



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA

Programa de
Infraestructura
del Transporte

EVALUACIÓN DE LA ADHESIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS UTILIZADAS EN RIEGOS DE LIGA PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS **LM-PI-UMP-066-R1**

PREPARADO POR

Fabián Elizondo-Arrieta, Pablo Alberto Torres-
Linares, Ellen Rodríguez-Castro, José Pablo Aguiar-
Moya, Luis Guillermo Loría-Salazar



programa de infraestructura
del transporte

PITRA

San José, Costa Rica
Mayo, 2017

UMP

Unidad de
Materiales y Pavimentos

EVALUACIÓN DE LA ADHESIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS UTILIZADAS EN RIEGOS DE LIGA PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS LM-PI-UMP-066-R1

Elizondo-Arrieta, Fabián¹; Torres-Linares, Pablo Alberto²; Rodriguez-Castro, Ellen³; Aguiar-Moya, José Pablo⁴; Loría-Salazar, Luis Guillermo⁵

1. Subcoordinador General Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Lanamme UCR
2. Investigador, Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA-Lanamme UCR
3. Investigador, Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA-Lanamme UCR
4. Coordinador, Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA-Lanamme UCR
5. Coordinador General Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Lanamme UCR

Palabras Clave: Materiales, Pavimentos, Emulsión Asfáltica, Riego de Liga

Resumen: Se estimó experimentalmente la tasa de aplicación óptima de emulsión asfáltica a utilizar en los riegos de liga para pavimentos asfálticos, por medio de un ensayo de laboratorio a cortante que permitió determinar también la eficiencia del material utilizado para esta actividad. Adicionalmente mediante el ensayo de ABS se realizó una evaluación de los materiales a la tensión por lo que se demostró la efectividad de ellos y como ciertos modificantes como el búnker-C son perjudiciales para el desempeño del asfalto. Finalmente se proponen un rango de dosificación óptima para realizar esta actividad constructiva y los fundamentos necesarios para implementar otros materiales con mejores características para realizar este proceso constructivo.

Referencias

1. Aguiar, J. P., Loría, L. G., Delgado, J., Hajj, E., Villegas, E., Navas, y otros. (2015). EVALUACIÓN DE ADHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN COSTA RICA MEDIANTE ENSAYOS BBS Y DE ÁNGULO DE CONTACTO. San José.
2. Delgado, J. S. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01. 22: 047). Métodos y Materiales, 1(1).
3. West, R., Zhang, J., & Moore, J. (2005). Evaluation of bond strength between pavement layers. Auburn University, Alabama: National Center for Asphalt Technology,.
4. Uzan, J., Livneh, M., & Eshed, Y. (1978). Investigation of Adhesion Properties Between Asphalt Concrete Layers. *Asphalt Paving Technology* .
5. Asphalt Institute. (2005). *MS-19: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas*. Lexington: Asphalt Institute.

EVALUATION OF THE ADHESION OF ASPHALT EMULSIONS USED IN TACK COATS FOR ASPHALT PAVEMENTS **LM-PI-UMP-066-R1**

Elizondo-Arrieta, Fabián¹; Torres-Linares, Pablo Alberto²; Rodríguez-Castro, Ellen³; Aguiar-Moya, José Pablo⁴; Loría-Salazar, Luis Guillermo⁵

1. General Subcoordinator, Transport infrastructure Program (PITRA), Lanamme UCR
2. Researcher, Materials and Pavements Division, PITRA-Lanamme UCR
3. Researcher, Materials and Pavements Division, PITRA-Lanamme UCR
4. Coordinator, Materials and Pavements Division, PITRA-Lanamme UCR
5. General Coordinator, Transport infrastructure Program (PITRA), Lanamme UCR

Keywords: Materials, Pavements, Asphalt Emulsion, Tack Coats

Abstract: The optimum rate of application of asphalt emulsion to be used in tack coats for asphalt pavements was experimentally estimated by a laboratory test to shear stress that also allowed determining the efficiency of the material used for tack coats. In addition, an ABS test was carried out to evaluate the materials under tension stress, demonstrating their effectiveness and how certain modifiers such as bunker-C are harmful to the performance of the asphalt. Finally, we propose an optimum dosage range to perform this constructive step and the necessary fundamentals to implement other materials with better characteristics to perform this constructive process.

References

6. Aguiar-Moya, J. P., Leiva-Villacorta, F., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Rodríguez-Castro, E., & Loría-Salazar, L. G. (2014). Análisis físico-químico de adhesión asfalto - agregado en Aguiar, J. P., Loría, L. G., Delgado, J., Hajj, E., Villegas, E., Navas, y otros. (2015). EVALUACIÓN DE ADHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN COSTA RICA MEDIANTE ENSAYOS BBS Y DE ÁNGULO DE CONTACTO. San José.
7. Delgado, J. S. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01. 22: 047). Métodos y Materiales, 1(1).
8. West, R., Zhang, J., & Moore, J. (2005). Evaluation of bond strength between pavement layers. Auburn University, Alabama: National Center for Asphalt Technology,.
9. Uzan, J., Livneh, M., & Eshed, Y. (1978). Investigation of Adhesion Properties Between Asphalt Concrete Layers. Asphalt Paving Technology .
10. Asphalt Institute. (2005). MS-19: Manual Basico de Emulsiones Asfálticas. Lexington: Asphalt Institute.

Elizondo-Arrieta, F., Torres-Linares, P. A., Rodriguez-Castro, E., Aguiar-Moya, J. P., & Loria-Salazar, L. G. (2017). *Evaluación de la adhesión de emulsiones asfálticas utilizadas en riegos de liga para pavimentos Asfálticos LM-PI-UMP-066-R1*. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe: LM-PI-UMP-066-R1

EVALUACIÓN DE LA ADHESIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS UTILIZADAS EN RIEGOS DE LIGA PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Mayo, 2017

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-
LanammeUCR jose.aguiar@ucr.ac.cr



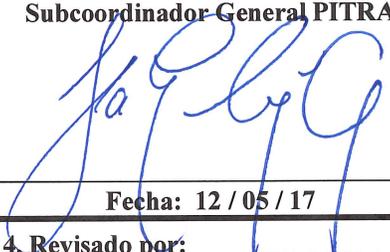
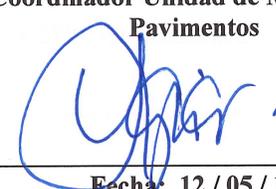
1. Informe LM-PI-UMP-066-R1		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: EVALUACIÓN DE LA ADHESIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS UTILIZADAS EN RIEGOS DE LIGA PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS		4. Fecha del Informe Mayo, 2017
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen <i>Se estimó experimentalmente la tasa de aplicación óptima de emulsión asfáltica a utilizar en los riegos de liga para pavimentos asfaltos, por medio de un ensayo de laboratorio a cortante que permitió determinar también la eficiencia del material utilizado para esta actividad. Adicionalmente mediante el ensayo de ABS se realizó una evaluación de los materiales a la tensión por lo que se demostró la efectividad de ellos y como ciertos modificantes como el búnker-C son perjudiciales para el desempeño del asfalto.. Finalmente se proponen un rango de dosificación óptima para realizar esta actividad constructiva y una opción viable para sustituir la emulsión que se utiliza actualmente y mejorar este proceso constructivo.</i>		
10. Palabras clave Investigación, materiales, pavimentos, Emulsión asfáltica, Riego de Liga	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 42
13. Preparado por:		
Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA. Subcoordinador General PITRA 	Ing. Pablo Alberto Torres Linares Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA 	Fecha: 12 / 05 / 17
14. Revisado por:		
Ing. Ellen Rodríguez Castro Jefe de Laboratorio de Ligantes Asfálticos 	Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos 	Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA 
Fecha: 12 / 05 / 17	Fecha: 12 / 05 / 17	Fecha: 12 / 05 / 17



TABLA DE CONTENIDO

1	MARCO CONCEPTUAL	6
1.1	INTRODUCCIÓN	6
1.2	OBJETIVO GENERAL	7
1.2.1	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</i>	<i>7</i>
1.3	MARCO TEÓRICO	7
1.3.1	<i>FACTORES QUE AFECTAN LA ADHERENCIA</i>	<i>8</i>
1.3.2	<i>EFFECTOS DEL RIEGO DE LIGA EN EL DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO.</i>	<i>11</i>
1.3.3	<i>ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE RIEGOS DE LIGA.....</i>	<i>12</i>
2	MÉTODOS Y RESULTADOS	14
2.1	MATERIALES	14
2.2	PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES DE LABORATORIO.....	15
2.3	ENSAYO PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE LOS RIEGOS DE LIGA	19
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	21
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	32
5	REFERENCIAS	34



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. EFECTO EN LA FATIGA COMO RESULTADO DEL CAMBIO EN LA ADHERENCIA DE LAS CAPAS DE MEZCLA ASFÁLTICA. FUENTE: (KING & MAY, 2003).. 11

FIGURA 2. MODOS DE FALLA EN LA INTERFAZ. 12

FIGURA 3.ILUSTRACIÓN DEL DISPOSITIVO PARA EVALUAR LA RESISTENCIA DE LOS RIEGOS DE LIGA DESARROLLADO POR EL NCAT(WEST, ZHANG, & MOORE, 2005)..... 19

FIGURA 4. CURVA DE TASA ÓPTIMA DE EMULSIÓN CRS-1 22

FIGURA 5 EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL RIEGO DE LIGA..... 26

FIGURA 6. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEXTURA EN LA RESISTENCIA DEL RIEGO DE LIGA..... 28

FIGURA 7.RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA MEDIANTE ENSAYO DE ABS PARA UNA TASA DE APLICACIÓN DE 1.89 L/M² 29

FIGURA 8. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA DE LAS TASAS DE APLICACIÓN..... 32



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TASAS DE APLICACIÓN DE RIEGOS DE LIGA. (OHIO DOT, 2001)	10
TABLA 2. VARIABLES EVALUADAS EN LA RESISTENCIA DE RIEGO DE LIGA	14
TABLA 3. RESIDUOS ASFÁLTICOS OBTENIDOS POR DESTILACIÓN Y DENSIDAD DE LA EMULSIÓN	15
TABLA 4. RESIDUOS ASFÁLTICOS OBTENIDOS A BAJA TEMPERATURA	15
TABLA 5. RESULTADOS PARA VALIDACIÓN DE TASAS DE APLICACIÓN.....	21
TABLA 6. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LAS TASAS DE APLICACIÓN PARA EMULSIÓN CRS-1	22
TABLA 7. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LAS TASAS DE APLICACIÓN	23
TABLA 8. RESISTENCIA DE LOS RIEGOS DE LIGA EVALUADOS.....	24
TABLA 9. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LOS DISTINTOS TIPOS DE MATERIALES PARA RIEGO DE LIGA.....	25
TABLA 10. ANÁLISIS DE TUKEY PARA LOS DISTINTOS TIPOS DE MATERIALES PARA RIEGO DE LIGA.....	25
TABLA 11. CUANTIFICACIÓN DE LA MACROTEXTURA DE LA MEZCLA UTILIZADA	26
TABLA 12. EVALUACIÓN DE LA TEXTURA EN EL DESEMPEÑO DE LOS RIEGOS DE LIGA	27
TABLA 13. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LAS TEXTURAS EVALUADAS.....	27
TABLA 14. ANÁLISIS DE TUKEY PARA LAS TEXTURAS EVALUADAS	28
TABLA 15. EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA MEDIANTE ABS	29
TABLA 16. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS RESULTADOS DE LA ADHESIÓN	30
TABLA 17. ANÁLISIS DE TUKEY DE LOS RESULTADOS DE LA ADHESIÓN.....	30



1 MARCO CONCEPTUAL

1.1 Introducción

El riego de liga es una aplicación de emulsión asfáltica entre las capas de mezcla asfáltica que componen el pavimento, lo cual hace que funcionen dichas capas monóticamente y se desempeñen de manera eficiente. Cuando la adherencia de los materiales utilizados para el riego de liga es deficiente producen en los pavimentos una disminución de la capacidad estructural, provocando fallas y deterioros (Van Dam, Kirchner, Shahin, & Blackmon, 1987) (Ziari & Khabiri, 2007).

