

Arturo  
Mendoza Chavero  
Carlos

“Caracterización y evaluación del desempeño de una emulsión con bajo contenido asfáltico”

2020



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

“Caracterización y evaluación del desempeño de una emulsión con bajo contenido asfáltico”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en:

Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Carlos Arturo Mendoza Chavero

Dirigido por:

Dr. Pedro Limón Covarrubias

Querétaro, Qro. a 27 de Noviembre de 2020



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

“Caracterización y evaluación del desempeño de una emulsión con bajo contenido asfáltico”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:  
Ing. Carlos Arturo Mendoza Chavero

Dirigido por:  
Dr. Pedro Limón Covarrubias

Dr. Pedro Limón Covarrubias  
Presidente

Dra. María De la Luz Pérez Rea  
Secretario

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca  
Vocal

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Suplente

Dra. Teresa López Lara  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Noviembre 2020  
México

## RESUMEN

Las emulsiones asfálticas surgen en el año de 1900 y son incorporadas en México durante 1930 como parte del proceso constructivo de las carreteras. Actualmente los principales usos de las emulsiones asfálticas son riegos de impregnación, riegos de liga, riegos de sello, *slurrys*, microaglomerados y reciclados en frío. La presente investigación centra su atención en las emulsiones aplicadas como riegos de liga. Una pobre adherencia entre las capas del pavimento asfáltico trae problemas prematuros como deslizamientos, agrietamientos, baches, desprendimientos, deformaciones, abultamientos y deflexiones, pues debido a la falta de adherencia el pavimento se ve incapaz de trabajar como un elemento continuo y transmitir adecuadamente los esfuerzos del tránsito vehicular. El objetivo de este trabajo es caracterizar y evaluar el desempeño de una emulsión de bajo contenido asfáltico, para ello se caracteriza la emulsión a través de las pruebas contenidas en la normativa mexicana N-CMT-4-05-001/06 y se evalúa su desempeño a través de la prueba de corte directo propuesta por la Universidad de Cataluña, Laboratorio de Caminos de Barcelona (LCB). La metodología propuesta consiste en evaluar el desempeño de una emulsión catiónica de tipo súper estable así como una de tipo rápido variando los contenidos asfálticos (50%, 55% y 60%), la dosificación (0.3 l/m<sup>2</sup> y 0.5 l/m<sup>2</sup>) y los días de curado (1 día, 3 días y 5 días) para lo cual se obtuvieron resultados que muestran que una emulsión súper estable presenta una mayor energía de fractura respecto a la emulsión rápida, que la dosificación de 0.3 l/m<sup>2</sup> satisface las resistencias que provee la dosificación de 0.5 l/m<sup>2</sup>, que la adherencia no mejora significativamente a través del paso de los días para especímenes de laboratorio y que el contenido asfáltico de 55% provee de resistencias y energías de fractura iguales o en algunos casos mayores que los ensayos al 60%.

**(Palabras clave:** emulsión asfáltica, riego de liga, adherencia, ensayo de corte LCB, contenido asfáltico)

## SUMMARY

Asphalt emulsions emerge in the year 1900 and are incorporated in Mexico during 1930 as part of road construction process. Currently, the main uses of asphalt emulsions are impregnation, tack coat, chip seals, slurries, micro agglomerates and cold recycling. The present research focuses its attention on emulsions applied as tack coats. Poor adhesion between layers of asphalt pavement brings premature distresses such as slippage, cracking, potholes, raveling, deformations, bulging and deflections, because due to the lack of adhesion the pavement is unable to work as a continuous element and adequately transmit the efforts of the traffic that circulates along the road. The objective of this work is to characterize and evaluate the performance of an emulsion with a low asphalt content, for which the emulsion is characterized through tests contained in Mexican legislation N-CMT-4-05-001/06 and its performance is evaluated through the direct shear test proposed by the University of Cataluña known as Laboratorio de Caminos de Barcelona (LCB). The proposed methodology consists in evaluate the performance of a cationic emulsion by analyzing a super stable and rapid type, considering as variables the asphalt content (50%, 55% y 60%), the dosage (0.3 l/m<sup>2</sup> and 0.5 l/m<sup>2</sup>) and the curing time (1 day, 3 days y 5 days) for which results obtained showed that a super stable emulsion has higher fracture energy than the rapid emulsion, the dosage of 0.3 l/m<sup>2</sup> satisfies the resistances provided by the dosage of 0.5 l/m<sup>2</sup>, the adhesion do not improve through the passage of the days for laboratory samples and the asphalt content of 55% provides equal resistances and fracture energy or in some cases higher than the 60% trials.

**(Key words:** asphalt emulsion, tack coat, adhesion, LCB test, asphalt content)

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

...a mi madre: Ma. Leonor Chavero Flores  
y a mi padre: José de Jesús Mendoza García

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por bendecirme durante estos años de formación profesional y de vida.

A mis padres Jesús y Leonor por alentarme todos los días a concluir este proceso, por sus consejos y apoyo incondicional durante mi periodo de estudio y por siempre haber creído en mí.

A mis hermanas Karla y Karina por estar siempre a mi lado y por ese cariño singular que me ayudó a cumplir con mis objetivos.

A mi pareja Estefanía por disfrutar a mi lado de este enriquecedor proceso y por incentivarme a concluir con esta meta cada vez que quise desistir.

A mis amigos y compañeros de la maestría por permitirme crecer a la par de ellos y por poder llenar de experiencias únicas nuestra estancia dentro y fuera del programa.

Al Dr. Pedro Limón por haber confiado en mí para trabajar en conjunto y dirigirme durante esta investigación.

A mis profesores de la facultad de Ingeniería y a la Universidad Autónoma de Querétaro por ser parte de mi formación académica, haberme instruido con sus conocimientos, su orientación y darme las herramientas para poder llegar a la conclusión de este trabajo de investigación.

A Surfax SA de CV por otorgarme la oportunidad de desarrollar mi investigación en sus instalaciones durante el periodo de estancia.

A Agacel Agregados y Asfaltos SA de CV por darme la confianza y tiempo para estudiar en el programa de posgrado a la par de mis responsabilidades dentro de la empresa.

## TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN .....	11
1.1	ANTECEDENTES.....	12
1.2	JUSTIFICACIÓN .....	14
1.3	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	16
1.4	HIPÓTESIS.....	16
1.5	OBJETIVO.....	17
2.	REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	18
2.1	TIPOS DE PAVIMENTOS.....	18
2.2	MATERIALES ASFÁLTICOS (EMULSIONES) .....	21
2.3	APLICACIONES (RIEGO DE LIGA).....	24
2.4	ADHERENCIA ENTRE CAPAS .....	25
2.5	NUEVAS TECNOLOGÍAS.....	32
2.6	ENSAYOS DE CORTE .....	33
2.7	ESPECIFICACIONES PARA ADHERENCIA.....	39
2.8	NORMATIVA NLT-382/08.....	42
2.8.1	<i>Aparatos y materiales de prueba.....</i>	<i>43</i>
2.8.2	<i>Procedimiento de ensayo.....</i>	<i>46</i>
2.8.3	<i>Análisis de resultados.....</i>	<i>50</i>
3.	METODOLOGÍA.....	51
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
4.1	RESISTENCIAS PARA ENSAYO LCB EN EMULSIONES ROMPIMIENTO LENTO.....	57
4.2	RESISTENCIAS PARA ENSAYO LCB EN EMULSIONES ROMPIMIENTO RÁPIDO.....	60
5.	CONCLUSIONES .....	66
6.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....	69
7.	LITERATURA CITADA.....	70
8.	ANEXOS .....	77
8.1	ANEXO FOTOGRÁFICO.....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1 PROPORCIÓN DE EMULSIFICANTE. ....	54
TABLA 3.2 DOSIFICACIONES DE EMULSIÓN ASFÁLTICA. ....	55
TABLA 4.1 RESISTENCIAS PARA ENSAYO LCB CON DOSIFICACIÓN DE 0.3 L/M2. (EMULSIÓN ROMPIMIENTO LENTO) .....	57
TABLA 4.2 RESISTENCIAS PARA ENSAYO LCB CON DOSIFICACIÓN DE 0.5 L/M2. (EMULSIÓN ROMPIMIENTO LENTO) .....	59
TABLA 4.3 RESISTENCIAS PARA ENSAYO LCB CON DOSIFICACIÓN DE 0.3 L/M2. (EMULSIÓN RÁPIDA) .....	61
TABLA 4.4 RESISTENCIAS PARA ENSAYO LCB CON DOSIFICACIÓN DE 0.5 L/M2. (EMULSIÓN RÁPIDA) .....	62



