

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

Fabián Elizondo-Arrieta¹, Pablo Alberto Torres-Linares²,
José Pablo Aguiar-Moya³, Luis Guillermo Loria-Salazar⁴

¹LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, fabian.elizondo@ucr.ac.cr

²LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, pablo.torreslinares@ucr.ac.cr

³LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, jose.aguiar@ucr.ac.cr

⁴LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

Los pavimentos consisten en varias capas de materiales y sobre estas una o varias capas de mezcla asfáltica. Estas requieren una eficaz adherencia en la interfaz para que funcionen como una sola estructura. Una adherencia deficiente entre las capas provoca la disminución de la capacidad estructural del pavimento, incidiendo en fallas y deterioros prematuros. Por este motivo el objetivo de este trabajo es evaluar la resistencia al corte y adherencia entre capas de mezcla asfáltica que componen un pavimento mediante ensayos de laboratorio. Para esto, se realizaron especímenes Superpave de 4" compuestos por dos capas de mezcla asfáltica y utilizando varios tipos de emulsión asfáltica como liga entre dichas capas. Estos se evaluaron mediante un ensayo que sometía dichos especímenes a cortante. Adicionalmente se evaluó el residuo asfáltico mediante el ensayo de PATTI para determinar la adhesividad de los residuos asfálticos de las emulsiones utilizadas. Se demostró que los ensayos utilizados permiten evaluar eficientemente la adhesión y validar las tasas de aplicación de emulsiones asfálticas como material de liga. Finalmente, se estableció que utilizar ciertos tipos de modificantes pueden afectar negativamente el desempeño del riego de liga.

Palabras Clave: adhesión, emulsión asfáltica, riegos de liga, pavimentos.

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 dichas capas funcionen monolíticamente y se desempeñen de manera eficiente. Cuando la adherencia de los materiales utilizados para el riego de liga es deficiente, se produce en los pavimentos una disminución de la capacidad estructural, provocando fallas y deterioros [1][2]. 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.

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 obtenidos en el presente estudio, se observó 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.

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 asfáltica que requieren adherencia en la interfaz de capa para que funcionen como una sola estructura y no se afecte el desempeño de esta como una sola estructura [3]. 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 [4].

Si la adherencia entre capas es deficiente provoca la disminución de la capacidad estructural del pavimento, incidiendo en fallas y deterioros[1][2]. Problemas generalmente asociados a una falta de adherencia entre capas son agrietamiento prematuro por deslizamiento de la mezcla y agrietamiento de arriba hacia abajo [5]. 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[6]. Se ha 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[7].

Debido a esto, distintas entidades han desarrollado investigaciones para determinar las propiedades adhesivas en la interfaz usando mecanismos de corte, tensión y torsión [8]. 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 y se utilizaron condiciones de 25 y 55 °C a una velocidad de desplazamiento de 2,5 mm/min., 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. [9]. Posteriormente Leutner[10] diseñó 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. Varios estudios posteriores se basaron en el dispositivo ideado por Leutner [11]. 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.[11]. En 1995, Tscheegg et al. desarrollaron un dispositivo para medir el comportamiento de la fractura mecánica de la adhesión entre capas de mezcla asfáltica [13]. Basados en este ensayo surgieron modificaciones y mejoras como el propuesto por el ensayo de corte [12]. El Centro de Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT por sus siglas en inglés) llevó a cabo un estudio en el 2005 [6] en el cual se propone un método para medir la adherencia entre capas de mezcla asfáltica ante una fuerza cortante.

2.1 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.

2.1.1 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. [13]. Anteriormente se utilizaban asfaltos rebajados 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. [14]. 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) [13].

2.1.2 Tasa de aplicación

Seleccionar el material idóneo y la tasa de aplicación correcta es de vital importancia para el desempeño del riego de liga. 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 [13]. El manual de pavimentación de mezcla asfáltica en caliente del año 2000 [15] especifica que la dosis asfalto residual debe estar entre [0,18-0,27] 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.

2.1.3 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 aproximadamente una y dos horas [15], 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 [13]. 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 [16]. 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 [17] como en núcleos extraídos en campo [18].

2.2 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: tensión y cortante. Por consiguiente, para evaluar la adherencia de los riegos de liga en laboratorio se utilizan ensayos a tensión y a cortante [17].

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. 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 NCAT 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 contraste, 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 [6].

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[6].

3 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 1. Variables evaluadas en la resistencia de riego de liga

Variable	Descripción
Mezcla	Se utilizó dos tipos de mezcla, una de TMN 12,5 mm definida como Mezcla 1 y la otra de TMN de 9,50 mm definida como Mezcla 2
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

Variable	Descripción
Textura	Se evaluaron dos tipos de textura una gruesa (Mezcla 1) y otra fina (Mezcla 2), según el TMN de las mezclas utilizadas
Presión normal	0 KPa
Temperatura de ensayo	25 C

3.1 Materiales

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, así como 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 1) 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). 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). 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 obtenido mediante la destilación por la presencia del Búnker-C y SBR.