Por ello es importante cuantificar la adherencia entre capas asfálticas de forma que se pueda definir claramente que materiales o condiciones pueden debilitar la unión entre capas y provocar fallas prematuras en el pavimento. Los factores que pueden influir en la adherencia son muchos, pero entre ellos se puede mencionar el tipo emulsión asfáltica como uno de los principales.

Por supuesto, las propiedades de la emulsión asfáltica corresponden a uno de los factores principales que afectan la adherencia. En Costa Rica se aplica el riego de liga con la emulsión CRS-1 (Emulsión Catiónica de rompimiento rápido). Esta investigación está enfocada en evaluar el desempeño de los materiales utilizados para riegos de liga, para ello se realizaron ensayos de laboratorio que permiten determinar la adhesión de estos materiales. En los resultados, se observa un desempeño deficiente en la emulsión CRS-1 producida actualmente por RECOPE; esta deficiencia según los resultados de laboratorio se debe a la adición de un aceite pesado derivado del petróleo denominado como Bunker-C que afecta negativamente el desempeño del asfalto residual.

En vista de esto y para cuantificar el efecto en la adherencia se plantea una metodología de ensayo que permita evaluar la adherencia de los materiales utilizados en los riegos de liga. El método propuesto permite determinar las tasas de aplicación óptimas y la eficiencia de los materiales utilizados para realizar los riegos de liga.



1.2 Objetivo general

Evaluar la adherencia y el desempeño entre las capas de mezcla asfáltica que componen el pavimento mediante ensayos de laboratorio a cortante y tensión.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Desarrollar e implementar una metodología para evaluar el desempeño de los riegos de liga entre las capas de mezcla asfáltica que componen el pavimento.
2. Evaluar la adhesividad de los materiales utilizados para los riegos de liga mediante el ensayo Asphalt Bond Strength (ABS).
3. Evaluar y definir el rango óptimo de aplicación de los riegos de liga en laboratorio.
4. Evaluar la adherencia que posee la emulsión CRS-1 producida por RECOPE utilizada para los riegos de liga.
5. Evaluar la eficiencia de distintos tipos de materiales que podrían ser utilizados para el riego de liga.

1.3 Marco Teórico

Las estructuras de pavimentos en la mayoría de los casos consisten en varias capas de materiales y sobre estas una o varias capas de mezcla asfáltica, requieren adherencia en la interfaz de las capas para que funcionen como una sola estructura y que afectan directamente el desempeño de esta como una sola estructura (Leng, Ozar, Al-Qadi, & Carpenter, 2008) .

En el diseño de pavimentos flexibles se asume que las capas en las interfaces están completamente adheridas incluyendo capas sucesivas de mezcla asfáltica. 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 (Patel, 2010).

Se ha determinado que una adherencia deficiente provoca la disminución de la capacidad estructural del pavimento, incidiendo en fallas y deterioros, (Van Dam, Kirchner, Shahin, & Blackmon, 1987) (Ziari & Khabiri, 2007). Problemas generalmente asociados a una falta de adherencia entre capas son agrietamiento prematuro por deslizamiento de la mezcla y agrietamiento de arriba hacia abajo (Tashman, 2008). Este tipo de deterioros pueden reducir la vida útil del pavimento de 7 a 8 años cuando el desempeño generalmente debe ser de 20 años. Una disminución del 10% de la resistencia del riego de liga puede causar un 50% de reducción de la vida útil del pavimento ante la fatiga (West, Zhang, & Moore, 2005). Estudios han demostrado que una reducción de la resistencia ante la fatiga debido a un desprendimiento de las capas del



pavimento puede ser drástica y necesitar reparaciones de mayor envergadura como bacheo completo o reconstrucción (Romanoschi & Metcalf, 2001).

Debido a esto, distintas entidades han desarrollado investigaciones para determinar las propiedades adhesivas en la interfaz usando mecanismos de corte, tensión y torsión (Canestrari, Ferrotti, Partl, & Santagata, 2005). Una de las primeras investigaciones se realizó en 1978 y consistió en medir la adhesión en la interfaz en especímenes de mezcla asfáltica en caliente compactados y elaborados con un asfalto clasificado por penetración 60-70. Se evaluaron distintas tasas de aplicación de emulsión, a saber 0,0, 0,49, 0,97, 1,46, y 1,94 l/m². Se utilizaron condiciones de 25 y 55 °C a una velocidad de desplazamiento de 2,5 mm/min. e induciendo una falla a cortante de los especímenes elaborados. Este estudio concluye que el riego de liga efectivamente mejoraba la resistencia a cortante en la interfaz de las capas. (Uzan, Livneh, & Eshed, 1978). Leutner diseñó (Leutner, 1979) un dispositivo donde especímenes cilíndricos eran colocados y fallados a esfuerzo cortante. La carga se aplica a la capa superior y la capa inferior se mantiene estática para producir un desplazamiento entre las capas. Muchos otros estudios posteriores se basaron en el dispositivo ideado por Leutner. En 1994 con el desarrollo del ASTRA (Ancona Shear Testing Research and Analysis) se permitió medir la resistencia de la interfaz valorando el tipo de riego de liga, la temperatura y una fuerza normal aplicada. Se demostró que conforme aumenta la fuerza normal, la resistencia al corte aumentaba para las temperaturas establecidas. (Santagata & Canestrari, 1994). En 1995 Tschegg et al. Desarrollaron un dispositivo para medir el comportamiento de la fractura mecánica de la adhesión entre capas de mezcla asfáltica. Basados en este ensayo surgieron modificaciones y mejoras como el propuesto por el ensayo de corte (Mohammad, Raqib, & Huang, 2002). El Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT por sus siglas en inglés) llevó a cabo un estudio en el 2005 (West, Zhang, & Moore, 2005) en el cual se propone un método para medir la adherencia entre capas de mezcla asfáltica ante una fuerza cortante.

1.3.1 Factores que afectan la adherencia

Es posible identificar los factores que afectan el desempeño de los riegos de liga en el pavimento. Los factores de mayor importancia se detallan a continuación.

Materiales para el riego de liga

La norma ASTM D8 “Standard Terminology Relating to Materials for Road and Pavements” define riego de liga como la aplicación de material bituminoso en una superficie relativamente no absorbente para proveer una completa unión entre una superficie vieja y una nueva. (Mohammad, Elseifi, Bae, Patel, Button, & Scherocman, 2012). Anteriormente se utilizaban asfaltos rebajados (asfaltos disueltos en derivados del



petróleo como queroseno y diésel) para los riegos de liga, sin embargo se han dejado de utilizar por los impactos ambientales que provocan. Actualmente se utilizan emulsiones asfálticas, las cuales son sustancias no inflamables, producto de la combinación de asfalto y agua en presencia de un agente emulsificante. (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 1996). Los tipos más comunes de emulsiones asfálticas que se utilizan en los riegos de liga son las emulsiones de rompimiento lento SS-1, SS-1h, CSS-1 y CSS-1h y emulsiones de rompimiento rápido RS-1,RS-2, CRS-1, CRS-2, CRS-2P(modificada con polímero) y CRS-2L (modificada con látex) (Mohammad, Elseifi, Bae, Patel, Button, & Scherocman, 2012).

En este punto, es importante definir algunos términos usuales en la aplicación de la técnica:

- *Emulsión original*: una emulsión de asfalto y agua que contiene una pequeña cantidad de un agente emulsificante, sin ningún tipo de modificación posterior al proceso de producción. Las emulsiones clasificadas como lentas tienen hasta 43% de agua y las rápidas hasta 35% de agua.
- *Emulsión Diluida*: Una emulsión original que ha sido diluida añadiendo una cantidad de agua igual o menor que el volumen total de emulsión original.
- *Contenido de asfalto residual*: Cantidad de asfalto remanente en la superficie del pavimento después que la emulsión ha roto y curado (i.e. que toda el agua se ha evaporado).
- *Rompimiento del riego de liga*: Es el proceso cuando el agua se separa de la emulsión. Se puede distinguir fácilmente porque el color cambia de café a negro.

Paul y Scherocman en el año 1998 encontraron que en la mayoría de los estados de Estados Unidos utilizan emulsiones SS-1, SS-1h, CSS-1 y CSS-1h, con la ventaja que este tipo de emulsiones pueden diluirse. Las emulsiones diluidas reportan mejores resultados porque estas proveen el volumen adicional que el distribuidor necesita para funcionar a una velocidad adecuada cuando requieren tasas de aplicación bajas. Adicionalmente, las emulsiones diluidas fluyen más fácilmente del distribuidor a temperatura ambiente, permitiendo una aplicación más uniforme (Asphalt Institute, 2005). Si bien es cierto, es posible diluir una emulsión de rompimiento lento, presentan la desventaja que con el agua añadida se altera el tiempo de rompimiento haciendo que tarden horas para que rompan o incluso días para que curen por completo. Adicionalmente, una sobrecapa ligada con una emulsión de rompimiento lento puede presentar un desprendimiento total o parcial de esta (delaminación) en los primeros años de vida (Unified Facilities Guide Specification, 2008).



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, Elseifi, Bae, Patel, Button, & Scherocman, 2012). El manual del pavimentación de mezcla asfáltica en caliente del año 2000 (USACE, 2000) especifica que la dosis asfalto residual debe estar entre (0,18y0,27)L/m². El límite inferior del rango de asfalto residual es recomendado para capas nuevas, el rango intermedio para superficies en condiciones normales con una condición superficial buena y el rango superior se debe aplicar para pavimentos asfálticos viejos, oxidados, fisurados o perfilados y para pavimentos de concreto hidráulico. Otro factor que se debe considerar en las tasas de aplicación es el tipo de mezcla, ya que mezclas abiertas requieren tasas más altas que aquellas que son densas. La mayoría de departamentos de transporte especifican sus propios rangos de tasas de aplicación. Como ejemplo se muestra una tabla típica de tasas especificadas en el estado de Ohio usando emulsiones de rompimiento lento (Ohio DOT, 2001).

