-765-13 Tamizado de las emulsiones asfálticas. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-768-13 pH de las emulsiones asfálticas. En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-774-13 Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (Método Riedel-Weber). En Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá D.C.*
- Instituto Nacional de Vías, Universidad Nacional de Colombia. (2006). Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Bogotá D.C.*

- Khweir, K., & Fordyce, D. (2002). Influence of layer bonding on the prediction of pavement life. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, 156, 73-83.*
- Kraemer, C., Pardillo, J., Rocci, S., Romana, M., Sánchez-Blanco, V., & del Val, M. (2004). Roads engineering [Ingeniería de carreteras]. McGraw-Hill.*
- Kuennen, T. (5 de Diciembre de 2016). A tack for the battle. Obtenido de Roads & Bridges: <https://www.roadsbridges.com/tack-battle>*
- Leng, Z., Ozar, H., Al-Qadi, L., & Carpenter, S. H. (2008). Interface Bonding between Hot-Mix Asphalt and various Portland Cement Concrete Surfaces: Laboratory Assessment. Journal of the Transportation Research Board, págs. 46-53.*
- Leutner, R. Investigation of the adhesion of bituminous pavements, Bitumen, 1979.*
- Manual of contract documents for Highway Works Volume 2 Notes For Guidance on the Specification for Highway Works, SERIES NG 900 Road Pavements – Bituminous Bound Materials. NG 954 Method for Laboratory Determination of Interface Properties Using the Modified Leutner Shear Test. Inglaterra 2018.*
- Martínez, A. A, Ossa, A, (2012). Evaluación de la malla de fibra de vidrio como refuerzo en pavimentos. Obtenido de <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/5616>.*
- Miró, R., Martínez, A., & Pérez, F. (2005). Assessing heat-adhesive emulsions for tack coats. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, 158, págs. 45-51.*
- Mohammad, L. Z. (s.f.) (2005). Investigation of the Behaviour of Asphalt Tack Coat Interface Layer. Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge. LTRC Project No. 00-2B: 110 - 123.*
- Mohammad, L. N., Elseifi, M. A., Bae, A., Patel, N., Button, J., & Scherocman, J. A. (2012). Optimization of Tack Coat for HMA Placement. NCHRP Report 712, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., EE.UU.*
- Moore, J., West, R. C. & Zhang, J. (2005). Evaluation of Bond Strength Between Pavement Layers. NCAT Report 05-08, National Center for Asphalt Technology, Auburn, EE.UU.*

- Moseley, H., Musselman, J., Page, G., Upshaw, P., & Sholar, G. (2004). *Preliminary investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats. Journal of the association of Asphalt Paving Technologists.*
- Muslich, H. S.(2009). *Assessment of bond between asphalt layers. Tese de Doutorado, Departament of Civil Engineering. The University of Nottingham. Nottingham. United Kingdom, 293 p.*
- Ogundipe, O. (2013). *Evaluation of the overlay-stress absorbing membrane interlayer (sami) interface using leutner shear test. Journal of Applied Sciences Research, 9(8): 4482 - 44*
- Papagiannakas, L., Willoughby, K., Pierre, V., & Baker, T. (2008). *"Evaluation of Construction Practices that Influere the Bond Strength at the Interface between Pavenrnt Layers. Lournal of performance of constructed Facilities, Vol. 22, N° 3, 154-161.*
- Raab, C. & Partl, M.N. (2004). *Interlayer shear performance: experience with different pavement structures. 3rd Eurasphalt Eurobitume Congress Vienna, (1) 535 – 545.*
- Raposeiras, A. C., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., & Rodriguez-Hernandez, J. (2013). *Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers. Construction and Building Materials, págs. 372-381.*
- Reyes, F., & Rondon, H. (2015). *Pavimentos. materiales, construccion y diseño . Ecoe Ediciones. Bogotá D. C, 608 p.*
- Ricci, L.(2011). *Evaluación de la adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético. Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. LEMaC Centro de Investigaciones viales. La Plata. Argentina, 196 p.*
- Roque, R., Hernando, D., Park, B., Zou, J., & Waisome, J. (2017). *Evaluation of Asphalt Pavement Interface Conditions for Enhanced Bond Performance. Final Report, Florida Department of Transportation, Research Center, Tallahassee.*
- Sánchez, F., & Campagnoli, S. X. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras: guía práctica para los estudios y diseños. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.*
- Sholar, G., Page, G., Musselman, J., Upshaw, P., & Moseley, H. (2004). *Preliminary investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats. Journal of the association of Asphalt Paving Technologists.*