3.2 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. Se extrajo un núcleo de 100 mm de diámetro de cada uno de los especímenes el cual posteriormente 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 Figura 1a).



Figura 1: a. Aplicación de emulsión asfáltica en especímenes y b. Especimen terminado y dispositivo para fallar especímenes

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 [6]. Este procedimiento se repitió para todas las tasas de aplicación establecidas, con los cuatro tipos de emulsiones utilizadas y para las texturas evaluadas.

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. 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.

3.3 Ensayos 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 1b. Los especímenes se fallan a cortante pero también se aplica una carga horizontal perpendicular a la fuerza cortante. Para esta etapa experimental se no se aplicó fuerza normal. La carga se aplicó mediante un marco de carga con la capacidad de cargar a 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) [19], 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.

Resultados y Análisis

Los resultados obtenidos para la validación de las tasas de aplicación obtenidos se muestran en la Figura 2. 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 $0,6 \text{ L/m}^2$ no se obtiene una mejora en la resistencia y a partir de estas tasas se produce una exudación de emulsión la cual viaja a través de los vacíos de la mezcla asfáltica.

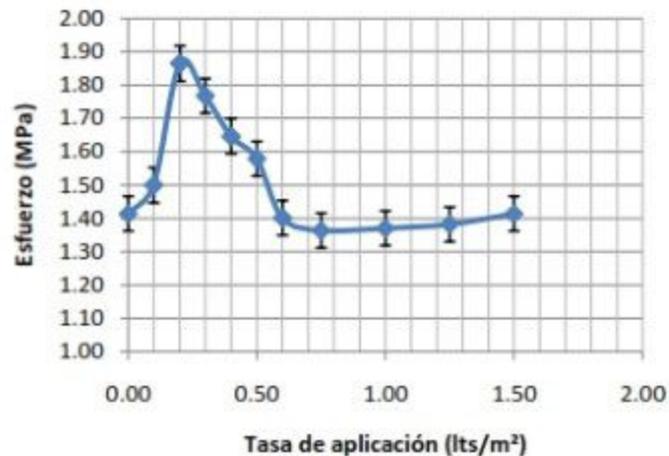


Figura 2. Curva de tasa óptima de emulsión CRS-1 producida por RECOPE

Con base en un análisis ANOVA se identificó que existe una diferencia significativa ($p_{muestra}=1,59E-16 < 0,05$) entre las distintas tasas de aplicación para un nivel de confianza del 95%. Para darle mayor peso a esto se realizó el análisis de Tukey, que se aplica para determinar las muestras que evidencian las diferencias significativas. En la Figura 3 se resumen los resultados. Los espacios que contienen la palabra "SI" indican que existen diferencias honestamente significativas (HSD), caso contrario la celda contiene la palabra "NO".

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				

Tabla 2: Análisis de Varianza de las tasas de aplicación

		Tasas de aplicación (L/m²)										
		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/m²)	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											

Figura 3 : Análisis de Tukey de las tasas de aplicación

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 a no usar ningún tipo de material para realizar la liga de capas asfálticas. Para las tasas de aplicación [0,2-0,5] 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 Figura 4, evidencian que la información que genera el ensayo es valiosa para decidir sobre el material que presenta el mejor desempeño. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura.

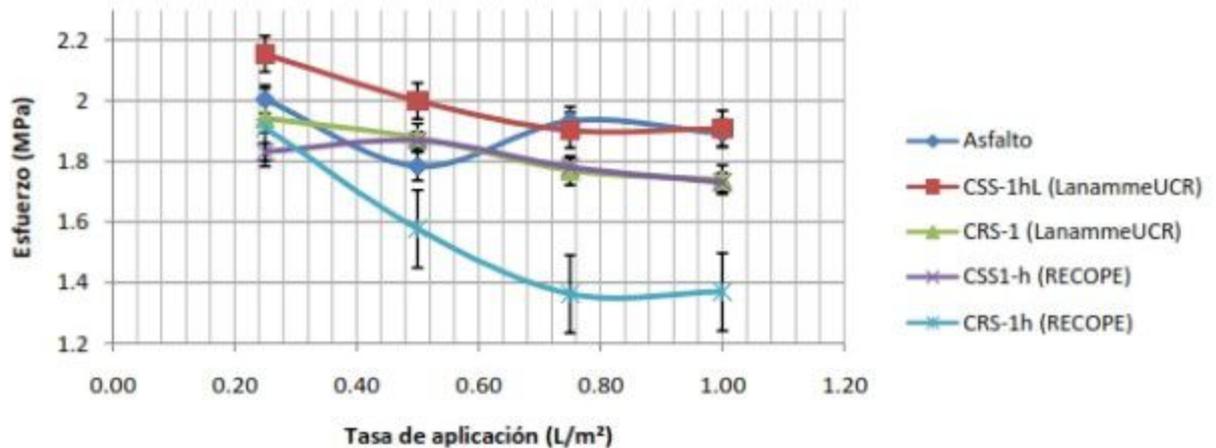


Figura 4: Evaluación de los materiales utilizados en el riego de liga.