Tabla 1. Tasas de aplicación de riegos de liga. (Ohio DOT, 2001)

Condición de pavimento	Tasa de aplicación (L/m ²)		
	Asfalto residual	Sin diluir	Diluida (1:1)
Mezcla asfáltica en caliente nueva	0,14 ~ 0,18	0,23 ~ 0,32	0,45 ~ 0,59
Mezcla asfáltica en caliente Oxidada	0,18 ~ 0,27	0,32 ~ 0,45	0,59 ~ 0,91
Superficie perfilada (MAC)	0,27 ~ 0,36	0,45 ~ 0,59	0,91 ~ 1,22
Superficie Perfilada (PCC)	0,27 ~ 0,36	0,45 ~ 0,59	0,91 ~ 1,22
Pavimento de Concreto	0,18 ~ 0,27	0,32 ~ 0,45	0,59 ~ 0,91

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 ha curado. En la mayoría de los casos una emulsión cura totalmente en un aproximado de una y dos horas (USACE, 2000), sin embargo la mayoría de autores difieren en cuanto al tiempo necesario que un riego de liga debe permanecer sin cubrir antes que sea colocada la capa subsiguiente (Mohammad, Elseifi, Bae, Patel, Button,



& Scherocman, 2012). La Federación Internacional de Emulsiones Bituminosas (IBEF, por sus siglas en inglés) 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). Muchos departamentos de transporte han especificado el tiempo de curado según su experiencia. Por ejemplo el Departamento de Transporte de Alaska establece un máximo de 2 horas para una emulsión CSS-1. Independientemente del tiempo que se tarde, una emulsión debe estar completamente curada antes que la mezcla nueva sea colocada sobre del riego de liga. Estudios de laboratorio concluyen que las resistencias más altas en la interfaz son alcanzadas cuando mayor es el tiempo de curado tanto en especímenes fabricados en laboratorio (Hachiya & Sato, 1997) como en núcleos extraídos en campo (Sholar, Page, Musselman, Upshaw, & Moseley, 2004).

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

Durante los últimos años se han realizado estudios para evaluar el efecto de la adhesión entre capas en el desempeño del pavimento utilizando modelos mecanicísticos. En el año 2004 se realizó un análisis evaluando el efecto de la adherencia entre capas de mezcla asfáltica utilizando el programa BISAR desarrollado por la empresa SHELL (King & May, 2003). Para el análisis, se consideraron condiciones con deslizamiento y sin deslizamiento en la interfaz entre las distintas capas de mezcla asfáltica. Los resultados obtenidos revelan un incremento en los esfuerzos y las deformaciones cuando la adherencia en la interfaz decae de 100% a un 90%. En la Figura 1 se muestra como resistencia a la fatiga decae en un 50% en cualquier combinación de carga, cuando la adherencia se reduce en un 10%.

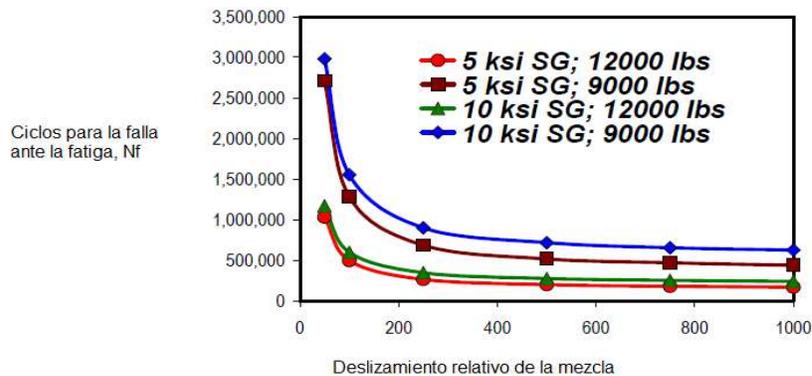


Figura 1. Efecto en la fatiga como resultado del cambio en la adherencia de las capas de mezcla asfáltica.

Fuente: (King & May, 2003)

1.3.3 Ensayos para la evaluación de riegos de liga

La falla en la interfaz bajo la carga del tráfico se puede atribuir a dos tipos de modos de falla, a tensión y a cortante (ver Figura 2). Por consiguiente, para evaluar la adherencia de los riegos de liga en laboratorio se utilizan ensayos a tensión y a cortante (Hachiya & Sato, 1997).

Sangiorgi et al. realizaron en 2002 investigaciones para evaluar las condiciones de adherencia utilizando el ensayo de corte Leutner, para ello usaron especímenes extraídos de bloques de mezcla compactados en laboratorio, utilizaron dos tipos distintos de superficie para simular las condiciones de adherencia entre capas de mezcla y entre una base y mezcla. Se evaluaron tres tipos de condiciones en la interfaz que se consideran comunes en el campo, una de riego de liga, la segunda contaminada con polvo y sin riego de liga y la última utilizando un riego de liga pero contaminada con una capa muy fina de polvo. Los resultados indicaron que la mejor adherencia se obtiene cuando existe un riego de liga de adherencia entre las capas de mezcla y la peor en la interfaz entre la base y la mezcla asfáltica.

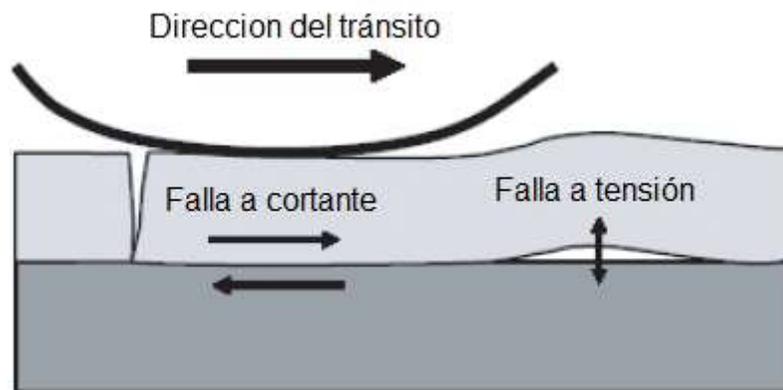


Figura 2. Modos de falla en la interfaz.
Fuente: (Raab & Partl, 2004)

En 1978, Uzan et al. realizaron un estudio en el cual evaluaron la adherencia entre capas de mezcla asfáltica, usando dos tipos de asfalto, dos temperaturas, cinco tasas de aplicación y cinco distintas presiones verticales. El estudio concluye que la resistencia al corte incrementa significativamente conforme la presión vertical aumentaba y disminuye conforme aumenta la temperatura. También se concluyó que al usar el óptimo de emulsión, la resistencia máxima varía con la temperatura de ensayo.

En el año 2005 el Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT, por sus siglas en inglés) llevó a cabo un estudio para desarrollar un nuevo método de ensayo para la evaluación de los riegos de liga. Los



resultados de este estudio se utilizaron para la selección del mejor material y tasa de aplicación para los riegos de liga. El proyecto incluyó etapas de evaluación en laboratorio y en campo. En el laboratorio se evaluaron dos tipos de emulsión asfáltica (CRS-2 y CSS-1) y un tipo de asfalto (PG-64-22), tres tasas de aplicación calculadas con base en el residuo asfáltico (0,02, 0,05 y 0,08 gal/yd²) y dos tipos de mezcla, una fina y una gruesa. La resistencia fue medida utilizando especímenes Superpave a tres temperaturas (10 °C, 25 °C y 60°C) y tres distintas presiones normales (0 psi, 10 psi y 20 psi).

De la etapa de laboratorio se concluyó que conforme la temperatura de ensayo aumenta, las resistencias disminuyen en todos los materiales utilizados para el riego. El asfalto PG 64-22 mostró el mejor desempeño que las dos emulsiones, especialmente para la mezcla fina evaluada a la mayor temperatura. Para las tasas de aplicación evaluadas, los riegos de liga con las tasas más bajas mostraron un mejor desempeño para las mezclas finas; en cambio para las mezclas gruesas el desempeño no varió significativamente en función de las tasas de aplicación. Finalmente, cuando los especímenes fueron evaluados a temperaturas altas, la resistencia del riego de liga aumentó cuando la fuerza normal se incrementó; sin embargo para las otras temperaturas, no se observó efecto en la resistencia del riego de liga al variar la fuerza normal aplicada (West, Zhang, & Moore, 2005).

Para la evaluación en campo se escogieron 7 proyectos para validar los resultados obtenidos en la fase de laboratorio, utilizando el mismo tipo de material para los riegos de liga. El riego de liga se colocó sobre superficies sin perfilar y perfiladas antes que la mezcla asfáltica hubiese sido colocada y compactada. De tres a cinco núcleos fueron obtenidos para cada sección y se evaluó la resistencia. Para los proyectos en los que se utilizó emulsión asfáltica, las tasas de aplicación utilizadas fueron de 0,03 gal/yd², 0,045 gal/yd² y 0,06 gal/yd². Para los proyectos en los que se utilizó asfalto como material para el riego de liga las tasas utilizadas fueron 0,03 gal/yd², 0,05 gal/yd² y 0,07 gal/yd².

Se utilizaron tres metodologías para la distribución del material de liga. La primera fue manual, la segunda utilizando un camión distribuidor con barras aspersoras y la tercera mediante un distribuidor Novachiptm. Los resultados reportaron que cuando la superficie es perfilada se obtiene un incremento significativo de la resistencia en la interfaz. No se obtuvo diferencia significativa entre el uso de asfalto y emulsión como material de riego y finalmente, que el sistema de aplicación que presentó un desempeño superior fue el equipo Novachip (West, Zhang, & Moore, 2005).



2 MÉTODOS Y RESULTADOS

Para la evaluación del desempeño de los riegos de liga se proponen dos ensayos, el primero basado en el ensayo del Departamento de Transporte de Alabama bajo el protocolo ALDOT-430 “Standard test method for determining the bond strength between layers of an asphalt pavement” y segundo el ensayo de adhesión a tracción mediante la norma AASHTO TP-91 “Method Of Test For Determining Asphalt Binder Bond Strength By Means Of The Asphalt Bond Strength (Abs) Test”. Las variables de interés para los materiales son la textura de la mezcla, el tipo de material asfáltico utilizado y la tasa de aplicación. En la siguiente tabla se resumen todos los parámetros evaluados:

Tabla 2. Variables evaluadas en la resistencia de riego de liga

Variable	Descripción
Mezcla	Se utilizó dos tipos de mezcla, una de TMN 12,5 mm producida por la planta de la empresa Hernán Solís en el plantel de Guápiles y la otra de TMN de 9,50 mm producida por la empresa Pavicen
Material para ligar	Se utilizaron 5 tipos de material: CRS-1 y CSS-1h producida por RECOPE; CRS-1h y CSS-1hL producida en el LanammeUCR y Asfalto AC-30
Dosificación	Para validar las dosificaciones se evaluaron: (0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75; 1,0; 1,25 y 1,50)L/m ² (de emulsión) y para evaluar la influencia del material y la textura: (0,25; 0,50; 0,75 y 1,0)L/m ²
Textura	Se evaluaron dos tipos de textura una gruesa y otra fina, según el TMN de las mezclas utilizadas
Presión normal	0 KPa
Temperatura de ensayo	25 °C

2.1 Materiales

Como se mencionó, se evaluaron dos tipos mezclas asfálticas producida en planta con TMN de 12,5 mm y 9,5 mm, con el objetivo de lograr una textura gruesa y fina respectivamente, y la homogeneidad que presenta la utilización de mezcla producida en planta. Como material para los riegos de liga se utilizaron las emulsiones CRS-1 y CSS-1h producida por la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) y las emulsiones producidas en el LanammeUCR las cuales son del tipo CRS-1h y CSS-1hL. Las emulsiones deben cumplir con las especificaciones establecidas en la normativa vigente (Reglamento Técnico Centroamericano). Las tasas de aplicación (Tabla 2) pretenden evaluar la influencia del material asfáltico y la textura. Para determinar las tasas de aplicación se midieron en el laboratorio la densidad de cada emulsión



(ASTM D 6937) y se obtuvo el residuo asfáltico mediante destilación (ASTM D6997). Los resultados se resumen a continuación.