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 SECCIÓN PARA PAVIMENTO FLEXIBLE Y PAVIMENTO RÍGIDO. ....	19
FIGURA 2.2 ESFUERZOS TÍPICOS EN EL ENFOQUE CLÁSICO DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS. ....	20
FIGURA 2.3 ESFUERZO CORTANTE EN SISTEMA MULTICAPAS PARA SUPUESTO DE TOTAL ADHERENCIA Y SIN ADHERENCIA. ....	21
FIGURA 2.4 REPRESENTACIÓN DE LA FASE DISPERSA Y LA FASE DISPERSANTE DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA. ....	22
FIGURA 2.5 ETAPAS DEL ROMPIMIENTO DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA. ....	23
FIGURA 2.6 RESUMEN DE VIDAS ÚTILES CON Y SIN ADHERENCIA. ....	26
FIGURA 2.7 TENSIONES DE CORTE SOBRE EL RIEGO PARA DISTINTOS ESPESORES. ....	27
FIGURA 2.8 FENÓMENO DE TRACKING AL APLICAR EMULSIÓN CON PETROLIZADORA. ....	28
FIGURA 2.9 FALLA POR ADHERENCIA EN SECCIÓN DE TEST TRACK EN NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY. ....	29
FIGURA 2.10 ENSAYO DE TRACKING CON RUEDA CARGADA. ....	29
FIGURA 2.11 ENSAYO DE MANCHA DE ARENA PARA PROFUNDIDAD DE TEXTURA. ....	31
FIGURA 2.12 PETROLIZADORA Y PAVIMENTADORA SINCRONIZADA PARA APLICACIÓN PARA RIEGO DE LIGA. ....	33
FIGURA 2.13 FOTOGRAFÍA Y DIAGRAMA DEL MARCO DE CARGA EN EL LEUTNER TEST. ....	35
FIGURA 2.14 DIAGRAMA DE FUERZAS Y ESFUERZOS ACTUANTES EN EL LCB SHEAR TEST. ....	36
FIGURA 2.15 DIAGRAMA DE TRABAJO PARA EL ENSAYO ASTRA. ....	37
FIGURA 2.16 ESQUEMA DE DOUBLE SHEAR TEST. ....	38
FIGURA 2.17 DISPOSITIVO DE PRUEBA LPDS. ....	39
FIGURA 2.18 DIAGRAMA DE CORTE Y DE ESFUERZO NORMAL PARA PAVIMENTO BAJO LA CARGA DEL EJE FRANCÉS ESTÁNDAR. ....	40
FIGURA 2.19 LÍMITES PROPUESTOS PARA ALEMANIA Y SUIZA. ....	41
FIGURA 2.20 ESQUEMA Y FOTOGRAFÍAS DEL DISPOSITIVO DE CORTE A. ....	44
FIGURA 2.21 MORDAZAS SEMICILÍNDRICAS PARA DISPOSITIVO B. ....	45
FIGURA 2.22 DESVIACIÓN MÁXIMA ACEPTABLE. ....	47
FIGURA 2.23 CURVA CARGA-DEFORMACIÓN PARA ENSAYO. ....	47
FIGURA 2.24 CURVAS TÍPICAS PARA DIFERENTES MODALIDADES DE ENSAYOS A CORTE. ....	49
FIGURA 3.1. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTOS. ....	51
FIGURA 3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS. ....	52

FIGURA 3.3 REQUISITOS DE CALIDAD PARA EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIONICAS.....	53
FIGURA 4.1 RESISTENCIAS DEL ENSAYO LCB APLICANDO EMULSIÓN DE ROMPIMIENTO SUPER ESTABLE A RAZÓN DE 0.3 L/M2 .....	63
FIGURA 4.2 RESISTENCIAS DEL ENSAYO LCB APLICANDO EMULSIÓN DE ROMPIMIENTO SUPER ESTABLE A RAZÓN DE 0.5 L/M2 .....	64
FIGURA 4.3 COMPARACIÓN DE ENERGÍA DE FRACTURA ENTRE EMULSIÓN DE ROMPIMIENTO RÁPIDO Y ROMPIMIENTO SÚPER ESTABLE CON 55% DE RESIDUO ASFÁLTICO. ....	65

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## 1. INTRODUCCIÓN

Se entiende que un pavimento puede presentar deterioros por una mala selección de materiales y un considerable incremento en las cargas transmitidas por el tráfico vehicular como afirmaron Raab y Partl (2009), además si se considera una limitada supervisión en el control de calidad de la emulsión asfáltica y su capacidad para ligar dos capas, con seguridad se enfrentarán problemas prematuros como deslizamientos, agrietamientos, baches, desprendimientos, deformaciones, abultamientos y deflexiones reflejados en la capa superior además de una considerable disminución de la vida útil del pavimento como mencionan Wang *et al.*, (2017).

Uno de los factores que más influye en la vida de servicio y el mantenimiento de los pavimentos es la adherencia entre capas la cual se logra mediante un riego de liga delgado y uniforme que cubra completamente el área a pavimentar, garantizando un comportamiento monolítico del pavimento y reduciendo notablemente la probabilidad de aparición de agrietamientos y deformaciones como sostienen Reposeiras *et al.*, (2013). Una alta adherencia entre capas distribuye adecuadamente los esfuerzos transmitidos por el tráfico mientras que una adherencia insuficiente en la unión de capas complementada con condiciones de carga desfavorables puede intensificar los esfuerzos a tensión en la parte inferior de cada capa (Wang *et al.*, 2017)

Si bien los cementos asfálticos en caliente y asfaltos rebajados usados como ligantes presentan mejores niveles de adherencia; no pueden aplicarse uniformemente para cubrir la totalidad de la superficie a trabajar, por lo cual son las emulsiones asfálticas los métodos de adherencia más utilizados en la actualidad debido a su facilidad de aplicación a temperaturas más bajas, la seguridad durante su almacenamiento y aplicación más eficiente como mencionan Ghaly *et al.*, (2014), además los asfaltos rebajados producen componentes solventes volátiles por lo cual las emulsiones asfálticas al carecer de estos componentes son amigables con

el ambiente (*Central Federal Lands Highway Division, 2005*), asimismo las emulsiones asfálticas presentan buena compatibilidad con otros ligantes a base de agua como el látex y cemento, y por sus bajas temperaturas de aplicación reducen la oxidación del asfalto como se afirma en *Transportation Research Board (2006)*.

La presente investigación está orientada a la finalidad de complementar la noción de que una emulsión con bajo contenido asfáltico puede desempeñarse de forma superior al generar un riego más delgado, de menor viscosidad, uniforme y poder penetrar en las irregularidades de la capa que se buscan adherir, creando así una mejor trabazón entre capas como sostienen Ghaly *et al.*, (2014).

### 1.1 Antecedentes

Tschegg *et al.*, (2007) sostienen que durante los últimos años, el estudio del desempeño de la adherencia entre las capas que conforman un pavimento ha ido ganando importancia alrededor de Europa, en consecuencia han surgido investigaciones a partir del modelo de corte de Leutner con el objetivo de estudiar el comportamiento de las capas de adherencia a través del análisis de esfuerzos a tracción, torsión y corte (Reposeiras *et al.*, 2012), donde se identifican algunas variables de mayor trascendencia en la efectividad de la emulsión asfáltica como: tipo del emulsión, contenido asfáltico, dosificación, tipo de mezcla asfáltica, características de la superficie, temperatura de aplicación, tiempo de rompimiento y compactación.

Inspirados en la metodología de prueba del modelo de Leutner, Sholar *et al.*, (2004) realizaron estudios complementarios del análisis de las capas de adherencia donde se observa que las mezclas finas obtienen menor resistencia al deslizamiento que las mezclas gruesas además de que con fines de aporte estructural se recomienda incrementar el espesor de la capa asfáltica o dotar al riego de liga de una resistencia máxima mediante un diseño previo de toda la estructura. Y aunque el sistema en que la emulsión asfáltica se comporta a lo largo

del tiempo ha sido estudiado de una manera limitada, Canestrari *et al.*, (2005) concluyen en sus experimentos que la adherencia mejora con el transcurso del tiempo donde el tráfico induce compactación luego de la construcción generando un efecto positivo en el grado de adherencia, no obstante que esos estudios no fueron llevados a gran escala, la investigación de Raab y Partl (2009) muestra el desempeño a largo plazo de la interacción entre las capas del pavimento y la capa de liga donde se observó que los valores de adherencia mejoran en zonas donde no se presentan deformaciones o agrietamientos pues como afirman Chen *et al.*, (2012) las superficies con deterioros previos donde se aplican riegos de liga se ven mayormente exigidas en la resistencia a la reflexión de grietas y deformaciones.

Un riego de liga al proveer adherencia entre capas y garantizar el comportamiento monolítico requiere de una dosificación óptima y un tiempo de rompimiento en la cual la resistencia a la falla sea máxima para una determinada razón de aplicación como mencionan Mohammad *et al.*, (2002), sin embargo la dosificación no debe de exceder la razón especificada pues puede generar un plano de deslizamiento por el exceso de asfalto (Reposeiras *et al.*, 2012), por lo que se sugiere diseñar un óptimo de emulsión y esperar previo a la colocación de la segunda capa que la emulsión haya roto parcial o totalmente. En términos de dosificación y tiempo de rompimiento de la emulsión asfáltica, Deysarkar (2004) demuestra en su trabajo un mejor comportamiento en muestras con dosificaciones de 0.45 l/m<sup>2</sup> que las muestras de 0.18 l/m<sup>2</sup> y un tiempo de rompimiento de 30-60 minutos para realizar la compactación de la capa superior.

Reposeiras *et al.*, (2013) recomiendan para alcanzar los mayores grados de adherencia considerar mezclas con valores altos de macro textura, bajas temperaturas de aplicación, el uso de emulsiones termo adherentes, una dosificación de 300 a 450 g/m<sup>2</sup> de residuo asfáltico y la compactación luego del rompimiento de la emulsión. Otra variable que influye sobre el desempeño del riego de liga y reduce su capacidad de adherencia es el fenómeno de Desprendimiento de riego por circulación o *tracking* que refiere al desprendimiento de material

asfáltico por causa de las llantas de la pavimentadora o camiones de acarreo de mezcla asfáltica durante el proceso de tendido (Chen *et al.*, 2012) para lo cual se recomienda el uso de productos asfálticos de alta dureza, pavimentadoras sincronizadas y vehículos de transferencia para la colocación de mezcla asfáltica.

## 1.2 Justificación

El asfalto ha sido utilizado para la construcción de carreteras desde la antigüedad ya que sus características de impermeabilidad, cohesión y adherencia le permiten resistir esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, además de su alta capacidad de fungir como aglutinante en la mezcla asfáltica (Salazar, 2011).

Una buena adherencia entre las capas de pavimento puede asegurar que el sistema actúe como una composición uniforme y transfieran de manera efectiva las cargas externas a las sub capas, además una liga débil puede causar deslizamiento y reducir la resistencia al corte hasta un 50% entre las capas del pavimento, llevándonos a un deterioro prematuro del pavimento (Chen *et al.*, 2012). Las fallas por adherencia en pavimentos asfálticos se registran desde años atrás como enuncian Collop *et al.*, (2009), en 1970 se reportó que el 5% de la red de carreteras de Francia presentaba fallas por mala adherencia igualmente en caminos de Reino Unido se reportaron fallas significativas a la *Asphalt and Coated Macadam Association*, en 1980 el *Department of the Environment for Northern Ireland* encontró fallas por adherencia al poco tiempo de haber construido sobrecarpetas y en 2002 44% de una sobrecarpeta en Nevada, EEUU se reportó con deslizamiento, a su vez las fallas provocadas por una mala adherencia son también características de pistas de aeropuertos como se afirma en Hartadi (2009) donde en Japón se reportaron fallas frecuentes en las pistas de aeropuerto en zonas de frenado y giros de los aviones que se traducen en altos esfuerzos de corte que provocan deslizamientos de la capa asfáltica.