Para estos resultados se realizó un ANOVA de dos factores con un 95% de confianza con varias muestras por grupo donde se determinó que si existen diferencias significativas entre los materiales utilizados en los riegos de liga ($p_{muestra}=1,09E-09<0,05$). Para reforzar esta hipótesis se realizó el análisis de Tukey los cuales se presentan a continuación.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Material para liga	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				

Tabla 3 Análisis de Varianza para los distintos tipos de materiales para riego de liga

		Material de Liga				
Material		Asfalto	CSS-1hL Lanamme	CRS-1h Lanamme	CSS-1h RECOPE	CRS-1 RECOPE
Material de Liga	Asfalto		NO	NO	SI	SI
	CSS-1h Lanamme			SI	SI	SI
	CRS-1h Lanamme				NO	SI
	CSS-1h RECOPE					SI
	CRS-1 RECOPE					

Figura 5: Análisis de Tukey para los distintos tipos de materiales para riego de liga

Como se puede observar en la Figura 5 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.

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" [19] con lo que se obtuvieron los valores de macrotextura para la Mezcla 1 de 0,9847 y para la Mezcla 2 de 0,4671. Los resultados se muestran a continuación.

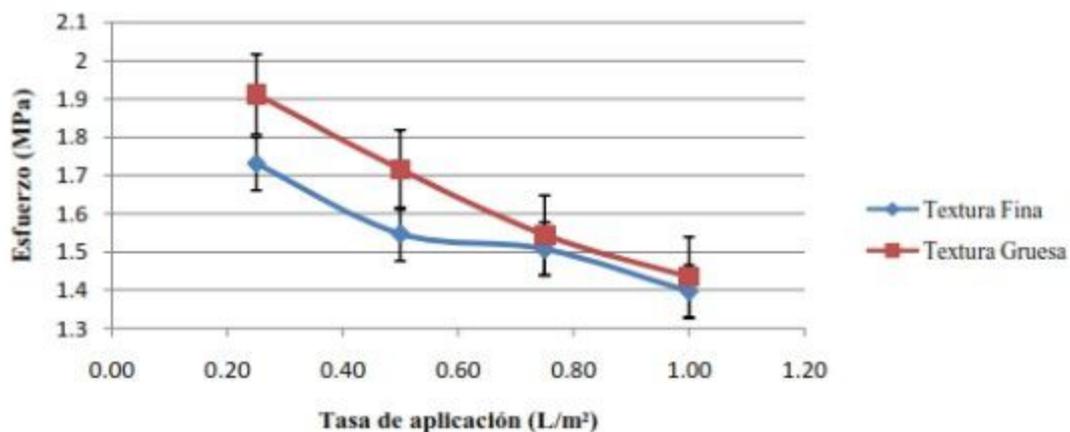


Figura 6. Evaluación de la influencia de la textura en la resistencia del riego de liga.

Para estos resultados se realizó un ANOVA de dos factores con un 95% de confianza con varias muestras por grupo y se determinó que si existen diferencias significativas entre las texturas de la mezcla donde se coloca el riego de liga ($p_{muestra}=1,69E-16 < 0,05$). 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. 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. 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 [20] 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.

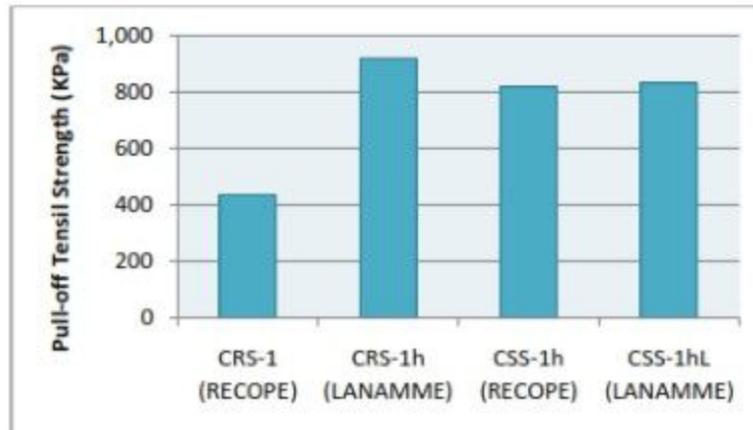


Figura 7. Resultados de evaluación de la adherencia mediante ensayo de ABS para una tasa de aplicación de 1,89 L/m²

Al haber un resultado para la probabilidad mucho menor que 0,05 ($p_{muestra} = 5,68E-06 < 0,05$) se realizó el análisis de Tukey para identificar cuáles son los tipos de emulsión que provocan las diferencias significativas.