Tabla 3. Residuos asfálticos obtenidos por destilación y densidad de la emulsión

	Residuo Asfáltico		Promedio (%)	Densidad (kg/m ³)
	1	2		
CRS-1 (RECOPE)	65,1	65,3	65	1008,495
CRS-1h (LANAMME)	64,9	64,8	65	1009,656
CSS-1h (RECOPE)	65,4	65,1	65	1010,265
CSS-1hL (LANAMME)	65,2	65,6	65	1015,698

Adicionalmente se obtuvieron los residuos asfálticos mediante evaporación a baja temperatura (ASTM D7497) para simular el rompimiento y curado natural que tienen las emulsiones en campo y con este se realizó el ensayo de adherencia del bitumen (ABS, por sus siglas en inglés). Los residuos obtenidos son los siguientes:

Tabla 4 Residuos asfálticos obtenidos a baja temperatura

	Residuo Asfáltico		Promedio (%)
	1	2	
CRS-1 (RECOPE)	69,1	69,3	69
CRS-1h (LANAMME)	64,4	64,5	64
CSS-1h (RECOPE)	66,3	66,6	66
CSS-1hL (LANAMME)	68,3	68,2	68

Es importante mencionar que la evaporación a baja temperatura no separa de la emulsión los materiales adicionales que tienen la emulsión CRS-1 producida por RECOPE y la emulsión CSS-1hL producida en el LanammeUCR, es decir difieren del resultado obtenidos mediante la destilación por la presencia del Búnker-C y SBR.

2.2 Preparación de especímenes de Laboratorio.

Se prepararon especímenes de diseño Superpave (160 mm de altura y 150 mm de diámetro) con la mezcla asfáltica muestreada en planta. Cada uno de los especímenes se cortó a la mitad y se midieron las propiedades volumétricas de cada una de las mitades. En la cara sin cortar de cada uno de los especímenes se aplicó el material de riego de liga. Se aplica usando una brocha la cantidad de emulsión con una precisión de 0,1 g (Ver Fotografía 1 y Fotografía 2).



Fotografía 1. Aplicación de emulsión asfáltica en especímenes.



Fotografía 2. Especímenes con emulsión asfáltica.

La emulsión se dejó curar por un periodo de 1 hora en un horno a 40 °C y luego se introdujeron nuevamente en los moldes del compactador giratorio, se colocó mezcla suelta encima y se compactaron a 50 giros con una presión de 600 kPa.

Se seleccionó esta energía de compactación para simular una densidad y el proceso de post compactación de los primeros años de servicio en la parte superior de los especímenes y para evitar una recompactación de la mezcla que podría dar como resultado en una excesiva ruptura o deformación en la interfaz ligada (West, Zhang, & Moore, 2005). Este procedimiento se repitió para todas las tasas de aplicación establecidas, con los cuatro tipos de emulsiones utilizadas y para las texturas evaluadas.



Fotografía 3. Especímen terminado

Durante la preparación de los especímenes se observó que para las tasas de aplicación de $1,0 \text{ L/m}^2$ en adelante, el exceso de emulsión escurre por los vacíos de la mezcla, como se puede observar en la Fotografía 4.



Fotografía 4. Escurrimento de emulsión asfáltica por los vacíos de la mezcla

En el ensayo de ABS se utilizaron piezas semejantes a tornillos que se acoplan al medidor, con un borde que sobresale en la cabeza. La cabeza donde se coloca la muestra tiene 20 mm de diámetro y la cara con una textura específica (Ver Fotografía 5 a). En cada uno se colocó 0,4 gramos de asfalto obtenido a baja

temperatura. Se colocó sobre la superficie de la mezcla procurando ubicarlos en la zona más homogénea. El conjunto se almacena en un desecador durante 24 horas antes de ejecutar el ensayo.



a)Dispositivos para colocar la muestra



b)Dispositivos colocados sobre los especímenes de
mezcla asfáltica

Fotografía 5. Preparación de especímenes para ensayo ABS

Adicionalmente se preparan muestras en un dispositivo que cambia los tornillos de configuración distinta, ya que no tienen el borde en la cabeza del dispositivo. Con estos se evaluaron las distintas tasas de aplicación.



Fotografía 6. Asfalto colocado sobre dispositivos sin borde

2.3 Ensayo para medir la resistencia de los riegos de liga

Se evaluó la resistencia del riego de liga mediante un dispositivo similar al propuesto por el NCAT, como se muestra en la Figura 3.

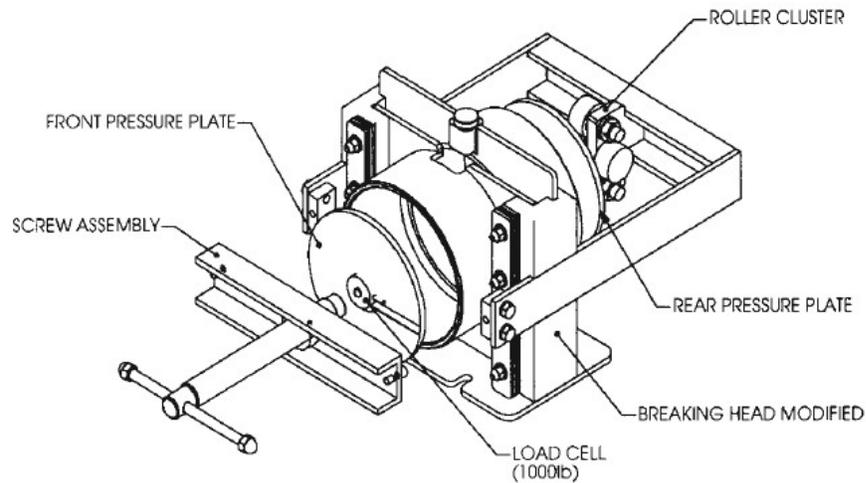


Figura 3. Ilustración del dispositivo para evaluar la resistencia de los riegos de liga desarrollado por el NCAT (West, Zhang, & Moore, 2005)

Los especímenes se fallan a cortante pero también se aplica una carga horizontal perpendicular a la fuerza cortante. Para esta etapa experimental se evaluó sin fuerza normal. La carga se aplicó mediante un marco de carga con la capacidad de efectuar una razón de desplazamiento de 50,8 mm/min

El otro ensayo utilizado para medir la fuerza de adhesión entre el asfalto residual de las emulsiones y la mezcla asfáltica es el ABS, según la norma AASHTO TP-91 (2011). El ensayo del ABS se realizó utilizando el Instrumento de ensayo de tracción neumática de adhesión (PATTI, por sus siglas en inglés) (ASTM D-4541, 2011), que es típicamente utilizado por la industria de pintura y sellado.

Se colocan $(0,4 \pm 0,05)$ g de muestra en los dispositivos. Los dispositivos con la muestra de asfalto se colocan bajo presión en la superficie de la mezcla. Se dejan reposar por un periodo de 24 horas a temperatura ambiente en un desecador para evitar que la humedad afecte las superficies de ensayo y después de este periodo se ensayan, ajustando el pistón F2 especificado en la norma AASHTO TP-91, al dispositivo de muestra mediante una rosca. Se aplica una presión de 100 psi hasta que falle la unión entre y la superficie de ensayo, en este caso mezcla asfáltica.



Fotografía 7. Montaje y falla de especímenes para ABS



3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos para la validación de las tasas de aplicación obtenidos se muestran en la Tabla 5. Los resultados indican que a través de este ensayo y para una mezcla específica se puede obtener un óptimo de aplicación para las condiciones evaluadas en laboratorio para el presente estudio y sobre todo que el exceso de emulsión no produce un beneficio sustancial en la resistencia al cortante, es de destacar que a partir 0.6 L/m² no se obtiene una mejora en la resistencia y a partir de estas tasas se produce un exudación de emulsión la cual viaja a través de los vacíos de la mezcla asfáltica.

Tabla 5. Resultados para validación de tasas de aplicación

Tasa de aplicación (L/m ²)	Esfuerzo (Mpa)				Promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Coeficiente de variabilidad (L/m ²)
	Réplicas						
	1	2	3	4			
0,00	1,44	1,40	1,40	1,41	1,41	0,02	0,02
0,10	1,42	1,49	1,56	1,52	1,50	0,06	0,04
0,20	1,79	1,90	1,87	1,89	1,86	0,05	0,03
0,30	1,76	1,78	1,81	1,73	1,77	0,03	0,02
0,40	1,62	1,62	1,66	1,69	1,65	0,04	0,02
0,50	1,59	1,47	1,62	1,63	1,58	0,07	0,05
0,60	1,36	1,37	1,44	1,44	1,40	0,04	0,03
0,75	1,40	1,31	1,39	1,36	1,36	0,04	0,03
1,00	1,32	1,41	1,43	1,31	1,37	0,06	0,05
1,25	1,32	1,39	1,45	1,36	1,38	0,05	0,04
1,50	1,46	1,40	1,47	1,32	1,41	0,07	0,05

De manera gráfica (Ver Figura 4) se puede apreciar mejor el rango en el cual la emulsión asfáltica tiene mayor efecto en la resistencia a cortante en la interfaz del pavimento.

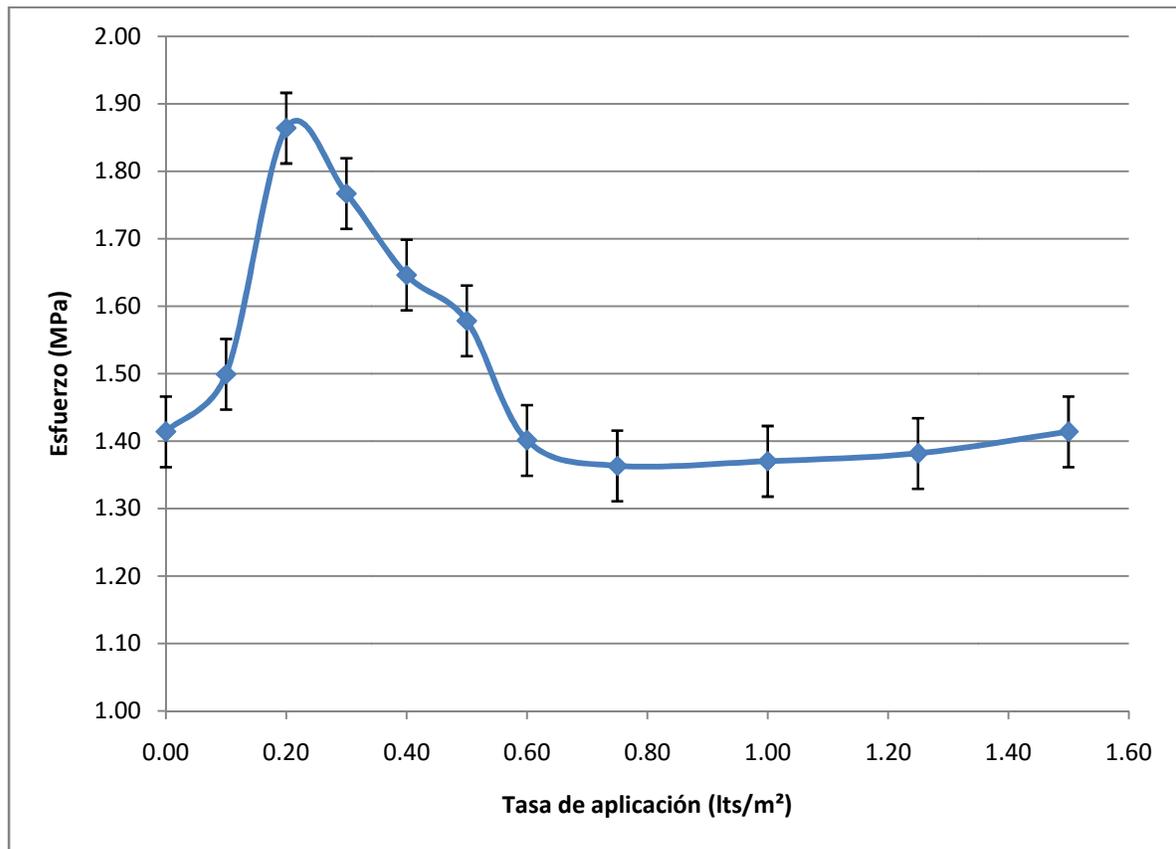


Figura 4. Curva de tasa óptima de emulsión CRS-1

Los resultados del análisis de varianza, que se muestra en la Tabla 6, sugieren diferencias significativas entre las distintas tasas de aplicación (95% de confianza).