Para las especificaciones de Minnesota, el residuo asfáltico mínimo de una emulsión convencional deberá de ser del 57%, mientras que para emulsiones diluidas se permitirá un mínimo de 40% (Johnson *et al.*, 2015), en Wisconsin se permite el uso de emulsiones diluidas hasta 50% permitiendo una distribución más uniforme del riego de liga pues la emulsión presenta una menor viscosidad lo que le permite penetrar en la estructura de la superficie donde se aplica como sostienen Swiertz *et al.*, (2018), aunque se incrementa el tiempo de curado por la mayor cantidad de agua agregada en la emulsión lo cual podría presentar retrasos en el desempeño final del riego.

Actualmente se tiene registro de algunas pruebas indicativas de la calidad de una emulsión asfáltica de tipo catiónica como las recomendadas en Salazar (2011), donde se mencionan la viscosidad Saybolt Furol, prueba de estabilidad a 24 h, demulsibilidad, prueba de carga eléctrica de partícula, prueba de tamizado, destilación y aceite destilado, solubilidad en tricloroetileno, penetración a 25°C y ductilidad a 25°C. Por otro lado están las pruebas de calidad incluidas en Secretaría de Comunicaciones y Transportes N-CMT-4-05-001/06 (2006) contenido de cemento asfáltico, viscosidad Saybolt Furol a 50°C, asentamiento en cinco días, retenido en malla No.20, pasa malla No. 20 y retiene en malla No. 60, cubrimiento del agregado seco, cubrimiento del agregado húmedo, carga eléctrica de las partículas, disolvente en volumen, índice de ruptura y para el residuo de destilación Viscosidad dinámica a 60°C, penetración a 25°C, solubilidad y ductilidad a 25°C.

En Ontiveros (2013) se sostiene que el conjunto de pruebas incluidas en la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes son indicativas de la calidad de la emulsión asfáltica pero no describen el comportamiento mecánico que tendrá al trabajar como una capa de adherencia, adicional a que en la mayoría de los casos el control en campo se limita a una inspección visual basada en la experiencia o conveniencia y una revisión de la dosificación aplicada ya que las agencias de transporte no tienen una propia metodología para cuantificar los efectos de una mala adherencia (Chen, 2010). Adicional la industria de mezclas asfálticas

ha aceptado el uso de las propiedades reológicas para medir el desempeño del asfalto, sin embargo para las emulsiones asfálticas continúan usándose los ensayos tradicionales como se afirma en *Transportation Research Board* (2007). Por ello se propone el complemento de pruebas que nos permitan caracterizar la emulsión y a su vez evaluar el desempeño mediante ensayos de adherencia.

### 1.3 Descripción del problema

Actualmente, la normativa Secretaría de Comunicaciones y Transporte N-CMT-4-05-001/06 (2006) describe un procedimiento básico de control de calidad en materiales asfálticos, aditivos y mezclas usados en la construcción de pavimentos en México. La normativa enuncia en su Tabla 7 los requisitos y especificaciones mínimos para aceptar una emulsión asfáltica catiónica, sin embargo, las pruebas descritas tienden únicamente a caracterizar la emulsión sin lograr evaluar el desempeño de la misma. Por lo anterior, se observó la conveniencia de revisar las especificaciones nacionales con los productos asfálticos actuales, así como complementar la normativa con pruebas que además de caracterizar una emulsión asfáltica evalúen su comportamiento mecánico y reflejen el grado de adherencia al momento de trabajar como capa de riego de liga en la estructura de un pavimento.

### 1.4 Hipótesis

Una emulsión de rompimiento controlado con contenido asfáltico de 54% trabajada como riego de liga presenta resistencia al corte de  $6 \pm 1$  kN medida a partir de su comportamiento mecánico mediante el ensayo LCB de corte directo. La emulsión asfáltica propuesta presenta un grado de adherencia similar a la emulsión estandarizada en la N-CMT-4-05--001/06.



## 1.5 Objetivo

Caracterizar emulsiones asfálticas catiónicas de rompimiento súper estable y de rompimiento rápido por medio de la normativa de Secretaría de Comunicaciones y Transporte propuesta en la normativa mexicana N- CMT-4-05-001/06 para control de calidad de materiales asfálticos. Además, se busca probar el ensayo Laboratorio de Caminos de Barcelona (LCB) propuesto por la Universidad de Cataluña como un indicador del grado de adherencia que presenta la emulsión asfáltica utilizada como riego de liga al ser aplicada en una interfaz de mezcla asfáltica-emulsión-mezcla asfáltica y reforzar la iniciativa de incorporar esta prueba de tipo mecánico como complemento al control de calidad de las emulsiones asfálticas.

De forma paralela se evaluará el desempeño que tiene una emulsión súper estable respecto a una de rompimiento rápido calculando la energía de fractura para contenidos asfálticos de 50, 55 y 60% con 1, 3 y 5 días de curado a dosificaciones de 0.3 y 0.5 l/m<sup>2</sup>.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1 Tipos de pavimentos

Un pavimento es el conjunto de capas comprendidas entre el nivel de terracería y el nivel de la superficie de rodamiento como sostiene Rico (2012), lo cual puede involucrar algunas de las capas más comunes como son la sub-base, base y una superficie de rodamiento que dependiendo de los materiales de que está hecha puede clasificar al pavimento como flexible (concreto asfáltico) o rígido (concreto hidráulico). Ya sea flexible o rígido, el pavimento debe de satisfacer las exigencias económicas, de comodidad y de seguridad proporcionando una estructura vial capaz de resistir el constante tránsito de vehículos y los esfuerzos que éstos transmiten a las capas subsecuentes.

Los pavimentos analizados desde los materiales con que son construidos y su comportamiento mecánico están clasificados como pavimentos flexibles y rígidos, un pavimento flexible consiste en una estructura conformada por capas siendo enunciadas en forma ascendente la capa subrasante, la subbase, la base y en su superficie una capa relativamente delgada de concreto asfáltico (Rico, 2012). Por otro lado un pavimento rígido puede tener una capa de subbase entre la subrasante y la capa en su superficie caracterizada por una losa de concreto hidráulico cuyo espesor es considerablemente mayor en comparación con las capas de concreto asfáltico como ilustra la figura 2.1. Complemento de los dos tipos de pavimentos ya mencionados se presentan los pavimentos semi rígidos que están conformados por un pavimento flexible desplantado en una base cuya rigidez es alta por la adición de cemento.



Figura 2.1 Sección para pavimento flexible y pavimento rígido.  
Fuente: Rico (2012)

En la actualidad se consideran dos modelos para el diseño de pavimentos, los que basan el comportamiento en función del agrietamiento por fatiga y el de deformación permanente (Hartadi, 2009) como se muestra en la figura 2.2 donde se ejemplifica el origen del fisuramiento en la capa asfáltica iniciando desde la fibra inferior que se encuentra trabajando a tensión, así como la deformación permanente de la capa subrasante que resulta en deformación plástica de la superficie.

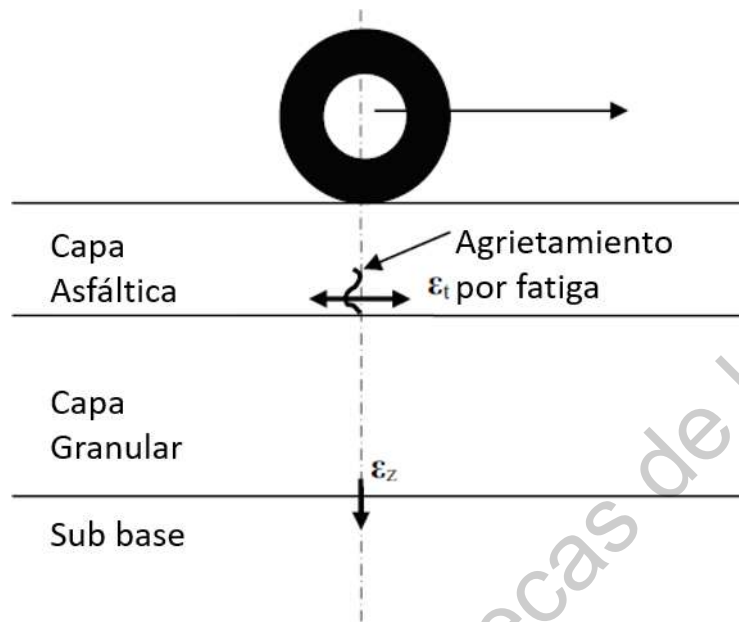


Figura 2.2 Esfuerzos típicos en el enfoque clásico del diseño de pavimentos.  
Fuente: Hartadi (2009)

Parte fundamental de la metodología de diseño es la respuesta del pavimento traducida en esfuerzos, deformaciones y deflexiones generados para cada capa estructural ante la reiteración de cargas vehiculares. El desarrollo de soluciones a estas respuestas ha sido complementada durante años a partir de teorías de esfuerzos-deformaciones por investigadores como Boussinesq, Burmister, Jones, Ulery, Peattie, Hogg, Odemark, Huang, Fox, entre otros, como mencionan Coria *et al.*, (2018). En el sistema multicapas de un pavimento, el cálculo de respuesta estructural se realiza con el supuesto de que existe una adherencia total entre todas las capas, sin embargo, tal supuesto no siempre se cumple (Ontiveros, 2013) como se ilustra en la figura 2.3 la cual ejemplifica la solución tabular de Fox para esfuerzos normales y radiales en un modelo con área circular cargada considerando en un caso adherencia total permitiendo a cada capa la correcta transferencia y distribución de esfuerzos hacia la capa subsecuente

y en otro caso la no adherencia total entre las capas del pavimento provocando que las esfuerzos se concentren en las capas superiores.