- Soto, J.A. 2006, *Service Life. Need of rehabilitacion with innovative solutions.* [“Vida Util”. *Necesidad de rehabilitación con soluciones innovadoras.*], CEPSA PROAS, vol. 1.
- Tashman, L., Nam, K., & Papagiannakis, T. (2006). *Evaluation of the Influence of Tack Coat Construction Factors on the Bond Strength Between Pavement Layers.* WCAT Report 06-002, Washington Center for Asphalt Technology.
- Ullidtz, P. (1998). *Modelling Flexible Pavement Response and Performance.* Lyngby: Polyteknisk Forlag.
- Vargas, P.(2008). *Estudio experimental de soluciones de construcción para asegurar la adherencia entre capas asfálticas. Tesis de Pregrado. Universidad de Chile.*Santiago de Chile. Chile, 95 p.
- Walubita , L., Nyamuhokya , T., Komba, J., Tanvir, H., Souliman, M., & Naik, B. (1 de 11 de 2018). *Evaluación comparativa de la resistencia al cizallamiento entre capas de los refuerzos de geomallas en el asfalto de mezcla en caliente.* Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.035>
- Wang, F., Long, J., Shen, B., & Ling, H. (2014). *A Study of the Regenerating Effects of Recycling Agents on Aged Asphalts.* *Petroleum Science and Technology.*
- Wang, J., Xiao, F., Chen, Z., Li, X., & Amirkhanian, S. (2017). *Application of tack coat in pavement engineering.* *Construction and Building Materials*, 856-871.
- West, R. C., Zhang, J., & Moore, J. (2005). *Evaluation of Bond Strength Between Pavement Layers.* NCAT Report 05-08, National Center for Asphalt Technology, Auburn, EE.UU.
- Wheat, M. (2007). *Evaluation of Bond Strength at Asphalt Interfaces. A Report, Kansas State University, Department of Civil Engineering, Manhattan, EE.UU.*
- Wikivia. (2012). *Riego de adherencia (construccion).* Obtenido de http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Riego_de_adherencia_%28construccion%29
- Wu, S., Chen, H., Zhang, J., & Zhang, Z. (2017). *Effects of interlayer bonding conditions between semi-rigid base layer and asphalt layer on mechanical responses of asphalt pavement structure.* *International Journal of Pavement Research and Technology*, 274-281.

- Zamora-Barraza, D., Calzada-Peréz, M., Castro-Fresno, D. & Vega-Zamanillo, A. (2010). New procedure for measuring adherence between a geosynthetic material and a bituminous mixture. Geotextiles and Geomembranes, 28(5): 483–489.*
- Zhang, W. (2017). Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: A state-of-the-art review based on application in the United States. International Journal of Pavement Research and Technology, 434-445.*

Anexos

Anexo A. Resultados de ensayos del asfalto (Fuente Refinería Barrancabermeja).



GERENCIA REFINERÍA BARRANCABERMEJA
DEPARTAMENTO DE MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS
CERTIFICADO DE CALIDAD

22/05/2018 09:34:49 a.m.

Producto: ASFALTO 60/70
 Número de muestra: 204.817.907
 Fecha de Vo.Bo: 22-05-2018 5:28:14
 Almacenamiento: K0206

Vo Bo: SI

ANALISIS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACION	METODO
CURVA REOLOGICA				
VISCOSIDAD A 60 C	cP	286000	REPORTAR	ASTM D 4402 VISC. CENTIP.(CURVA REOLOG)
VISCOSIDAD A 80 C	cP	22430	REPORTAR	ASTM D 4402 VISC. CENTIP.(CURVA REOLOG)
VISCOSIDAD A 100 C	cP	3742	REPORTAR	ASTM D 4402 VISC. CENTIP.(CURVA REOLOG)
VISCOSIDAD A 135 C	cP	356.6	REPORTAR	ASTM D 4402 VISC. CENTIP.(CURVA REOLOG)
VISCOSIDAD A 150 C	cP	177.4	REPORTAR	ASTM D 4402 VISC. CENTIP.(CURVA REOLOG)
DUCTILIDAD (25°C, 5cm/min)	cm	140	100 MINIMO	ASTM D 113
GRAVEDAD API/GRAVEDAD ESPECIF. EN CRUDOS				
GRAVEDAD API	Grados API	6.6	REPORTAR	ASTM D 4052-11 DENSIDAD-DENSI. DIGITAL
DENSIDAD A 15 °C	kg/m3	1024.0	REPORTAR	ASTM D 4052-11 DENSIDAD-DENSI. DIGITAL
PENETRACION A 25°C, 100g, 5s	mm/10	61	60 MINIMO - 70 MAXIMO	ASFALTO VENTAS
INDICE DE PENETRACION	N/A	-8	REPORTAR	CALCULADO
PERDIDA DE MASA	g/100g	0.243	1.0 MAXIMO	ASFALTO VENTAS
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°C	49.7	45 MINIMO - 55 MAXIMO	ASFALTO VENTAS
PUNTO DE INFLAMACION	°C	290	232 MINIMO	ASTM D 92-12B PUNTO INFLA COPA ABIE. CLE
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	%	99.9	99.0 MINIMO	ASFALTO VENTAS
VISTO BUENO TANQUES				
VoBo	N/A	SI	REPORTAR	VISTO BUENO
COMENTARIO	N/A	NINGUNO	REPORTAR	VISTO BUENO