Tabla 6. Análisis de varianza de las tasas de aplicación para emulsión CRS-1

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre tasas de aplicación	79,03	10,00	7,90	46,29	1,59E-16	2,13
Dentro de los grupos	5,63	33,00	0,17			
Total	84,67	43,00				

También se realizó el análisis mediante la prueba de Tukey, que se aplica para determinar las muestras que evidencian las diferencias significativas. En la Tabla 7 se resumen los resultados. Las celdas que contienen la palabra “SI” indican que existen diferencias honestamente significativas (HSD), caso contrario la celda contiene la palabra “NO”.



Tabla 7. Análisis de varianza de las tasas de aplicación

		Tasas de aplicación (L/m ²)										
		0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,75	1,00	1,25	1,50
Tasas de aplicación (L/m ²)	0,00		NO	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	0,10			SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO	NO
	0,20				NO	SI						
	0,30					NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	0,40						NO	SI	SI	SI	SI	SI
	0,50							SI	SI	SI	SI	SI
	0,60								NO	NO	NO	NO
	0,75									NO	NO	NO
	1,00										NO	NO
	1,25											NO
	1,50											

De la prueba Tukey se puede inferir que para las tasas de aplicación a partir de 0,6 L/m² no existe una diferencia significativa en comparación de no usar ningún tipo de material para realizar la liga de capas asfálticas. Para las tasas de aplicación (0,2; 0,3; 0,4 y 0,5)L/m², existen diferencias en los esfuerzos máximos en los extremos del rango, pero no así en los valores intermedios.

Adicional a la tasa de aplicación, el tipo de emulsión también es de interés. Como se mencionó anteriormente, se utilizó asfalto AC-30 y cuatro tipos de emulsión. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8, en donde evidencia que la información que genera el ensayo es valiosa para decidir sobre el material que presenta el mejor desempeño.



Tabla 8. Resistencia de los riegos de liga evaluados

Material para riego	Tasa de aplicación	Esfuerzo (Mpa)				Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de variabilidad
		Réplicas						
	(L/m ²)	1	2	3	4	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Asfalto	0,25	2,338	2,258	1,589	1,836	2,005	0,354	0,18
	0,50	1,709	1,726	1,765	1,937	1,784	0,105	0,06
	0,75	1,914	1,957	1,926	1,939	1,934	0,018	0,01
	1,00	1,973	1,951	1,825	1,825	1,893	0,080	0,04
CSS-1hL (Lanamme)	0,25	2,040	2,176	2,206	2,199	2,155	0,078	0,04
	0,50	1,913	2,006	2,032	2,049	2,000	0,061	0,03
	0,75	1,861	1,891	2,019	1,843	1,903	0,080	0,04
	1,00	1,874	1,857	2,009	1,897	1,909	0,068	0,04
CRS-1 (Lanamme)	0,25	1,888	1,957	1,949	1,978	1,943	0,039	0,02
	0,50	1,902	1,882	1,886	1,846	1,879	0,023	0,01
	0,75	1,770	1,786	1,766	1,761	1,771	0,011	0,01
	1,00	1,733	1,735	1,740	1,755	1,741	0,010	0,01
CSS1-h (RECOPE)	0,25	1,843	1,817	1,819	1,845	1,831	0,015	0,01
	0,50	1,831	1,888	1,903	1,854	1,869	0,033	0,02
	0,75	1,819	1,766	1,754	1,786	1,781	0,029	0,02
	1,00	1,719	1,761	1,750	1,697	1,732	0,029	0,02
CRS-1 (RECOPE)	0,25	1,895	1,879	1,938	1,938	1,913	0,030	0,02
	0,50	1,59	1,47	1,62	1,63	1,58	0,07	0,05
	0,75	1,40	1,31	1,39	1,36	1,36	0,04	0,03
	1,00	1,32	1,41	1,43	1,31	1,37	0,06	0,05

Para estos resultados se realizó un análisis de varianza de dos factores con un 95% de confianza con varias muestras por grupo, para determinar si existen diferencias significativas entre los materiales utilizados en los riegos de liga, las dosificaciones utilizadas y la interacción entre ellas.

En este análisis (ver Tabla 9) se obtiene una probabilidad menor a 0,5 para el tipo de material y para las tasas de aplicación que se utilizan para cada material y para la interacción entre ellas.



Tabla 9. Análisis de varianza para los distintos tipos de materiales para riego de liga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Material	0,585	3,000	0,195	21,858	1,09E-09	2,758
Tasas de aplicación	1,023	4,000	0,256	28,650	2,51E-13	2,525
Interacción	0,355	12,000	0,030	3,313	1,01E-03	1,917
Dentro del grupo	0,535	60,000	0,009			
Total	2,498	79,000				

Al igual que en el caso anterior, se realizó nuevamente el análisis de Tukey para corroborar las diferencias entre ellos.

Tabla 10. Análisis de Tukey para los distintos tipos de materiales para riego de liga

Material de Liga

Material	Asfalto	CSS-1hLLanamme	CRS-1hLanamme	CSS-1h RECOPE	CRS-1 RECOPE
Asfalto		NO	NO	SI	SI
CSS-1hLLanamme			SI	SI	SI
CRS-1hLanamme				NO	SI
CSS-1h RECOPE					SI
CRS-1 RECOPE					

Como se puede observar en la Tabla 10 no existe diferencia al utilizar asfalto y emulsiones elaboradas en el LanammeUCR, esto evidencia que el utilizar búnker-C como rebajante genera diferencias significativas en el desempeño de la emulsión: las emulsiones con rebajantes presentan menores resistencias que las muestras sin rebajante. La emulsión que presenta mayores diferencias es la CRS-1 producida por RECOPE, la cual contiene Bunker-C como rebajante. Esta emulsión también presenta las resistencias más bajas como se muestra en la siguiente figura.

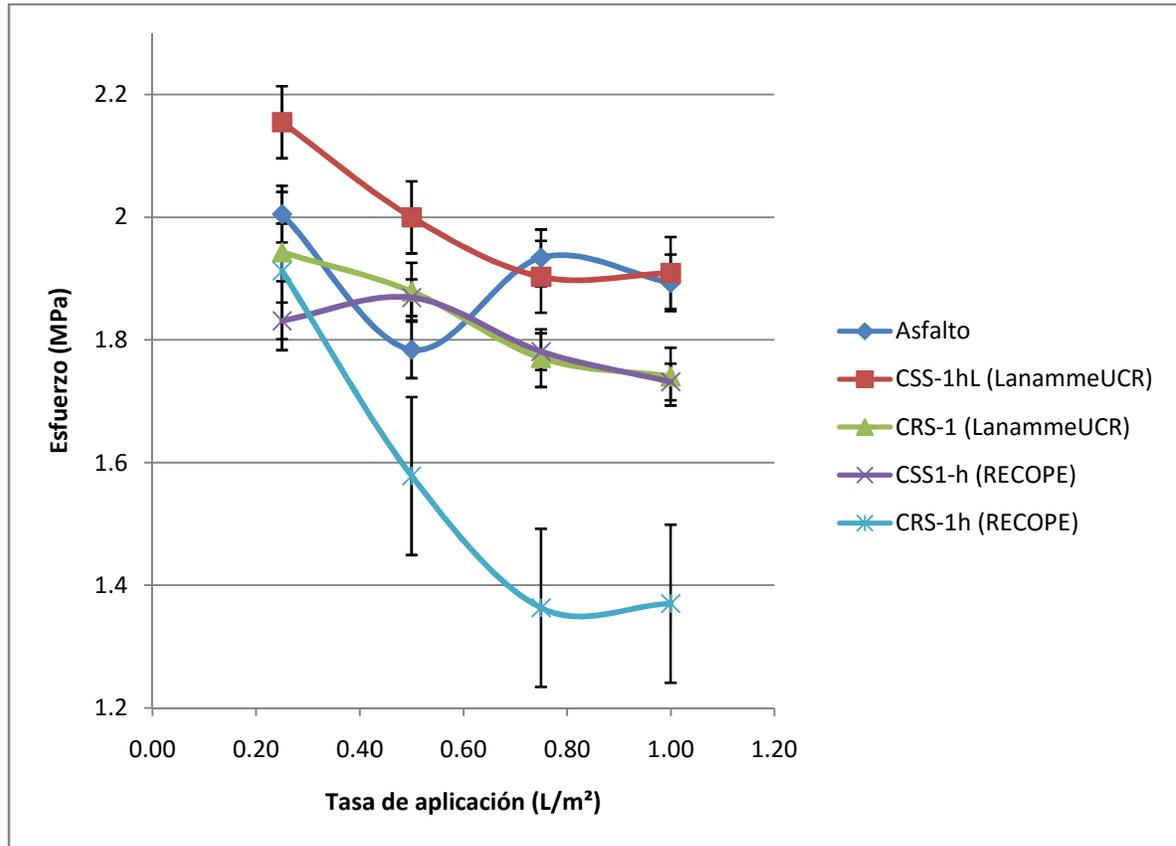


Figura 5 Evaluación de los materiales utilizados en el riego de liga.

Posteriormente se evaluó la influencia de la textura en la resistencia. Para ello se realizaron especímenes con distinto tamaño máximo nominal (TMN) para variar la macrotextura de la mezcla. Para cuantificar la macrotextura se realizó una adaptación del método establecido en la norma “Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique” (ASTM E965, 2015) con lo que se obtuvieron los valores de macro textura que se detallan en la Tabla 11

Tabla 11 Cuantificación de la macrotextura de la mezcla utilizada

Tipo de mezcla	Macro textura
Mezcla Gruesa (Hernán Solís)	0,9847
Mezcla Fina (Pavicen)	0,4671



Los resultados obtenidos al evaluar la influencia de la textura en el desempeño de los riegos de liga se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12. Evaluación de la textura en el desempeño de los riegos de liga

Textura	Tasa de aplicación	Esfuerzo (MPa)				Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de variabilidad
		Réplicas						
	(L/m ²)	1	2	3	4	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Fina	0,25	1,727	1,735	1,721	1,743	1,731	0,009	0,005
	0,50	1,568	1,531	1,521	1,569	1,547	0,025	0,016
	0,75	1,485	1,528	1,491	1,527	1,508	0,023	0,015
	1,00	1,378	1,395	1,390	1,425	1,397	0,020	0,014
Gruesa	0,25	1,895	1,879	1,938	1,938	1,912	0,030	0,016
	0,50	1,753	1,708	1,697	1,705	1,716	0,026	0,015
	0,75	1,552	1,578	1,514	1,534	1,545	0,027	0,017
	1,00	1,366	1,363	1,488	1,523	1,435	0,083	0,058

Nuevamente se realizó un análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo, para evaluar si había diferencias significativas entre texturas. La Tabla 13 muestra este análisis.