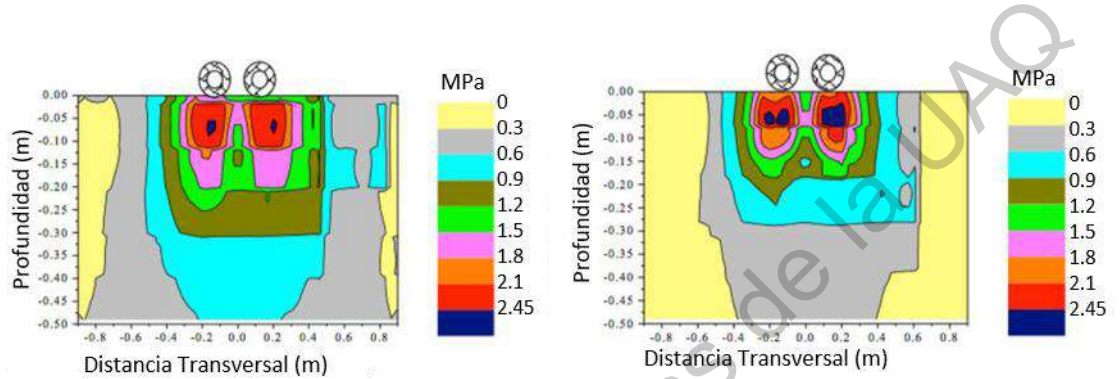


Figura 2.3 Distribución del esfuerzo cortante en sistema multicapas para supuesto de total adherencia y sin adherencia.

Fuente: Ontiveros (2013)

## 2.2 Materiales asfálticos (emulsiones)

El asfalto es un material bituminoso de color negro constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad como se menciona en Secretaría de Comunicaciones y Transporte N-CMT-4-05-001/06 (2006). Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados. Rodríguez *et al.*, (2001) también describieron al asfalto como una mezcla de hidrocarburos que por su análisis químico se reporta en dos fracciones, la fracción pesada de asfaltenos y la fracción ligera de maltenos que a su vez puede ser subdividida en parafinas, resinas y aceites aromáticos.

Desde la percepción fisicoquímica, una emulsión es una dispersión de un líquido en otro no miscible. Para el caso de una emulsión asfáltica, ésta es una dispersión de finas gotas de asfalto, estabilizadas en una fase acuosa por la presencia de un agente emulsificante. Básicamente, una emulsión está constituida por asfalto, agua, un emulsificante, y en algunos casos puede incorporarse un

aditivo como menciona *Transportation Research Board* (2006). Las emulsiones asfálticas son sistemas compuestos de dos fases donde la fase continua se representa por la parte dispersante (agua y emulsificante) y la fase discreta representada por la parte dispersa (asfalto) como ilustra la figura 2.4.

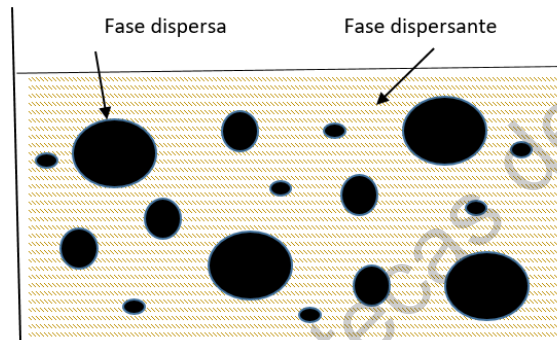


Figura 2.4 Representación de la fase dispersa y la fase dispersante de una emulsión asfáltica.

Fuente: Elaboración propia.

Si bien las emulsiones asfálticas son clasificadas generalmente de acuerdo al tipo de surfactante utilizado (según la carga eléctrica que rodea la partícula de asfalto), también se consideran una característica importante al caracterizar las emulsiones (Ibañez, 2003): la tasa de sedimentación, que cuantifica la rapidez con la cual coalescen las partículas suspendidas de asfalto o cuán rápido se rompe la emulsión por evaporación del agua, y que es afectada por el tipo y concentración de emulsificante y las condiciones atmosféricas como se observa en la figura 2.5 y la viscosidad la cual se busca que sea suficientemente baja para poder dispersarse en gotas cercanas al tamaño de un micrón durante su proceso de mezclado en un molino coloidal que suele girar a 3000 RPM. Wang *et al.*, (2017) sostienen que los tipos de emulsiones más comunes incluyen las SS (*Slow Setting*) o de rompimiento lento como SS-1, SS-1h, CSS-1 y CSS-1h y las RS (*Rapid Setting*) o de rompimiento rápido como RS-1, RS-2, CRS-1, CRS-2, CRS-2P (modificadas con polímero) y CRS-2L (modificadas con látex). El proceso de rompimiento de una emulsión asfáltica como describe Redman (2010) consiste en una primera instancia de

floculación donde las partículas presentan cierta distribución que permite el almacenaje, después la coalescencia donde las partículas de asfalto juntas se vuelven mayores disminuyendo la fase continua y por último el rompimiento donde las partículas de asfalto caen al fondo por la inestabilidad creando una película asfáltica constante.

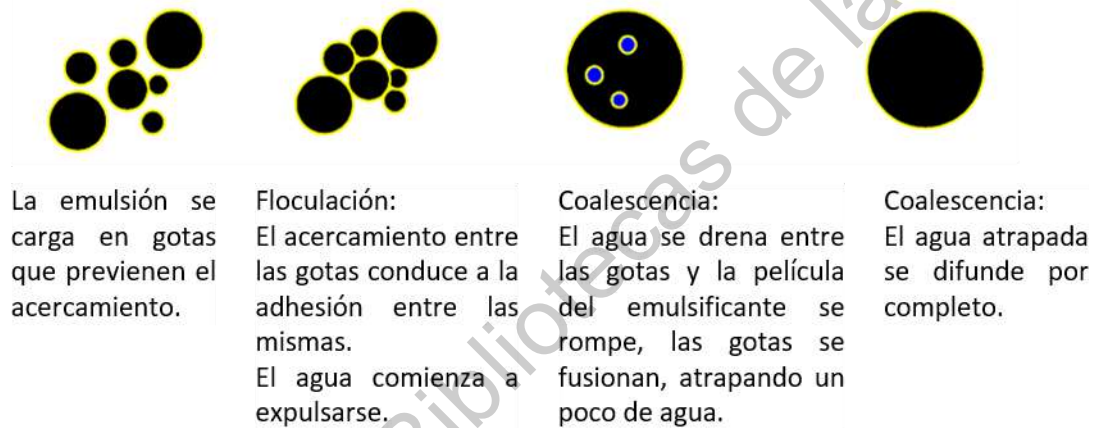


Figura 2.5 Etapas del rompimiento de una emulsión asfáltica.  
Fuente: *Transportation Research Board* (2006)

Las emulsiones de Rotura Rápida (RS) se utilizan principalmente en tratamiento de superficies. Estas emulsiones interactúan rápidamente con el agregado, y revierten la emulsión a asfalto. Este tipo de emulsiones produce películas resistentes y algunos grados (RS-2 y CRS-2) tienen altas viscosidades, para prevenir el escurrimiento, y que una vez formada la capa, ésta no se desprenda con facilidad. Estas propiedades la hacen ideal para aplicaciones de rociado, tales como en bacheos, sellos arenosos y tratamientos superficiales.

Las emulsiones de Rotura Lenta (SS) son diseñadas para un tiempo máximo de mezcla con los agregados. Su largo tiempo para la manipulación asegura buen cubrimiento con grados densos, de agregados con un alto contenido de finos. Su aplicación se extiende, además de la pavimentación, a otros usos industriales. Para tales propósitos, la viscosidad de las emulsiones es baja y puede

ser reducida aún más con la adición de agua. Si se desea aumentar la velocidad de rotura, puede ser añadido un pequeño porcentaje de cemento Portland o cal hidratada, durante la producción de la mezcla. Las emulsiones de rompimiento lento son las más usadas ya que aportan una mayor resistencia en la interfaz como afirman Banihashemrad *et al.*, (2018) en 27 secciones de ensayo con 7 tipos de emulsiones a varias dosificaciones, además proveen un volumen adicional al sistema para trabajar a dosificaciones más bajas y fluyen con mayor facilidad a temperaturas ambiente permitiendo una aplicación más uniforme como sostienen Tashman *et al.*, (2006), sin embargo no se recomiendan como riego de liga para los casos particulares de pavimentación en clima frío y trabajos nocturnos.

### 2.3 Aplicaciones (riego de liga)

Las emulsiones asfálticas, pueden ser utilizadas en una gran variedad de aplicaciones, desde la construcción, mantenimiento y pavimentación de carreteras y aeropuertos, hasta aquellas en las que el objetivo que se persigue es un cubrimiento que actúe como una capa protectora. Entre las más importantes se tienen:

- Fabricación de morteros asfálticos para impermeabilización.
- Impermeabilizaciones en automóviles, viviendas, y tableros de puentes.
- Control de erosión de suelos.
- Bacheos.
- Cubrimientos anticorrosivos de tuberías subterráneas.
- Riegos especiales de protección de taludes, canales, obras hidráulicas.
- Estabilización de suelos, lechadas bituminosas.
- Riegos antipolvo en la industria del carbón.
- Construcción de carpetas de rodamiento.
- Riegos de impregnación.
- Slurrys y microaglomerados.



- Riegos de sello.
- Riegos de liga.
- Reciclados en frío.