VoBo. Nombre:

Gonzalo Cala Gómez

NOTA: Si tiene alguna duda en cuanto al producto favor comunicarse con la Gerencia de Comercialización:
 * COORDINACIÓN DE COMERCIALIZACION BARRANCABERMEJA: (097620) 9900/9907 FAX (097620) 9971 Refinería ECOPEPETROL
 * COORDINACIÓN DE PETROQUIMICOS E INDUSTRIALES BOGOTÁ: (091234) 5001/5091/5668/4670/5671/5666 FAX. (091231) 5565/5538 Calle 37 No. 7-43 Piso 8.
 * COORDINACIÓN DE COMBUSTIBLES BOGOTÁ: (091234) 5001/5091/5667/5491. FAX (091231) 5565/5538. Calle 37 N.O. 7-43 Piso 8.
 Para tramitar un reclamo se requiere comunicación escrita informando producto, No. de Factura y Objeto del Reclamo. además muestra del producto (Líquidos un galón, Sólidos 3 Kilos). Para el Polietileno adicionar el número de lote.



GERENCIA REFINERÍA BARRANCABERMEJA
 DEPARTAMENTO DE MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS
 CERTIFICADO DE CALIDAD

22/05/2018 09:34:49 a.m.

Producto: ASFALTO 60/70
 Número de muestra: 204.817.907
 Fecha de Vo.Bo: 22-05-2018 5:28:14
 Almacenamiento: K0206

Vo Bo: SI

ANALISIS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACION	METODO												
<div data-bbox="516 569 1182 919" data-label="Figure"> <table border="1"> <caption>Curva Reológica Data</caption> <thead> <tr> <th>Temperatura [°C]</th> <th>Viscosidad [cP]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>60</td> <td>286,000</td> </tr> <tr> <td>80</td> <td>22,430</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>3,742</td> </tr> <tr> <td>135</td> <td>356</td> </tr> <tr> <td>150</td> <td>177</td> </tr> </tbody> </table> </div>					Temperatura [°C]	Viscosidad [cP]	60	286,000	80	22,430	100	3,742	135	356	150	177
Temperatura [°C]	Viscosidad [cP]															
60	286,000															
80	22,430															
100	3,742															
135	356															
150	177															
N/A. No Aplica																
Comentario: NINGUNO																

VoBo. Nombre:

Gonzalo Caia Gómez

NOTA: Si tiene alguna duda en cuanto al producto favor comunicarse con la Gerencia de Comercialización:
 * COORDINACIÓN DE COMERCIALIZACION BARRANCABERMEJA: (097620) 9900/9907 FAX (097620) 9071 Refineria ECOPETROL
 * COORDINACIÓN DE PETROQUIMICOS E INDUSTRIALES BOGOTA: (091234) 5001/5091/5668/4670/5671/5666 FAX. (091231) 5565/5538 Calle 37 No. 7-43 Piso 8.
 * COORDINACIÓN DE COMBUSTIBLES BOGOTA: (091234) 5001/5091/5667/5491. FAX (091231) 5565/5538, Calle 37 N.O. 7-43 Piso 8.
 Para tramitar un reclamo se requiere comunicación escrita informando producto, No. de Factura y Objeto del Reclamo, además muestra del producto (Líquidos un galón, Sólidos 3 Kilos). Para el Polietileno adicionar el número de lote.

Anexo B. Resultados de ensayos de la emulsión asfáltica. (Fuente humberto quintero hq).