Tabla 13. Análisis de varianza para las texturas evaluadas

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Textura	0,716	3,000	0,239	177,015	1,69E-16	3,009
Tasa de aplicación	0,090	1,000	0,090	66,943	2,12E-08	4,260
Interacción	0,038	3,000	0,013	9,359	2,80E-04	3,00878657
Dentro del grupo	0,032	24,000	0,001			
Total	0,877	31,000				

Con el 95% de confianza puede proponerse que existen diferencias significativas entre los distintos tipos de textura, las tasas de aplicación asociadas a estas y a la interacción entre estas dos variables. Para corroborar si existe diferencia entre ambas texturas se realiza el análisis de Tukey el cual se muestra en la Tabla 14.

Como se puede observar existe una diferencia significativa entre texturas, esto se traduce en que al haber un poco más de poros de la textura gruesa se llenan con la mezcla nueva y crea mayor fricción que mejora el desempeño de la mezcla. Como se muestra en la Figura 6 los valores para la mezcla fina son menores debido a que el aumento de la fricción solamente se genera con la mezcla gruesa.

Tabla 14. Análisis de Tukey para las texturas evaluadas

		Textura	
		Textura Gruesa	Textura fina
Textura	Textura Gruesa		SI
	Textura Fina		

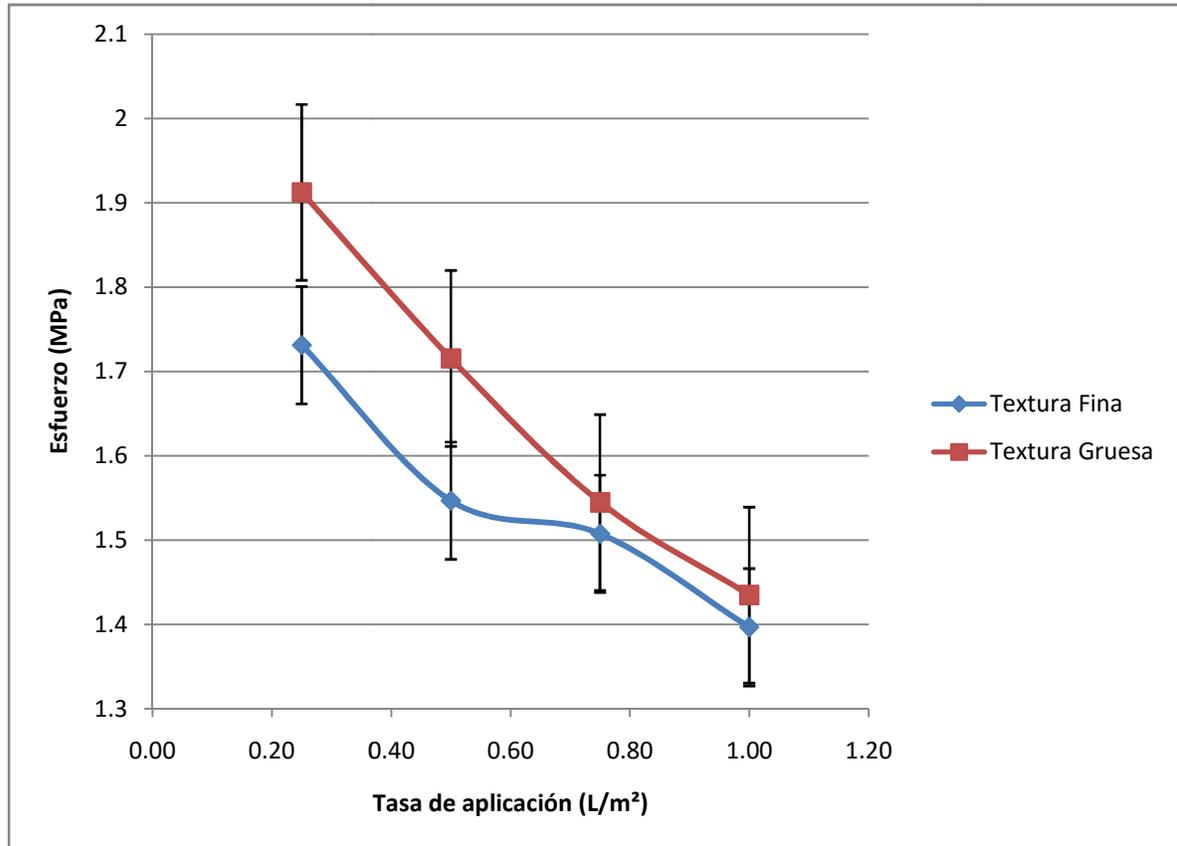


Figura 6. Evaluación de la influencia de la textura en la resistencia del riego de liga.

Finalmente se realizó el ensayo ABS para evaluar la adherencia de los materiales usados en los riegos de liga y las tasas de aplicación. Los resultados obtenidos fueron clasificados en resistencia a la tensión (POTS) y cualitativamente se determina el tipo de falla. Los resultados obtenidos en POTS se muestran en la siguiente tabla.



Tabla 15. Evaluación de la adherencia mediante ABS

Tipo de emulsión	Resultados			Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de variación
	Unidades POTS			Unidades POTS	Unidades POTS	Unidades POTS
CRS-1 (RECOPE)	454,433	416,492	435,462	435,462	18,971	4,356
CRS-1h (LANAMME)	852,812	950,374	947,664	916,950	55,562	6,059
CSS-1h (RECOPE)	860,942	752,54	841,972	818,485	57,892	7,073
CSS-1hL (LANAMME)	801,321	877,203	814,871	831,132	40,470	4,869

Como se evidencia existe un desempeño diferente por parte de la emulsión CRS-1 de RECOPE. En comparación con las demás emulsiones tienen una resistencia a la tensión aproximadamente 50% menor. Las emulsiones CSS-1h, CRS-1h (Lanamme) y CSS-1hL reportan desempeños similares.

De acuerdo con estudios realizados en el LanammeUCR (Aguilar, y otros, 2015) y con base en los resultados obtenidos se concluye que el utilizar SBR para modificar el asfalto utilizado en la elaboración de la emulsión no favorece el parámetro de adhesión.

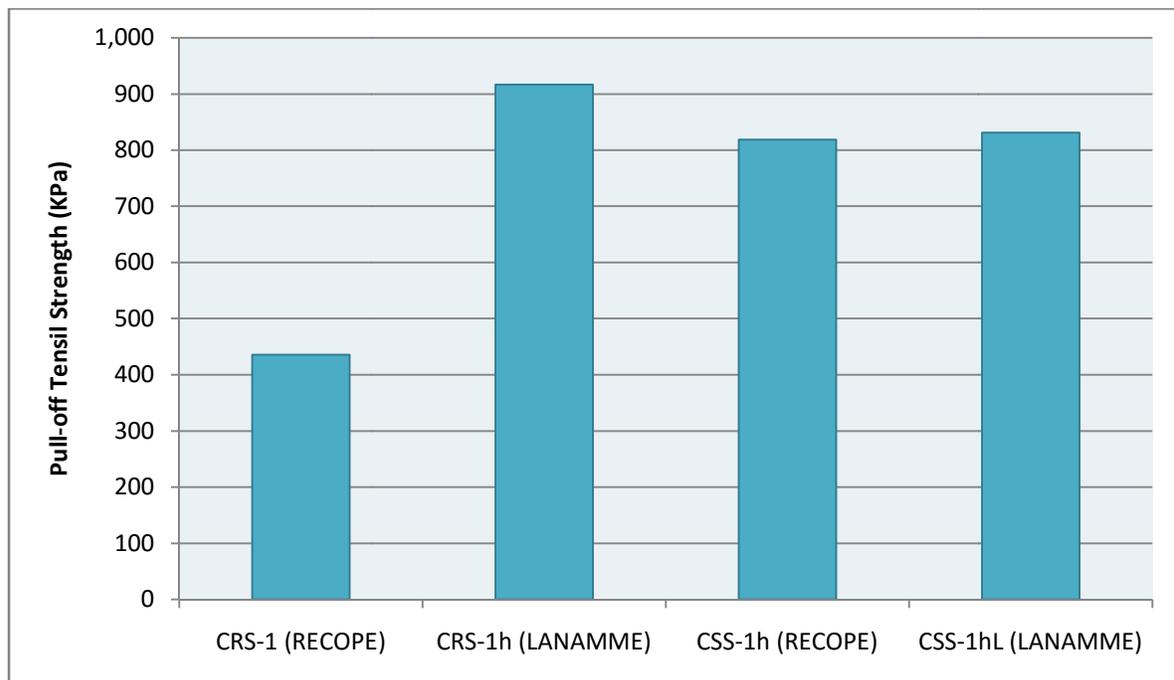


Figura 7. Resultados de evaluación de la adherencia mediante ensayo de ABS para una tasa de aplicación de 1.89 L/m²



Para analizar estas diferencias se realizó un análisis de varianza el cual se muestra a continuación

Tabla 16. Análisis de varianza de los resultados de la adhesión

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Material para Liga	414233,143	3,000	138077,714	65,468	5,68E-06	4,066
Dentro del grupo	16872,588	8,000	2109,074			
Total	431105,731	11,000				

Al haber un resultado para la probabilidad mucho menor que 0,05 se realizó el análisis de Tukey para identificar cuáles son los tipos de emulsión que provocan las diferencias significativas.

Tabla 17. Análisis de Tukey de los resultados de la adhesión

		Material de Liga			
		CRS-1 (RECOPE)	CRS-1h (Lanamme)	CSS-1h (RECOPE)	CSS-1hL (Lanamme)
Material de Liga	CRS-1 (RECOPE)		SI	SI	SI
	CRS-1h (LANAMME)			NO	NO
	CSS-1h (RECOPE)				NO
	CSS-1hL (LANAMME)				

Al realizar este análisis se observa que la emulsión CRS-1 de RECOPE es la que presenta una mayor variación con respecto a las demás. Como la diferencia principal es el uso de Bunker-C en el residuo asfáltico se asocia la diferencia a este compuesto.

Todos los resultados permiten deducir que rebajar el asfalto con Bunker-C, el cual es el único componente adicional que diferencia la emulsión de RECOPE con las otras, es perjudicial para el desempeño del residuo asfáltico para riegos de liga.

El análisis del tipo de falla que se obtiene cuando se realiza el riego de liga con la emulsión CRS-1 de RECOPE se observa que falla por cohesión, esto significa que la falla la provoca el material y no la interfaz entre la mezcla y el asfalto residual. Los residuos asfálticos de las emulsiones restantes (CRS-1h Lanamme, CSS-1h, CSS-1hL) fallan por adhesión, lo que significa que el material mantiene la integridad y solo falla la interfaz.