Un riego de liga es considerado un procedimiento muy simple y relativamente barato, es indispensable en el proceso constructivo total de los pavimentos y no obstante que representa el 1% del costo total de un pavimento, un mal desempeño podría resultar en la pérdida del 30 al 100% de la inversión inicial como sostienen Stasiuk *et al.*, (2018) donde una mala calidad de la emulsión o un inapropiado grado de dosificación son los principales factores que originan agrietamientos por deslizamiento de las capas asfálticas. Su principal función es asegurar la adherencia entre la superficie existente y la carpeta asfáltica nueva para prevenir deterioros por deslizamientos (Johnson, 2015), aunque hay recomendaciones que sugieren poder omitir el riego de liga en mezclas asfálticas en caliente con espesores mayores a 100 mm como se menciona en *Central Federal Lands Highway Division* (2005).

#### 2.4 Adherencia entre capas

Según mencionan Vaitkus *et al.*, (2012) existen tres modelos de adherencia en capas asfálticas, la primera es una “adherencia completa” donde las capas actúan de forma monolítica con una alta resistencia a fallar por deslizamiento y nada de deformaciones, sin embargo es un modelo teórico, la segunda es una “adherencia parcial” generada a partir de la trabazón entre los agregados que conforman dos capas mediante la forma de sus partículas o un agente ligante, la cual registra bajas deformaciones, por último la “adherencia nula” donde la fricción y adherencia ocurre sólo como resultado de la carga y peso propio de la capa por lo cual presenta baja resistencia al deslizamiento y deformaciones grandes derivadas del desplazamiento.

Una completa adherencia no siempre es alcanzada en los pavimentos lo cual trae como consecuencia deslizamientos entre la interfaz de la capa de base y la capa asfáltica afectando la distribución de esfuerzos, tensiones y deflexiones debajo de la estructura que a su vez se reflejan en la superficie como deformaciones reduciendo significativamente la vida útil del pavimento (Chen 2010; Jaskula 2014). Esta vida del pavimento puede reducirse según D'Andrea y Tozzo (2012) un 16% si el deterioro está a nivel de base y hasta un 40% si el deterioro se ubica en la capa de rodamiento, además los esfuerzos máximos de tensión se vuelven excesivos en algunos puntos particulares de caminos donde la carga horizontal se incrementa como curvas, intersecciones y zonas de gradientes ascendentes y descendentes causando fallas en la superficie (Hartadi, 2009). Las investigaciones de fallas por adherencia son también características de aeropuertos y analizadas en Hachiya y Sato (1997) donde se evaluaron superficies de aeropuerto en Japón modelando condiciones de esfuerzo a través de un Boeing 747 con una emulsión convencional y otra polimerizada siendo la última la de mejor comportamiento. La figura 2.6 ilustra un resumen de vidas útiles con y sin adherencia para cuatro tipos de estructuras analizadas por Giovanon y Buono (2008) en donde se generaliza que los vehículos pesados transmiten esfuerzos de corte entre 0.3 y 0.8 MPa.

Estado de la interfase	Vida útil			
	Estructura1	Estructura2	Estructura 3	Estructura 4
	Base asfáltica		Base granular	
Adherida	15 años	19 años	7 años	5 años
No adherida	4 años	5 años	3 años	2.5 años
Relación Vida Útil	27 %	26 %	43 %	50 %

Figura 2.6 Resumen de vidas útiles con y sin adherencia.  
Fuente: Giovanon y Buono (2008)

El uso de emulsiones asfálticas convencionales como capas de liga puede causar problemas de resistencia debido a que una vez curado el residuo asfáltico, éste se pega en los neumáticos de los vehículos y camiones de construcción que transitan la vía como afirman Miró *et al.*, (2006) además de que esta disminución en el nivel de adherencia combinada con una determinada distribución de esfuerzos y deformaciones en un sistema multicapas como un pavimento flexible, genera mayor deformación en la estructura y una menor vida de servicio. Estos fenómenos de degradación asociados a la falta de adherencia son también comunes y aparecen con mayor facilidad en la superficie de estructuras menores a 25 mm (Diakhaté *et al.*, 2007) donde el espesor es incapaz de disipar los esfuerzos a los que es sometida la estructura. Giovanon y Buono (2008) también afirma que las tensiones generadas por el tránsito a través de la capa de rodamiento y transmitidas hacia capas inferiores de la estructura tienden a aumentar cuando se disminuye el espesor de la carpeta como se ilustra en la figura 2.7.

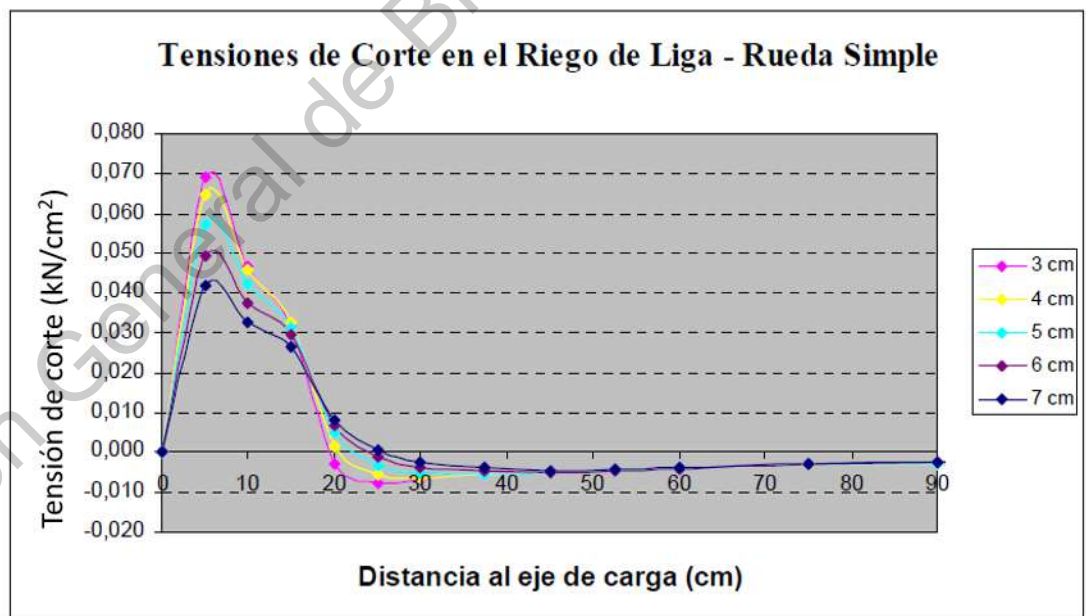


Figura 2.7 Tensiones de corte sobre el riego para distintos espesores.  
Fuente: Giovanon y Buono (2008)

Otra variable durante el proceso constructivo que repercute en un mal grado de adherencia es el fenómeno de desprendimiento de riego por circulación o *tracking* para lo cual investigaciones han promovido el uso de emulsiones termo adherentes las cuales además presentan una mayor resistencia al deslizamiento respecto a las emulsiones convencionales como menciona Chen *et al.*, (2012). La figura 2.8 ilustra el fenómeno de desprendimiento en campo con el uso de emulsiones convencionales y equipo distribuidor conocido como petrolizadora y la figura 2.9 una falla típica en pavimentos flexibles por falta de adherencia. El desprendimiento propiamente depende del tiempo de curado de la emulsión y de la temperatura de la superficie, pero más importante de las propiedades reológicas del residuo como afirman Lv y Bahia (2018) ya que la evaporación del agua ocurre en un periodo muy corto luego de su aplicación, sin embargo si el residuo no es lo suficientemente rígido, el desprendimiento por circulación continuará aún después del curado por lo cual se recomienda el uso de productos asfálticos de alta dureza, pavimentadoras sincronizadas y vehículos de transferencia para la colocación de mezcla asfáltica. La figura 2.10 ilustra un ensayo que simula la susceptibilidad que tendrá la emulsión asfáltica al desprendimiento en campo a través de una rueda cargada.



Figura 2.8 Fenómeno de desprendimiento de riego por circulación al aplicar emulsión con petrolizadora.

Fuente: West *et al.*, (2005)



Figura 2.9 Falla por adherencia en sección de Pista de Pruebas en Centro Nacional de Tecnología del Asfalto  
Fuente: Elaboración propia.



Ensayo de Rueda cargada



Sin desprendimiento



Con desprendimiento

Figura 2.10 Ensayo de Desprendimiento con rueda cargada.  
Fuente: Lv y Bahia (2018)

El tipo de superficie adherida también ha sido analizada por varios investigadores, algunas revisiones en campo como observó Johnson (2015) concluyen que las superficies fresadas producen mejores esfuerzos a corte, en especial en tramos trabajados con pavimentadoras de riego sincronizado. Sholar *et al.*, (2004) presentan valores en secciones de superficies fresadas con esfuerzos de 0.83 MPa. Otras investigaciones correlacionan el desempeño del riego de liga con las características de la superficie y el como la textura influye en la interacción de la llanta, camino, ruido, fricción húmeda para lo cual se realizan combinación de ensayos de corte, mancha de arena, péndulo inglés y adquisición de imagen laser de la superficie (D'Andrea *et al.*, 2013). Sapei y González (2014) aseguran que la profundidad a la que debe penetrar el riego de liga colabora directamente en el desempeño de la adherencia además de diseñar la dosificación más conveniente de acuerdo a la capa a tratar y el tiempo de rompimiento para garantizar valores de adherencia de entre 0.4 a 0.6 MPa. La figura 2.11 ilustra la profundidad de textura a partir la prueba de la mancha de arena. Si bien la superficie a ligar debe estar libre de polvo, hay estudios que refieren que el polvo proveniente del fresado de mezcla asfáltica puede generar ventajas en la adherencia de la sobrecapa West *et al.*, (2005), ésto en razón al efecto del polvo en la superficie combinado con el asfalto que forma un *mastic* de alta viscosidad, además de que las partículas de arena pueden representar una malla en la interfaz que aumenta la resistencia al deslizamiento como afirman Mohammad *et al.*, (2012).