CERTIFICADO DE CALIDAD		
Código: DG-GAC-22	Versión: 00	Fecha: 15/04/2016

CLIENTE: HUMBERTO QUINTERO O Y CIA SCA
PRODUCTO: Emulsión Asfáltica CRL-1
FECHA: MAYO 12 de 2018
LOTE: HQPT0518-EL-01
PLACA: ZAP 901
Q-9081-05-18

ESPECIFICACIÓN INVIAS ART. 411, TABLA 411-1					
CARACTERÍSTICA	UNIDADES	NORMA ENSAYOS	CRL - 1		Resultado
			Min.	Máx.	
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	s	E-763	20	200	20,40
Contenido de agua en volumen	%	E-761	-	43	38,75
Estabilidad en almacenamiento (24 horas), sedimentación a los 5 días.	%	E-764	-	1	0,43
				5	3,03
Destilación	%	E-762	57	-	61,31
Contenido de asfalto residual					
Contenido de disolventes					
Tamizado. Retenido tamiz No. 20	%	E-765	-	0,10	0,0299
pH		E-768	-	6	2,30
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE DESTILACIÓN					
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1mm	E-706	60	100	60,2
Ductilidad a 25°C	cm	E-702	40	-	>100
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	97,5	-	99,99

OBSERVACIONES: SE ENTREGA CONTRAMUESTRA DE ESTE PRODUCTO LA CUAL DEBE SER ABIERTA EN PRESENCIA DE UN FUNCIONARIO DE HUMBERTO QUINTERO O Y CIA SCA EN CASO DE ALGUN RECLAMO. CABE ACLARAR QUE DE DICHO PRODUCTO QUEDA UNA MUESTRA TESTIGO EN NUESTRAS INSTALACIONES Y SE CONSERVARA DURANTE UN PERIODO DE TRES(3) MESES, A PARTIR DE LA FECHA QUE ES EMITIDO ESTE CERTIFICADO.

EN CASO DE MANTENER ALMACENADAS LAS EMULSIONES YA SEA EN CANEGAS O TANQUES DE ALMACENAMIENTO, SE LE RECOMIENDA AGITACION O RECIRCULACION EN UN LAPSO DE TIEMPO DE NO MAYOR A 24 HORAS PARA EVITAR SEDIMENTACION DE LAS EMULSIONES

Ensayado por: 
 Firma: 
 Lab. De Control de Calidad

Autoriza: 
 Sello: **GERENCIA**
 Ing. Erick Daniel Calidonio
 Gerente Técnico

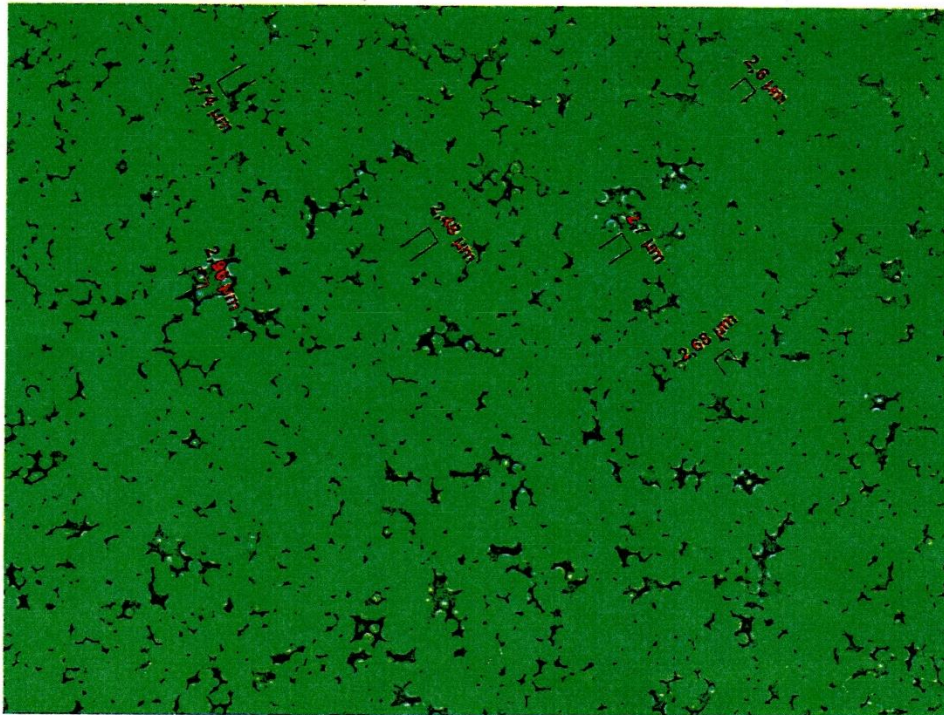


www.humbertoquintero.com

Sede Administrativa: Calle 8 No 38-80 Bodega 4 Menga, Yumbo, Valle del Cauca Teléfono: (57)(2) 664 00 19 Celular: 316 5279048- 316 5252290
Planta: km 30 vía Barrancabermeja-Bucaramanga Sector La Lizama. Celular: (57) 317 6363443 - (57) 315 611 8909