Falla por cohesión, Emulsión CRS-1 RECOPE



Falla por adhesión, Emulsión CRS-1h LanammeUCR



Falla por adhesión, Emulsión CSS-1h RECOPE



Falla por adhesión, Emulsión CSS-1hL LanammeUCR

Fotografía 8. Evaluación cualitativa de los tipos de falla

Finalmente, se evaluaron las tasas de aplicación mediante el ensayo de ABS. Se mantiene la tendencia en la que a mayor asfalto residual mayor resistencia presenta, también se observó que la emulsión CRS-1 de RECOPE reporta el desempeño más deficiente. Sin embargo fue necesario adecuar algunos pasos del procedimiento de ensayo para evaluar este parámetro. Adicionalmente, se utilizaron tasas más bajas que las que recomienda la norma ($1,89 \text{ L/m}^2$), por lo que no se logró una cobertura total del dispositivo. Debido a esto los valores no podrían ser representativos del ensayo. En la siguiente figura se muestran las tendencias y los resultados de este ensayo, como se observa conforme aumenta la tasa de aplicación aumenta el valor del POTS hasta alcanzar el valor obtenido con el protocolo de la norma AASHTO TP-91.

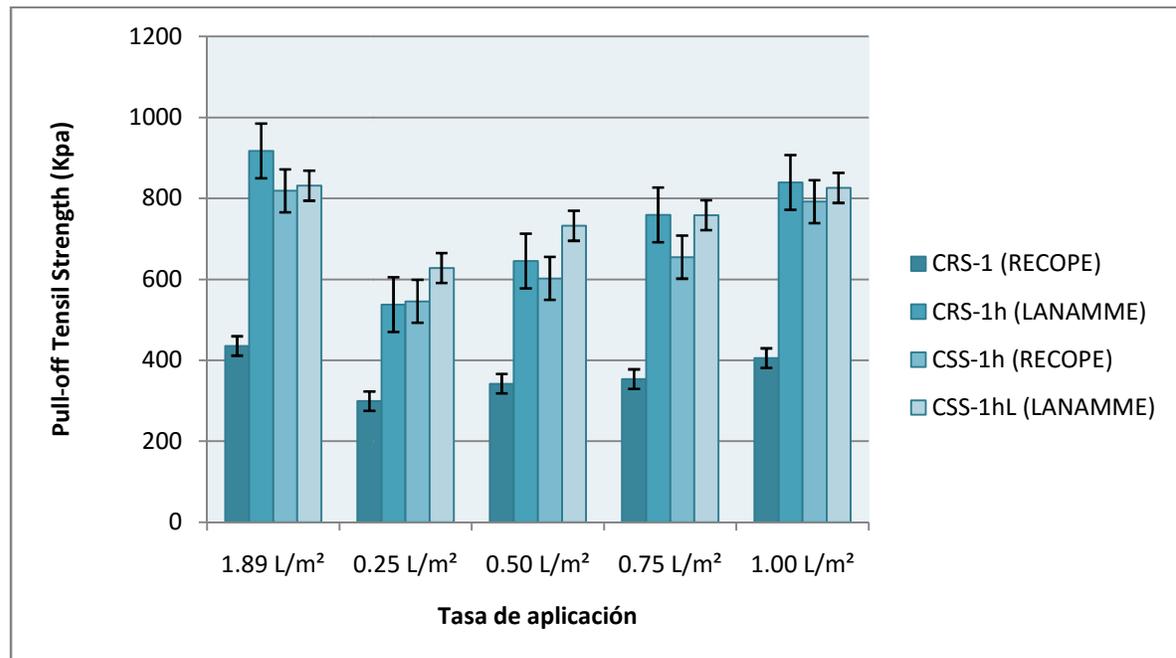


Figura 8. Resultados de evaluación de la adherencia de las tasas de aplicación

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La metodología de construcción y de evaluación de especímenes especificada en el procedimiento ALDOT-430 es adecuada para poder evaluar el desempeño de los materiales que se utilizan en los riegos de liga. Debido a que es un método sencillo, es factible su implementación como un parámetro de aceptación, tanto de la calidad del material como del proceso constructivo, en donde para determinar la tasa óptima de aplicación, para una mezcla y emulsión específica, está definida por la que genera mayor resistencia a cortante.
2. De acuerdo con los resultados de las dosificaciones analizadas, la tasa óptima está definida entre (0,2-0,5)L/m². Este rango de dosificaciones es aceptable para la mayoría de mezclas asfálticas nacionales pues se utilizan TMN de 12,5 mm, este rango propuesto se necesitará validarlo con pruebas de campo.
3. Los resultados de resistencia al corte y de adhesión de la emulsión tipo CRS-1, producida por RECOPE demuestran un desempeño inferior en comparación con las otras emulsiones evaluadas. Como el factor de diferenciación con los demás tratamientos es el uso del Bunker-C para rebajar el asfalto, se deduce que éste tiene un efecto negativo en la adherencia y cohesión del riego de liga.
4. La modificación de la emulsión con SBR y al ser evaluada posteriormente mediante el ensayo de ABS demuestra que no produce una mejoría notable en la adhesividad del asfalto residual sin



embargo en las pruebas realizadas con el ensayo de corte se observa un incremento significativo de las resistencias por lo que se recomienda dosificar adicionalmente un antidesnudante, para mejorar la adherencia del asfalto residual.

5. De acuerdo con los resultados de los ensayos de adhesión y de desempeño, se puede concluir que el Búnker-C afecta negativamente el riego de liga por lo que se recomienda modificar la especificación de esta emulsión para que ya no sea necesario cumplir con un rango de penetración alto y especificar rangos más bajos de penetración para los residuos asfálticos.
6. Con el estudio se demostró que el Búnker-C afecta negativamente el desempeño y adhesividad del asfalto residual de las emulsiones. Con la capacidad de RECOPE de producir la emulsión CSS-1h sin Búnker-C, se recomienda implementar este proceso de producción y fabricar emulsión del tipo CRS-1h excluyendo Búnker-C desde la formulación.



5 REFERENCIAS

- Asphalt Institute. (2008). *MS-22: Construction of Hot Mix Asphalt Pavements*. Lexington: Asphalt Institute.
- AASHTO. Determining Asphalt Binder Bond strength by Means of the Bond Strength (BBS) Test. En *TP-91-15*.
- Aguiar, J. P., Loría, L. G., Delgado, J., Hajj, E., Villegas, E., Navas, y otros. (2015). *EVALUACIÓN DE ADHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN COSTA RICA MEDIANTE ENSAYOS BBS Y DE ÁNGULO DE CONTACTO*. San José.
- Asphalt Institute. (2005). *MS-19: Manual Basico de Emulsiones Asfálticas*. Lexington: Asphalt Institute.
- ASTM E965. (2015). Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. En *E965-15*.
- ASTM. Standard Practice for Recovery of Emulsified Asphalt Residue Using a Vacuum Oven. En *D7944-15*.
- Blahe, J. (1993). *Fabrication and Testing of Automated Pothole Patching Machine*. Strategic Highway Research Program, National Research Council.(No. SHRP-H-674).
- Box, G. y. (1984). *Time-Series Analysis: Forecasting and Control* (Segunda ed.). San Francisco: Holden Day.
- Camacho, E. (2012). Conceptualización y desarrollo del PaveLab. 3 (29).
- Camacho, E., & Leiva, F. (2014). Proceso Constructivo PaveLab.
- Canestrari, F., Ferrotti, G., Partl, M. N., & Santagata, E. (2005). Advanced Testing and Characterization of Interlayer Shear Resistance. *Journal of the Transportation Research Board No. 1929*, 69-78.
- Chaignon, F., & Roffe, J.-C. (2001). *Characterization Tests on Bond Coats: Worldwide Study, Impact, Tests, Recommendations*. Toronto: Canadian Technical Asphalt Association.
- Crafco. (1 de Enero de 2016). *Crafco*. Obtenido de Crafco: <http://www.crafco.com/Equipment/Spray-Injection-Patchers>
- Cross, S. A., & Shrestha, P. P. (2004). *Guidelines for Using Prime and Tack Coats*. Lackwood: Central Federal Lands Highway Division.
- Delgado, J. S. (2011). *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01. 22: 047)*. Métodos y Materiales, 1(1).



- Galindo Burgos, Á. E. (2015). Formulación de una metodología para la correcta implementación de los procesos de inyección de mezcla asfáltica en la ciudad de bogotá según lineamientos pmi.
- Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. *Publicación técnica*, (267).
- Greene, W. H. (2003). *Econometric Analysis* (Quinta ed.). Nueva York: Prentice Hall.
- 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*, 349-362.
- ISO 13473-2. (2002). *Characterization of Pavement Texture by Use of Surface Profiles. Part 2: Terminology and Basic Requirements Related to Pavement Texture Profile Analysis, International Organization for Standardization*. Geneva, Switzerland.
- Jiménez Acuña, M., Sibaja Obando, D., & Molina Zamora, D. (2008). *Evaluación de la factibilidad de la aplicación de mezclas en frío para superficies de rodamiento en costa rica*. San Jose: Unidad de Investigación (UI); Lanamme-UCR.
- King, G., & May, R. (2003). New Approaches to Tack Application. *83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, D.C.
- Leng, Z., Ozar, H., Al-Qadi, I., & Carpenter, S. (2008). Interface Bonding between Hot-Mix Asphalt and Various Portland Cement Concrete Surfaces: Laboratory Assessment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 46-53.
- Leutner, R. (1979). Investigation of the adhesion of bituminous pavements. *Bitumen*.
- Maupin Jr., G., & Payne, C. (2003). *Evaluation of Spray Injection Patching*. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia (Reporte VTRC 03-TAR11).
- Mohammad, L. N., Elseifi, M. A., Bae, A., Patel, N., Button, J., & Scherocman, J. A. (2012). *Optimization of Tack Coat for HMA Placement*. Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Mohammad, L., Raqib, M., & Huang, B. (2002). Influence of asphalt tack coat materials on interface shear strength.
- Nazzal, M. D., Kim, S. S., & Abbas, A. R. (2014). Evaluation of Winter Pothole Patching Methods (No. FHWA/OH-2014/2).
- Ohio DOT. (2001). *Proper Tack Coat Application*. Columbus.
- Patel, N. B. (2010). *Factors Affecting the Interface Shear Strength on Pavements Layers*. Louisiana State University: Louisiana State University.
- Paul, H. R., & Scherocman, J. A. (1998). Friction Testing of Tack Coat Surface. *Transportation Research Record 1616*, 6-12.



- Raab, C., & Partl, M. (2004). Interlayer Shear Performance: Experience with Different Pavement Structures. *rd Eurasphalt and Eurobitume Congress* .
- Reid, R. A. (1998). *Process Evaluation of Spray Injection Method for Asphalt Surface Repair* . South Dakota State University Department of Civil (Reporte No. SD97-06-F).
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D., & Kennedy, T. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, Construction*. Lanham: NAPA Education Foundation.
- Romanoschi, S., & Metcalf, J. (2001). Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1778* , 123-131.
- Sangiorgi, C., Collop, C. A., & Thom, H. N. (2002). Laboratory Assessment of Bond Condition using the Leutner Shear Tes., (págs. 315–324). Grecia.
- Santagata, E., & Canestrari, F. (1994). Tensile and shear tests of interfaces in asphalt mixes: a new perspective on their failure criteria. *Proceedings of the 2nd international symposium on highway surfacing* .
- Sayers, M. W. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. Washington, D.C.: World Bank Technical Paper.
- Sayers, M. W. (1995). On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile. En *Transportation Research Record 1501* (págs. 1–12). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Sholar, G. A., Page, G. C., Musselman, J. A., Upshaw, P. B., & Moseley, H. L. (2004). Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* .
- Smith, K., & Romine, A. (1993). *Materials and procedure for sealing and filling cracks in asphalt-surfaced pavements*. Charlottesville, Virginia: Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC. Report SHRP-H-348.
- Tashman, L. 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.
- Texas Department of Transportation. (s.f.). Recuperado el 01 de Julio de 2015, de http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/nondestructive_evaluation_of_pavement_functional_properties.htm
- Unified Facilities Guide Specification. (2008). *Bituminous Tack and Prime Coats*. Unified Facilities Guide Specification.
- USACE. (2000). *Hot-Mix Asphalt Paving Handbook 2000*.