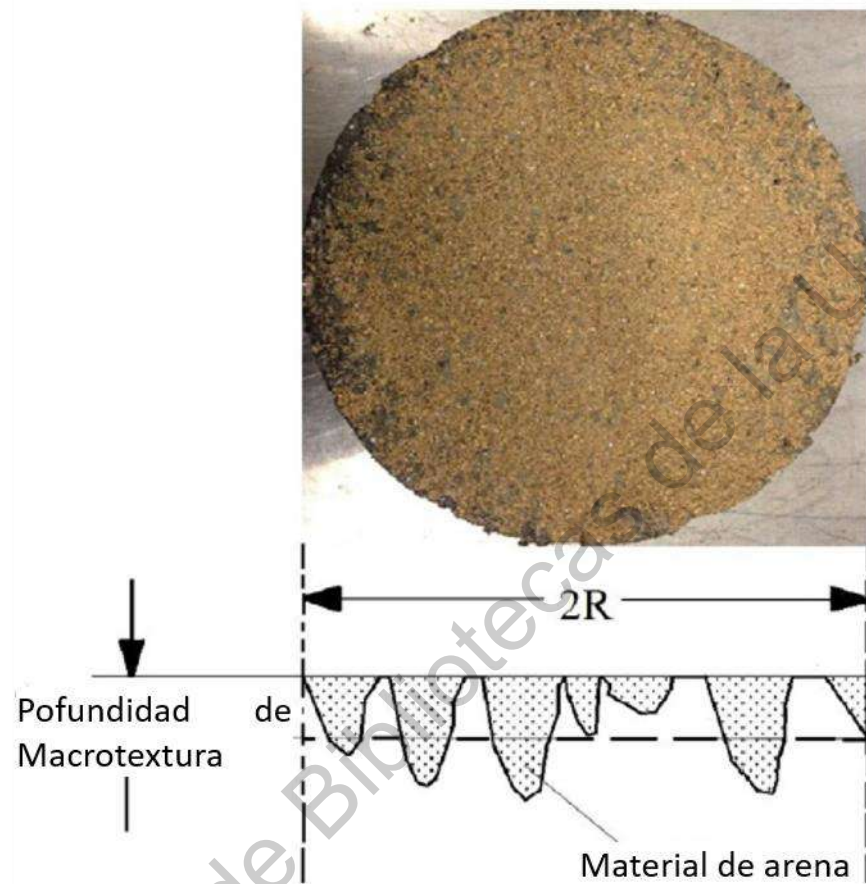


Figura 2.11 Ensayo de Mancha de arena para profundidad de textura.  
Fuente: Song *et al.*, (2015)

Mohammad *et al.*, (2002) registraron la influencia de la temperatura de ensayo en los valores de adherencia donde el esfuerzo máximo fue de 0.42 MPa a 25°C y 0.12 MPa para 55°C, además se observó que para los 25°C los esfuerzos de corte fueron del 83% del esfuerzo total de cohesión en la mezcla lo que sugiere que la construcción de pavimentos flexibles en capas provoca puntos débiles con mayor posibilidad de falla en la interfaz.

## 2.5 Nuevas tecnologías

Los pavimentos capaces de reducir la aparición de grietas a través de calor reducen costos de mantenimiento y extienden la vida de servicio, minimizando la emisión de gases invernadero, esta tecnología de calor inducido aplicable a materiales que poseen la capacidad de sanar ante la exposición de daños térmicos como polímeros, metales, vidrio, y asfalto, es considerada una nueva forma de incrementar la durabilidad y vida útil del pavimento como afirman Ayar *et al.*, (2015), sin embargo esta tecnología continúa limitada a ensayos de laboratorio.

Las nuevas tecnologías e innovaciones en maquinaria y procesos aportan ventajas rumbo a una mejor adherencia entre capas además de que contribuyen a la mejora de procedimientos constructivos buscando la durabilidad de los pavimentos rumbo a un desarrollo sustentable (Roffé, 2017). Las pavimentadoras sincronizadas presentan ventaja en tiempo, calidad, costo, y efectividad sobre los métodos tradicionales de aplicación con petrolizadora, aunque pueden presentar problemas de funcionamiento como mencionan Wang *et al.*, (2017). La influencia del tipo de compactación sobre el nivel de adherencia en capas asfálticas fue investigada por Jaskula (2014) donde se confirma que una compactación eficiente produce una mayor resistencia al deslizamiento incluso en ensayos sin riego de liga, se ensayaron compactaciones con rodillos sin vibración, rodillos con vibración, compactadores giratorios y placas vibratorias donde las mayores resistencias se obtuvieron para casos con compactador giratorio.



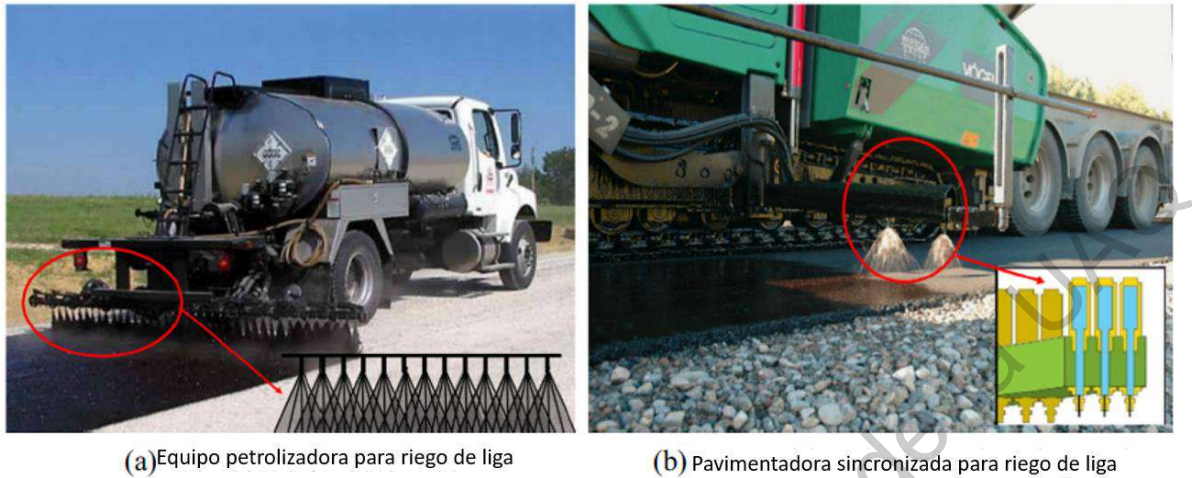


Figura 2.12 Petrolizadora y pavimentadora sincronizada para aplicación para riego de liga.

Fuente: Wang *et al.*, (2017)

La interfaz de adherencia entre mezcla asfáltica y concreto de cemento Portland es una de las variables más significativas que afecta la vida de servicio de un pavimento como afirman Leng *et al.*, (2008) pues la diferencia de módulos hace más probable que se produzca una falla por deslizamiento, además la superficie de concreto es de mayor absorción por lo cual requiere mayor dosificación de emulsión. También las diferencias físicas y mecánicas del acero y el concreto asfáltico resultan en una incompatibilidad pronunciada que produce un plano de falla como sostienen Yao *et al.*, (2016), por lo cual en la construcción de puentes de acero con autopistas se usan adherentes del tipo termo adherente como epóxico asfáltico y resina epóxicas los cuales alcanzan resistencias de entre 1.92 a 2.65 MPa o asfaltos modificados con resistencias de entre 0.36 a 0.65 MPa.

## 2.6 Ensayos de corte

Con el fin de evaluar la adherencia entre las capas de mezcla asfáltica unidas mediante emulsión asfáltica existen modelos de resistencia al corte, resistencia a la tensión y resistencia a la torsión. Los modelos más representativos son: el ensayo LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona) de la Universidad de

Cataluña en España, ASTRA (*Ancona Shear Testing Research and Analysis*) de la *Università Politecnica delle Marche* en Italia, SHSTM (*Sapienza Horizontal Shear Testing Research and Analysis*) de la *Sapienza University of Rome* en Italia, FDOT (*Florida Department Of Transportation*) en USA, UTEP *Pull Off Test* de la *University of Texas El Paso* en USA, *Torque Bond Test* y LPDS (*Layer - Parallel Direct Shear*). Complemento de las pruebas mecánicas existentes para el análisis de la resistencia al corte, como mencionan Wang *et al.*, (2017) también existen enfoques más avanzados para un análisis profundo de características de adherencia como Elemento Finito, Tomografías X-Ray, Deflectómetro de Impacto e Correlación de Imágenes Digitales.

Pruebas estáticas y dinámicas se han desarrollado para medir la fuerza de adherencia entre dos capas de mezcla asfáltica como sostiene Zamora *et al.*, (2010). Por lo anterior, el dispositivo Leutner diseñado en Alemania en 1979 es un ensayo claro y franco de resistencia al corte que provee valores de resistencia en un área de dos muestras con diámetro de 150 mm sometidas a un desplazamiento cortante de 50 mm/min y una temperatura estandarizada de 20 °C. La prueba Leutner es precursora de los estudios de adherencia entre capas de pavimento e inspiró los modelos del ensayo FDOT y el ensayo LCB tal como afirman Reposeiras *et al.*, (2012). Collop *et al.*, (2009) retomaron el modelo de Leutner ilustrado en la figura 2.13 y propuso la modificación de un desfase de 5 mm en el plano de corte para reducir los daños al borde causados por una falta de alineación de la interfaz del espécimen con respecto al plano de corte y obtuvieron valores de esfuerzo cortante de entre 1.12 a 2.68 MPa así como desplazamientos de entre 1.05 a 2.44 mm en una capa de adherencia de 14 mm de espesor.