MUESTRA DE MICROSCOPIO



SC-CER518896



SA-CER516142



SV-CER521511




OS-CER516141



www.humbertoquintero.com

Sede Administrativa: Calle 8 No 38-80 Bodega 4 Menga, Yumbo, Valle del Cauca Teléfono: (57)(2) 664 00 19 Celular: 316 5279048- 316 5252290
Planta: km 30 vía Barrancabermeja-Bucaramanga Sector La Lizama. Celular: (57) 317 6363443 – (57) 315 611 8909

Anexo C. Ajuste granulométrico para mezcla asfáltica. (Fuente Universidad de Nariño).



AJUSTE GRANULOMÉTRICO PARA MEZCLA ASFALTICA

DESCRIPCIÓN MATERIAL: AGREGADOS MEZCLA DENSA EN CALIENTE MDC - 19

LOCALIZACIÓN MATERIAL: PILCUAN

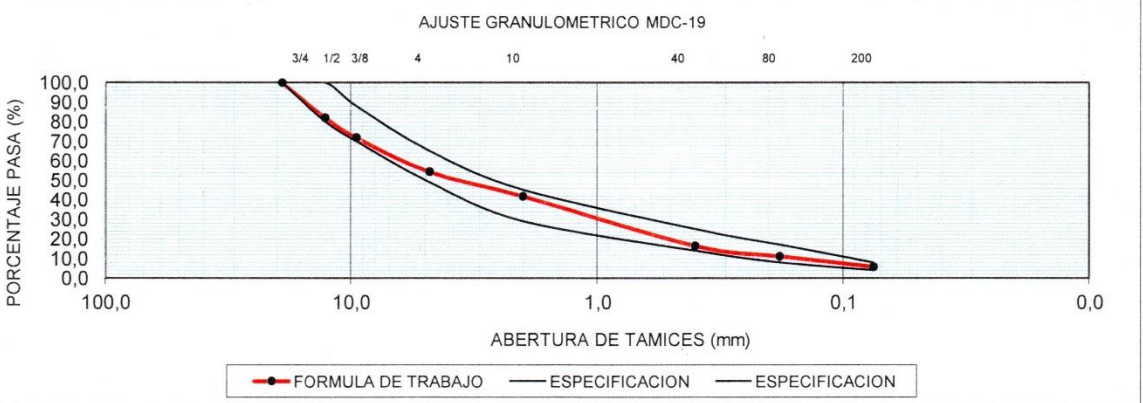
FUENTE DE MATERIALES: AGRESUR LTDA

FRACCIÓN : AGREGADO GRUESO FRACCIÓN : AGREGADO FINO FRACCIÓN : LLENANTE MINERAL

TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA	TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA	TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
3/4	0,0	0,0	100,0	3/4	0,0	0,0	100,0	3/4	0,0	0,0	100,0
1/2	11860,0	44,84	55,2	1/2	0,0	0,0	100,0	1/2	0,0	0,0	100,0
3/8	6647,0	25,13	30,0	3/8	5,0	0,18	99,82	3/8	0,0	0,0	100,0
No.4	5736,0	21,68	8,4	No.4	546,5	19,52	80,30	No.4	0,0	0,0	100,0
No.10	344,0	1,30	7,1	No.10	729,7	26,06	54,24	No.10	0,0	0,0	100,0
No.40	296,0	1,12	5,9	No.40	886,7	31,67	22,58	No.40	72,77	72,77	27,2
No.80	211,0	0,80	5,1	No.80	251,7	8,99	13,59	No.80	6,89	6,89	20,3
No.200	394,0	1,49	3,6	No.200	205,3	7,33	6,25	No.200	9,83	9,83	10,5
PASA 200	964,0	3,64		PASA 200	175,1	6,25		PASA 200	10,51	10,51	
	26452,0				2800,0				100,00		

TAMIZ	% AGREGADO GRUESO	% AGREGADO FINO	% RIO TELLEZ 3/4"	ABERTURA DE TAMICES (mm)	FORMULA DE TRABAJO	ESPECIFICACIÓN INVIAS 2013	
	40%	46%	14%				
3/4	40,0	46,0	14,0	19,1	100,0	100	100,0
1/2	22,1	46,0	14,0	12,7	82,1	80	100,0
3/8	12,0	45,9	14,0	9,5	71,9	70	88,0
No.4	3,3	36,9	14,0	4,8	54,3	49	65,0
No.10	2,8	25,0	14,0	2,0	41,8	29	45,0
No.40	2,4	10,4	3,8	0,40	16,6	14	25,0
No.80	2,1	6,2	2,8	0,18	11,2	8	17,0
No.200	1,5	2,9	1,5	0,075	5,8	4	8,0

AJUSTE GRANULOMETRICO MDC-19





● FORMULA DE TRABAJO — ESPECIFICACION — ESPECIFICACION

OBSERVACIONES

La granulometría se ajusta dentro de los parámetros exigidos en la especificación granulométrica para mezcla densa en caliente MDC 19 de gradación continua

Anexo E. Resultados de ensayos agregados pétreos. (Fuente Universidad de Nariño).