Uzan, J., Livneh, M., & Eshed, Y. (1978). Investigation of Adhesion Properties Between Asphalt Concrete Layers. *Asphalt Paving Technology* .

Van Dam, T., Kirchner, K., Shahin, M., & Blackmon, E. (1987). *Consequence of Layer Separation of Pavement Performance*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.

West, R., Zhang, J., & Moore, J. (2005). *Evaluation of bond strength between pavement layers*. Auburn University, Alabama: National Center for Asphalt Technology,.

Wikipedia. (16 de Diciembre de 2016). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Pothole>

Wilson, T., & Romine, A. (1993). *Innovative materials development and testing. Volume 2: Pothole repair*. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC. Report SHRP-H-353.

Wilson, T., & Romine, A. (2001). *Materials and Procedures for Repair of Potholes in Asphalt-surfaced Pavements- Manual of Practice*). (No. FHWA-RD-99-168).

Yubo Zhao, J. G. (2013). IRI Estimation Using Probabilistic Analysis of Acoustic Measurements. *Materials Performance and Characterization* , 2 (1).

Ziari, H., & Khabiri, M. (2007). Interface Condition on Prediction of Flexible Pavement Life. *Journal of Civil Engineering and Management* , 71-76.



ANEXOS

Método de prueba estándar para determinar el desempeño de riegos de liga entre capas de pavimento asfáltico

Alcance

Este método trata de determinar la resistencia de la adherencia por medio de un ensayo a cortante entre las capas del pavimento utilizando especímenes elaborados en el laboratorio núcleos extraídos en campo.

Este ensayo se realizará en especímenes de 100 mm ó de 150 mm de diámetro para especímenes elaborados en el laboratorio o núcleos extraídos en campo.

Esta prueba es aplicable si los espesores de las capas de asfalto o de base de concreto son superiores a 50 mm e inferiores a 150 mm cada uno de los especímenes.

Dispositivo de ensayo

El dispositivo de prueba de adherencia que se utiliza para el ensayo de corte directo está diseñado para acomodar especímenes de prueba de 100 y 150 mm de diámetro. El dispositivo tiene una camisa cilíndrica de metal fija y un cabezal de carga metálico que se desliza con una superficie cóncava que tiene 75 mm de radio de curvatura para aplicar la carga al espécimen de prueba.

La separación entre la camisa o mordaza cilíndrica de metal fija y la cabeza de carga metálico deslizando será $6,35 \text{ mm} \pm 0,80 \text{ mm}$.

La máquina con la cual se aplicara la carga debe ser capaz de producir un movimiento vertical uniforme de 50,8 mm por minuto.

Un estabilómetro Marshall, máquina universal u otra máquina de prueba mecánica o hidráulica se puede utilizar siempre que la velocidad del movimiento se mantenga en 50,8 mm por minuto, cuando la carga es aplicada.



Elaboración de los especímenes

1. Elaboración de especímenes de 100 mm.
 - a. Elaborar especímenes de al menos 150 mm de altura en el compactador giratorio con un diámetro de 150 mm, para esto se deben hacer pruebas de altura para conseguir la altura mínima de los especímenes.
 - b. Medir la altura del espécimen en 4 puntos, obteniéndose el promedio de estas alturas, con el objetivo de determinar a qué altura debe cortarse los especímenes.
 - c. Realizar la volumetría de los especímenes para corroborar que se cumplen los vacíos especificados para el ensayo. Se ha comprobado que cuando los especímenes poseen más de 7% de vacíos ocurre un escurrimiento de la emulsión, por lo que los especímenes con vacíos mayores serán descartados.
 - d. Extraer núcleos diámetro de 100 mm de cada espécimen y cortarlos por la mitad con la mayor exactitud posible, cada porción se debe secar en un horno a una temperatura de 60°C por al menos 18 horas.
 - e. Realizar la volumetría de los núcleos para corroborar si están dentro del límite de 7% vacíos.
 - f. Aplicar mediante una espátula y con la ayuda de una balanza de 0,1 gr de precisión la tasa de aplicación de emulsión deseada en unidades de g/m².
 - g. Dejar que la emulsión rompa y cure por un periodo de dos horas para todos los especímenes. Paralelamente a esta etapa se deben realizar pruebas para la corroboración de los vacíos meta deseados para la parte superior de los especímenes, utilizando una presión de contacto de 600 Kpa y 50 giros para evitar una sobre compactación.
 - h. Reintroducir cada mitad teniendo el cuidado de no alterar la superficie de la emulsión aplicada, colocar la mezcla y compactar la parte superior del espécimen.
 - i. Cada espécimen no debe pasar por más de 24 horas desde la elaboración hasta la falla.
2. Elaboración de especímenes de 150 mm.
 - a. Elaborar especímenes de al menos 150 mm de altura en el compactador giratorio con un diámetro de 150 mm, para esto se deben hacer pruebas de altura para conseguir la altura mínima de los especímenes, debido a que los especímenes al ser desmoldados inmediatamente sufren una expansión volumétrica, cada uno debe ser dejado en el molde hasta que alcance una temperatura de 60°C realizando en este periodo el proceso de desmoldar y volver a introducir en el molde cada espécimen.



- b. Medir la altura del espécimen en 4 puntos, obteniéndose el promedio de estas alturas, con el objetivo de determinar a qué altura debe cortarse los especímenes.
- c. Realizar la volumetría de los especímenes para corroborar que se cumplen los vacíos especificados para el ensayo. Se ha comprobado que cuando los especímenes poseen más de 7% de vacíos ocurre un escurrimiento de la emulsión, por lo que los especímenes con vacíos mayores serán descartados.
- d. Aplicar mediante una espátula y con la ayuda de una balanza de 0,1 gr de precisión la tasa de aplicación de emulsión deseada en unidades de g/m².
- e. Dejar que la emulsión rompa y cure por un periodo de dos horas para todos los especímenes. Paralelamente a esta etapa se deben realizar pruebas para la corroboración de los vacíos meta deseados para la parte superior de los especímenes, utilizando una presión de contacto de 600 Kpa y 50 giros para evitar una sobre compactación.
- f. Reintroducir cada mitad teniendo el cuidado de no alterar la superficie de la emulsión aplicada, colocar la mezcla y compactar la parte superior del espécimen.
- g. Cada espécimen no debe pasar por más de 24 horas desde la elaboración hasta la falla.

Procedimiento

1. Medir el diámetro del espécimen de prueba o núcleo y el espesor de la superposición de capas con una precisión de 1 mm. Se debe medir el diámetro en al menos tres lugares y obtener el promedio de estas lecturas.
2. Estabilizar las muestras de prueba a una temperatura de 25 ± 1 °C durante un mínimo de 2 horas en una cámara acondicionadora o 30 minutos en un baño de agua, pero se debe proteger la prueba en una bolsa totalmente cerrada para evitar mojarse. (Se puede acondicionar las muestras de prueba a otras temperaturas)
3. Colocar la muestra de prueba en el dispositivo de ensayo de modo que la dirección del tráfico marcado en esta esté apuntando verticalmente hacia arriba y la interfaz de falla se centra entre el borde del bloque de carga y el borde de la cabeza de carga metálica.
4. Aplicar el desplazamiento de forma continua y sin pausas a una velocidad de deformación constante de dos pulgadas por minuto (50,8mm por minuto) hasta que se produzca la falla. Registrar la carga máxima y el desplazamiento de la muestra durante el ensayo.



Cálculo de resultados

Para calcular el esfuerzo cortante de adherencia entre dos capas por medio del ensayo de corte directo, se tiene:

$$\tau = \frac{P_{max}}{A}$$

Dónde,

- τ =esfuerzo cortante de adherencia, en Pa.
- P_{max} = carga máxima aplicada al espécimen, en kN.
- A = área de la sección transversal del espécimen de prueba, en m².

Para determinar esta área de la sección transversal del espécimen de prueba, se tiene:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

Dónde,

- A = área de la sección transversal del espécimen de prueba, en m².
- D = diámetro promedio del espécimen de prueba, en m.

Reporte

1. Registrar la falla producida en la muestra, identificar si se producen fallos en la interfaz, en la capa existente, o en la superposición para cada espécimen de prueba.
2. Anotar el aspecto de la interfaz incluyendo cualquier contaminante, fisuras, extracción, rayas en el riego de liga, u otras observaciones.
3. Registrar los resultados de las pruebas para cada espécimen de prueba.
4. Tomar la medida del espesor de la superposición de capas asfálticas, espesor de capa existente, el diámetro promedio y la sección transversal.
5. Registrar la carga máxima aplicada.
6. Determinar la resistencia al corte.
7. Calcular y registrar la media y la desviación estándar de la fuerza para cada conjunto de espécimen de prueba.

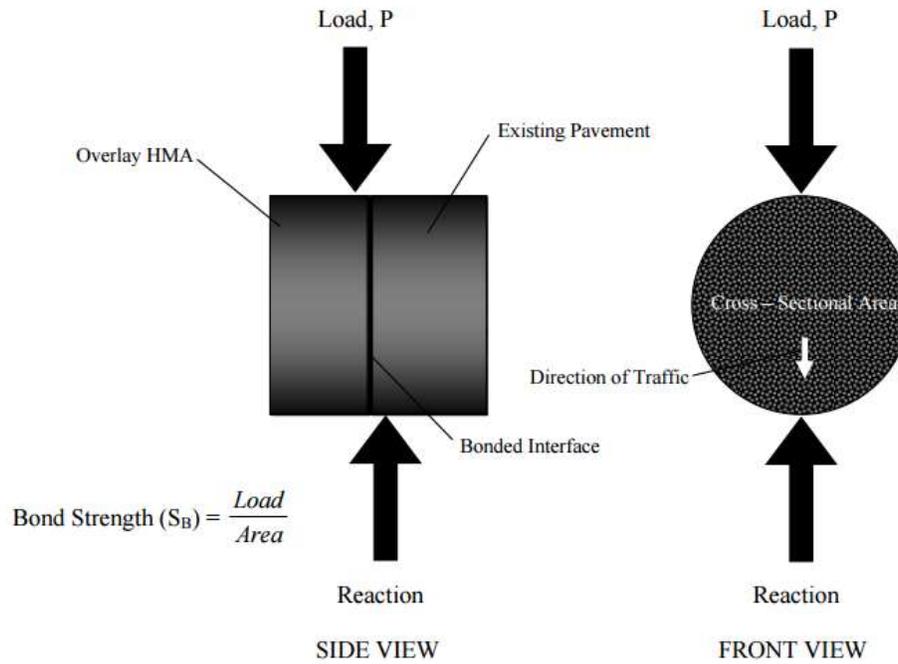


Figura 1. Colocación del espécimen de prueba y aplicación de la carga.

Fuente: ALDOT-430, 2008.