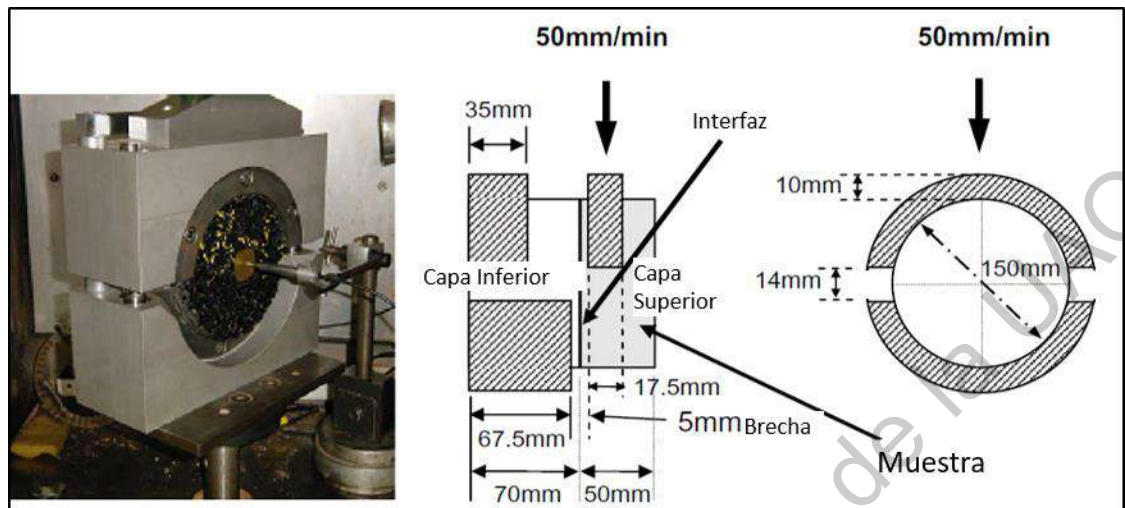


Figura 2.13 Fotografía y diagrama del marco de carga en la prueba Leutner.  
Fuente: Collop *et al.*, (2009)

Hartadi (2009) presenta modelos característicos de fallas por una mala adherencia, la falla por corte, la falla por tensión y la falla por corte-tensión, siendo las fallas por corte las más representativas en campo lo que nos lleva a mencionar los ensayos de resistencia al corte como los métodos más comunes para el estudio de la adherencia entre capas de pavimentos gracias a su similitud con los esfuerzos por deslizamiento como concluyen Reposeiras *et al.*, (2013). Como necesidad de estudiar el desempeño de los riegos de liga surgió una prueba de resistencia al corte conocida como LCB desarrollada por el Laboratorio de Caminos de Barcelona en la Universidad de Cataluña en España ilustrada en la figura 2.14. Miró *et al.*, (2005) realizaron una comparativa entre emulsiones convencionales, emulsiones termo adherentes convencionales y emulsiones termo adherentes modificadas evaluando la respuesta mecánica del riego de liga a través de una prueba LCB capaz de medir los esfuerzos tangenciales provocados por la fuerza cortante aplicada a la capa de adherencia entre las dos capas y en donde se concluyó que la resistencia al corte en emulsiones convencionales mejora con respecto al paso del tiempo mientras que para emulsiones termo adherentes la resistencia se ve reducida en especial a bajas temperaturas.

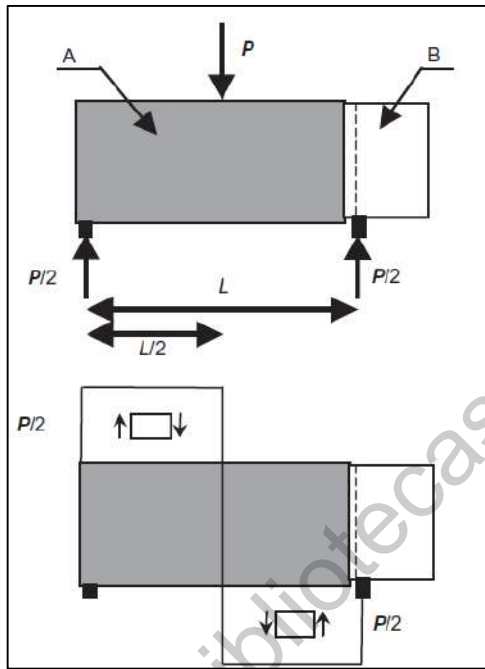


Figura 2.14 Diagrama de fuerzas y esfuerzos actuantes en la prueba de corte LCB.

Fuente: Miró *et al.*, (2005)

Canestrari *et al.*, (2005) sostienen que el desempeño de sistemas de pavimentos multicapa depende en gran parte de la adherencia entre capas mediante un riego de liga con emulsión asfáltica durante la construcción de las capas asfálticas, eliminando la posibilidad de producirse deslizamiento entre las superficies de contacto. En consecuencia a la necesidad de estudiar el grado de adherencia entre capas de un pavimento surge *Ancona Shear Testing Research and Analysis* (ASTRA) ilustrado en la figura 2.15 propuesta por la *Università Politecnica delle Marche* en Italia para investigaciones de caracterización y prueba de resistencia al corte entre capas. Mediante la prueba se pueden simular las condiciones de carga normal y de esfuerzos a corte de un pavimento en servicio. El dispositivo se basa en el análisis del tipo de tratamiento de la superficie, tiempo de curado de la emulsión asfáltica, preparación del espécimen, temperatura y fuerza

normal aplicada en especímenes prismáticos y cilíndricos. Se utilizaron 300 g/m<sup>2</sup> de residuo bituminoso (Canestrari y Bocci 1997) y se simuló una carga normal de 0.0, 0.2 y 0.4 MPa a una razón de 2.5 mm/min evaluando una emulsión convencional, modificada y sin emulsión.

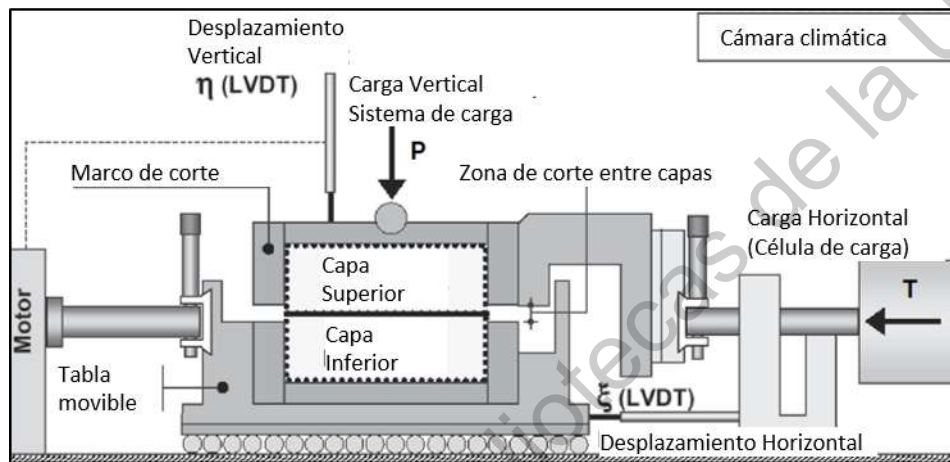


Figura 2.15 Diagrama de trabajo para el ensayo ASTRA.  
Fuente: Canestrari *et al.*, (2005)

La influencia del tipo de capa adherente, la dosificación, la viscosidad y la temperatura de la interfaz de esfuerzo cortante fue analizada por Ghaly *et al.*, (2014) donde se concluyó que los riegos de liga aplicando emulsiones asfálticas de baja viscosidad son más efectivos que los riegos de liga con emulsiones de alta viscosidad, así como el hecho de que la resistencia al corte incrementa significativamente al incrementar la dosificación y disminuye con un aumento de temperatura. Lo anterior se verificó utilizando el *Shimadzu Universal Testing Machine* con dosificaciones de 0.05, 0.15, 0.25 y 0.35 l/m<sup>2</sup> a temperaturas de 25 y 60 °C.

Otra variante similar en geometría y aplicación de carga mecánica es el modelo de doble cortante ilustrado en la figura 2.16 e introducido por la *Université de Limoges* en Francia y puesto a prueba por Diakhaté *et al.*, (2011) para conducir

un estudio fiable del desempeño a la fatiga de la interfaz durante la etapa del diseño de pavimento que pueda repercutir en la durabilidad del mismo reduciendo deterioros prematuros. A través de tres especímenes se evaluó la condición de con emulsión y sin emulsión en una temperatura de prueba de 10°C y 20°C concluyendo que la pendiente de la ley de fatiga de la capa de adherencia no es influenciada por el tipo de interfaz a los 10°C.

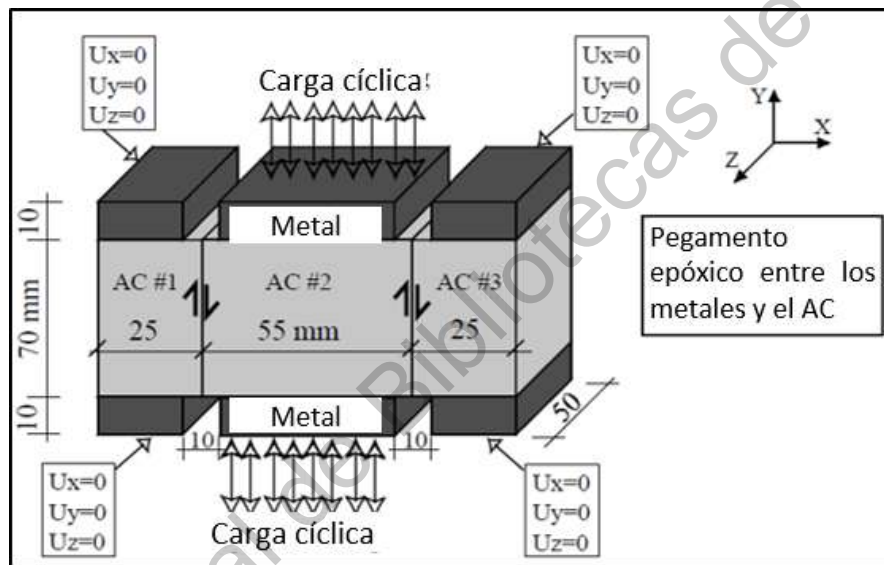


Figura 2.16 Esquema de la prueba de doble cortante.  
Fuente: Diakhaté *et al.*, (2011)

En Raab y Partl (2009) se llevó a cabo la investigación del desempeño a largo plazo del grado de adherencia en capas de pavimento usando el ensayo *Layer Parallel Direct Shear* (LPDS) ilustrado en la figura 2.17 el cual es una versión Sueca del modelo de Leutner y que permite usar tanto especímenes cilíndricos como prismáticos. Un efecto positivo en las propiedades de adherencia fue registrado luego del paso de 10 años de compactación por tráfico y asentamiento en caminos de nueva construcción mientras que en rehabilitaciones de caminos se registró un decremento de hasta el 50% de los esfuerzos al cortante (Raab y Partl, 2009).