		UNIVERSIDAD DE NARIÑO SECCIÓN DE LABORATORIOS GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS INV E - 223				1.CODIGO	
						2.PAGINA	
						3.VERSIÓN	
						4.VIGENTE APARTIR DE:	
OBRA _____		MUESTRA No _____					
DESCRIPCIÓN: _____		FUENTE _____					
PROPIETARIO: _____							
ENSAYO No		1	2	3	Promedio		
Temperatura de ensayo	°C	-	-	-			
Peso de la muestra sss	Wsss	gr	1096,4	1284,4	920,4	1351,6	
Peso de la muestra en el agua	Wa	gr	708,9	820,7	590,7	873	
Peso de la muestra seca	Ws	gr	1084,3	1271,8	908,4	1336,7	
Ws - Wa		gr	375,4	451,1	317,7	463,7	
Wsss - Wa		gr	387,5	463,7	329,7	478,6	
Densidad Nominal	= Ws / Ws-Wa	gr/cm ³	2,888	2,819	2,859	2,883	2,856
Densidad Aparente	= Ws / Wsss - Wa	gr/cm ³	2,798	2,743	2,755	2,793	2,772
Densidad Aparente SSS	= Wsss / Wsss - Wa	gr/cm ³	2,829	2,770	2,792	2,824	2,804
Absorción	= (Wsss - Ws / Ws) * 100	%	1,116	0,991	1,387	1,115	1,152
Peso canastilla	gr	137	139,5	138,1	143		
peso canastilla + muestra sss	gr	1233,4	1423,9	1058,5	1494,6		
peso muestra sss	gr	1096,4	1284,4	920,4	1351,6		
peso canastilla + muestra en el agua	gr	757	868,8	638,8	921,1		
Peso canastilla en el agua	gr	48,1	48,1	48,1	48,1		
Peso muestra en el agua	gr	708,9	820,7	590,7	873		
Peso muestra seca + recipiente	gr	1221,3	1411,3	1046,5	1479,7		
Peso recipiente	gr	137	139,5	138,1	143		
Peso muestra seca	gr	1084,3	1271,8	908,4	1336,7		
Observaciones							
8. DATOS DE ELABORACIÓN							
	25.1. ELABORADO POR:	25.1. REVISADO POR:	25.2. APROBADO POR:				
CARGO:	Técnico Laboratorio de Suelos	Técnico Laboratorio de Suelos	Director de Dependencia				
NOMBRE:							
FIRMA:							

	UNIVERSIDAD DE NARIÑO			1.CODIGO		
	SECCIÓN DE LABORATORIOS			2.PAGINA		
	GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS			3.VERSIÓN		
	INV E - 222 -13			4.VIGENTE APARTIR DE:		
OBRA _____		MUESTRA No _____				
DESCRIPCIÓN: _____		FUENTE _____				
PROPIETARIO: _____						
ENSAYO No						
Temperatura de ensayo	°C	1	2	3	Promedio	
Peso de la muestra sss	Wsss	gr	250	250		250
Peso matraz + agua	Wma	gr	649,8	646,5		653,2
Peso matraz + agua + muestra	Wmam	gr	811,3	807,9		814,8
Peso muestra seca	Ws	gr	248,7	248,2		249,2
Densidad Nominal = $Ws / Ws + Wma - Wmam$	gr/cm ³		2,852	2,859	2,845	2,8521
Densidad Aparente = $Ws / Wsss + Wma - Wmam$	gr/cm ³		2,810	2,801	2,819	2,8102
Densidad Aparente SSS = $Wsss / Wsss + Wma - Wmam$	gr/cm ³		2,825	2,822	2,828	2,8249
Absorción = $(Wsss - Ws / Ws) * 100$	%		0,523	0,725	0,321	0,5230
Peso muestra seca + recipiente	gr		392,8	391,8	393,9	Promedio
Peso recipiente	gr		144,1	143,6	144,7	
Peso muestra seca	gr		248,7	248,2	249,2	
Observaciones _____						
8. DATOS DE ELABORACIÓN						
	25.1. ELABORADO POR:		25.1. REVISADO POR:		25.2. APROBADO POR:	
CARGO:	Técnico Laboratorio de Suelos		Técnico Laboratorio de Suelos		Director de Dependencia	
NOMBRE:						
FIRMA:						

Anexo D. Fórmula de trabajo mezcla asfáltica. (Fuente Universidad de Nariño).