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				

Tabla 4: Análisis de Varianza de los resultados de la adhesión con ensayo ABS

		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)				

Figura 8: Análisis de Tukey de los resultados de la adhesión con ensayo ABS

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 es asociado a 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.

4 Conclusiones y recomendaciones.

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. La implementación de este método para evaluar la calidad del material como del proceso constructivo es factible por su sencillez, en donde el criterio de aceptación (para una mezcla y emulsión específica) está definido como la tasa de aplicación con la que se obtiene el mayor esfuerzo cortante.

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.

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.

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.

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.

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

x

- [1] T. Van Dam, K. Kirchner, M. Shahin, and E. Blackmon, "Consequence of Layer Separation of Pavement Performance," Washington, D.C., 1987.
- [2] H. Ziari and M. Khabiri, "Interface Condition on Prediction of Flexible Pavement Life," *Journal of Civil Engineering and Management*, pp. 71-76, 2007.
- [3] Z. Leng, H. Ozar, I.L Al-Qadi, and S.H. Carpenter, "Interface Bonding between Hot-Mix Asphalt and Various Portland Cement Concrete Surfaces: Laboratory Assessment," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 46-53, 2008.
- [4] Nachiketa Bharat Patel, *Factors Affecting the Interface Shear Strength on Pavements Layers*. Louisiana State University: Louisiana State University, 2010.
- [5] L., K. Nam, T. Papagiannakas, K. Willoughby, L. Pierre, and T. Baker Tashman, "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, pp. 154-161, 2008.
- [6] R.C. West, J. Zhang, and J. Moore, "Evaluation of bond strength between pavement layers," Auburn University, Alabama, 2005.
- [7] S. Romanoschi and J. Metcalf, "Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1778, pp. 123-131, 2001.
- [8] Francesco Canestrari, Gilda Ferrotti, Manfred N. Partl, and Ezio Santagata, "Advanced Testing and Characterization of Interlayer Shear Resistance," *Journal of the Transportation Research Board* No.

1929, pp. 69-78, 2005.

- [9] J. Uzan, M. Livneh, and Y. Eshed, "Investigation of Adhesion Properties Between Asphalt Concrete Layers.," Asphalt Paving Technology, 1978.
- [10] R. Leutner, "Investigation of the adhesion of bituminous pavements," Bitumen, 1979.
- [11] Louay N. Mohammad et al., "Optimization of Tack Coat for HMA Placement," Washington D.C., 2012.
- [12] E. Santagata and F. Canestrari, "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, 1994.
- [13] E. K. Tschegg, H. M. Rotter, P. E. Roelfstra, U. Bourgund, and P. Jussel, "Fracture mechanical behavior of aggregate – cement matrix interfaces," in Journal of Materials in Civil Engineering, 1995, pp. 199-203.
- [14] L.N. Mohammad, M.A. Raqib, and B. Huang, "Influence of asphalt tack coat materials on interface shear strength," 2002.
- [15] F. L. Roberts, P. S. Kandhal, E. R. Brown, D. Lee, and T.W. Kennedy, Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, Construction. Lanham: NAPA Education Foundation, 1996.
- [16] USACE, Hot-Mix Asphalt Paving Handbook 2000., 2000.
- [17] F. Chaignon and J.-C. Roffe, "Characterization Tests on Bond Coats: Worldwide Study, Impact, Tests, Recommendations," Toronto, 2001.
- [18] Y. Hachiya and K. Sato, "Effect of Tack Coat on Bonding Characteristics at Interface between Asphalt Concrete Layers," Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, pp. 349-362, 1997.
- [19] G. A. Sholar, G. C. Page, J. A. Musselman, P. B. Upshaw, and H. L. Moseley, "Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2004.
- [20] ASTM D4541, "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers," 2009.
- [21] ASTM E965, "Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique," in E965-15., 2015.
- [22] Jose Pablo Aguiar et al., EVALUACIÓN DE ADHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN COSTA RICA MEDIANTE ENSAYOS BBS Y DE ÁNGULO DE CONTACTO. San José, 2015.
- [23] Ohio DOT, "Proper Tack Coat Application," Columbus, 2001.