FÓRMULA DE TRABAJO PARA MEZCLA ASFALTICA - METODO MARSHALL No 1

FUENTE DE MATERIAL AGRESUR S.A.S.
Peso específico de Agregados: 2,854

MDC - 19 (INV-2013)

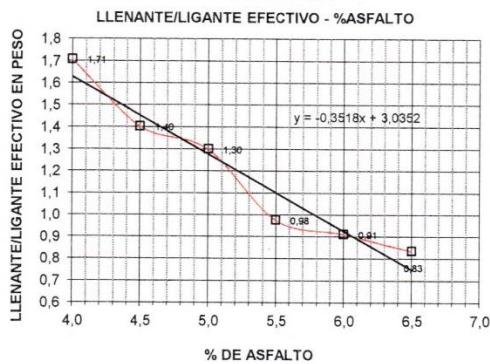
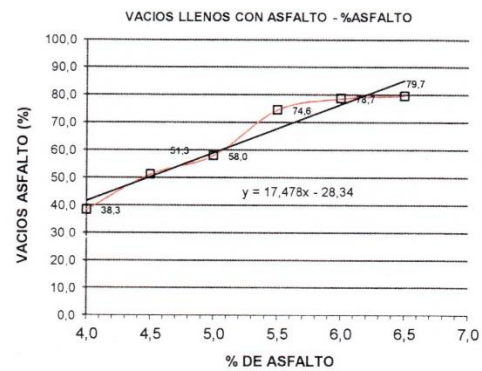
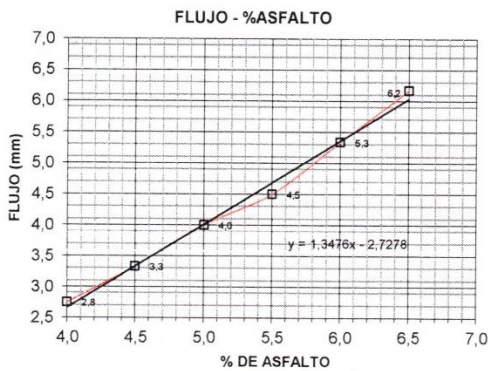
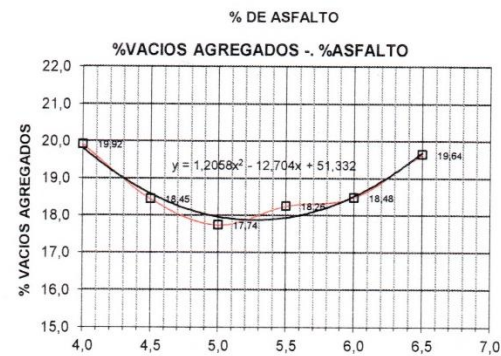
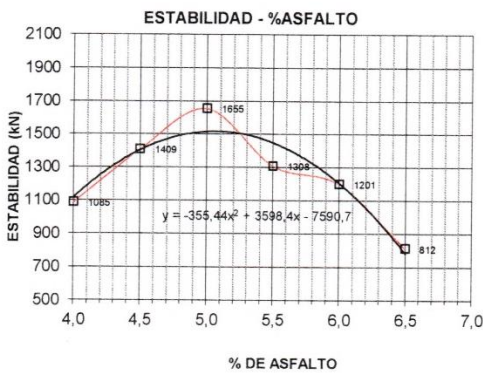
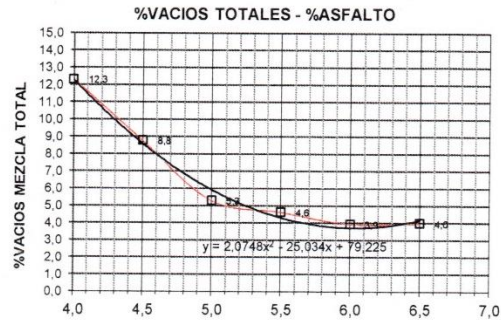
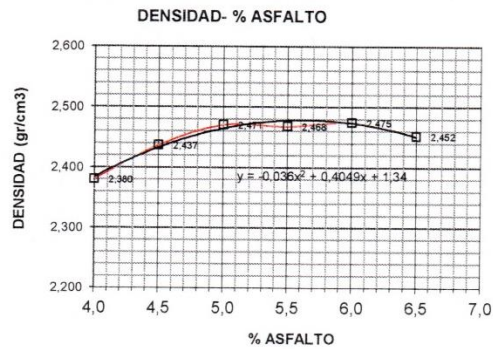
Peso específico del asfalto: 1,018

Muestra No.	% Asfalto	PESO EN GRAMOS			Volumen (cm ³)	Peso			Asfalto absorbido (%)	VOLUMEN % TOTAL				Vacíos en Agregados Minerales (%)	% de Asfalto Efectivo	Lienante/Ligante	ESTABILIDAD			Flujo (mm)
		Seca en aire (g)	SSS en aire (g)	En agua (g)		unitario "Bulk" (g/cm ³)	Máximo Teórico	Máximo Medido		Agregado	Vacíos llenos con asfalto	Vacíos con aire	Asfalto efectivo				Lectura Dial Carga (Lb)	Medida (kg)	Corregida (kg)	
a	b	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p		q	r	s		
						$g/(e-f)$			$(h-i)/(100-k)$	$(100-b)/(g-g_{agr})$		$(1-g)/100$	$100-k-i$	$100-o$	$b/(100-b)/100$					
1		1173,10	1176,30	691,90	484,4	2,422										2292,51	1039,86	1147	2,50	
2		1185,30	1193,60	703,30	490,3	2,417										2223,72	1008,66	1092	2,75	
3		1180,80	1186,10	673,10	513,0	2,302										2223,72	1008,66	1017	3,00	
PROMEDIO	4,0					2,380	2,662	2,715	0,77	80,1	38,3	12,3	7,6	19,92	3,26	1,71		1085	2,8	
4		1180,00	1184,10	685,30	498,8	2,366										2030,84	921,17	971	3,25	
5		1190,10	1190,40	713,70	476,7	2,497										3338,95	1514,52	1713	3,50	
6		1188,30	1190,30	704,90	485,4	2,448										3093,50	1403,19	1543	3,25	
PROMEDIO	4,5					2,437	2,639	2,671	0,47	81,6	51,3	8,8	9,7	18,45	3,95	1,40		1409	3,3	
7		1194,50	1195,30	715,50	479,8	2,490										3060,42	1388,18	1554	3,75	
8		1201,90	1202,50	761,70	440,8	2,727										3338,95	1514,52	1935	4,00	
9		1202,85	1205,80	658,10	547,7	2,196										3571,53	1620,02	1475	4,25	
PROMEDIO	5,0					2,471	2,618	2,609	-0,13	82,3	58,0	5,3	12,4	17,74	4,24	1,30		1655	4,0	
10		1191,60	1192,30	681,10	511,2	2,331										1892,37	858,36	870	4,25	
11		1203,70	1204,40	741,80	462,6	2,602										3177,55	1441,31	1708	5,00	
12		1197,60	1198,10	713,60	484,5	2,472										2689,51	1219,94	1345	4,25	
PROMEDIO	5,5					2,468	2,596	2,588	-0,12	81,7	74,6	4,6	13,6	18,26	5,62	0,98		1308	4,5	
13		1200,10	1201,00	719,00	482,0	2,490										2127,51	965,02	1073	5,25	
14		1206,90	1208,00	718,00	490,0	2,463										2520,23	1143,16	1238	5,75	
15		1197,10	1197,90	713,40	484,5	2,471										2580,25	1170,38	1290	5,00	
PROMEDIO	6,0					2,475	2,575	2,576	0,02	81,5	78,7	3,9	14,5	18,48	5,98	0,91		1201	5,3	
16		1191,80	1192,80	706,50	486,3	2,451										1530,89	694,40	761	5,50	
17		1193,20	1193,90	707,10	486,8	2,451										1675,66	760,07	832	6,25	
18		1196,50	1197,40	710,10	487,3	2,455										1697,91	770,16	842	6,75	
PROMEDIO	6,5					2,452	2,554	2,554	0,00	80,4	79,7	4,0	15,7	19,64	6,50	0,83		812	6,2	

Pasa No. 200: 5,80%

GRAFICAS PARA DETERMINACION DEL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO

MDC: 19 (INV-2013)



RESUMEN:

Contenido de Asfalto (%):
 Densidad (gr/cm³):
 Estabilidad (kN):
 Flujo (mm):
 Vacíos con aire (%):
 Vacíos de Agregados Minerales (%):
 Vacíos Llenos con asfalto (%):
 Relación Llenante-Ligante:
 Temperatura de compactación (°C):

Especificación

General
5,0%
2,471
1655
4,0
5,3
17,74
58,0
1,30
130