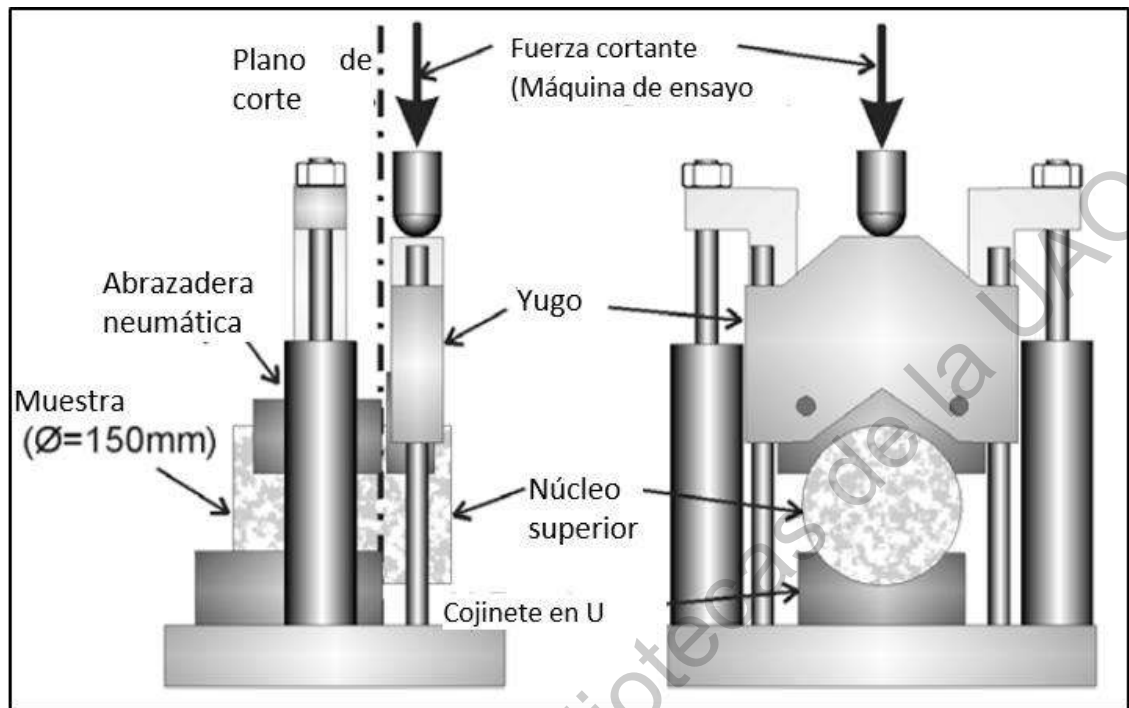


Figura 2.17 Dispositivo de prueba LPDS.  
Fuente: Raab y Partl (2009)

## 2.7 Especificaciones para adherencia

Diakhaté *et al.*, (2010) analizaron el pavimento bajo el esfuerzo de un eje de rueda estándar en Francia con una presión vertical de 0.662 MPa donde se observa que la interfaz se encuentra en una carga simétrica de  $T = \pm 0.3$  MPa correspondientes a una carga normal de  $\sigma = 0.23$  MPa siendo del mismo orden en pavimentos flexibles como se muestra en la figura 2.18.

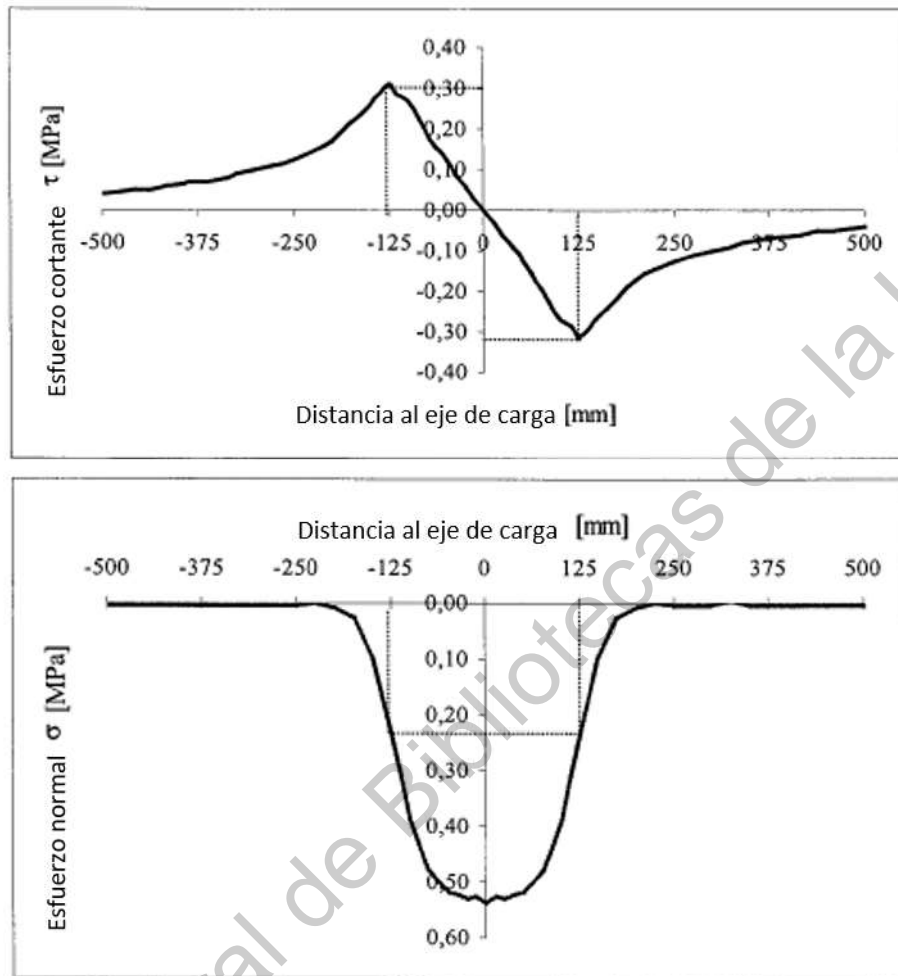


Figura 2.18 Diagrama de corte y de esfuerzo normal para pavimento bajo la carga del eje Francés estándar.

Fuente: Diakhaté *et al.*, (2010)

Varias investigaciones respecto a los modelos de laboratorio mencionados y datos tomados directamente de especímenes de campo han derivado en especificaciones y recomendaciones para esfuerzos mínimos a revisar en el control de la adherencia de una emulsión asfáltica utilizada como riego de liga, Banihashemrad *et al.*, (2018) especifican un mínimo de esfuerzo en 0.2 MPa para aceptar la adherencia de una capa asfáltica, Collop *et al.*, (2009) sugieren esfuerzos de 0.85 a 1.41 MPa para sobrecarpetas y de 0.57 a 1.13 MPa para mezclas asfálticas sobre base hidráulica. Leng *et al.*, (2008) propusieron un mínimo de 0.42



MPa para interfaz entre concreto Portland y mezcla asfáltica. En Hartadi (2009) se presentan recomendaciones a partir de especificaciones en Alemania y Suiza como se muestra en la figura 2.19. Johnson (2015) menciona que para la *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) los esfuerzos de 0.24 a 0.55 MPa se consideran que proveen una mala adherencia y según estudios complementarios del *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) se requiere un mínimo de 0.68 MPa. El Ministerio de Fomento (2015) a través del ensayo de corte NLT-382/08 solicita un valor mínimo de 0.6 MPa para casos de capas de rodaduras y 0.4 MPa mínimo para todos los demás casos.

Canestrari *et al.*, (2005) mencionan que en pavimentos tradicionales bajo condiciones de alto tránsito se registraron en campo esfuerzos normales de 0.4 MPa, Ghaly *et al.*, (2009) obtuvieron para sus ensayos de emulsiones modificadas valores entre 1.37 a 1.62 MPa. Zamora *et al.*, (2010) en sus experimentos de adherencia entre un material geo sintético y capas asfálticas reportaron esfuerzos entre 0.3 a 0.8 MPa. Song *et al.*, (2015) reportaron resistencias de hasta 6.89 MPa para mediciones de adherencia en mezclas *open-graded*. Coleri *et al.*, (2018) proponen valores de entre 0.25 a 0.5 MPa para esfuerzos de torque convertidos a esfuerzos de corte.

Fuente	Equipo	Tamaño de muestra	Velocidad de Desplazamiento	Resistencia a corte de (MPa)	
				S/Bin	Bin/B
Codjia [1994] Alemania	Leutner <sup>1</sup>	150mm diámetro	50mm/min	0.85	0.57
Partl & Raab [1999] Suiza	LPDS <sup>2</sup> Leutner <sup>1</sup>	150mm diámetro	50mm/min	1.3	
Stöckert [2001] Alemania	Leutner <sup>1</sup>	150mm diámetro	50mm/min	1.41	1.13
SN 640430B [VSS, 2008] Suiza	LPDS <sup>2</sup> Leutner <sup>1</sup>	150mm diámetro	50mm/min	0.85	0.68

<sup>1</sup> Sin brecha en el plano de corte

<sup>2</sup> 2mm de brecha en el plano de corte

Figura 2.19 Límites propuestos para Alemania y Suiza  
Fuente: Hartadi (2009)

Entendiendo que un modelo estadístico representa la aproximación más cercana de la realidad de los datos a partir de los cuales fue obtenido o como sostiene Bowen (1997), un modelo no es ciencia ni matemática, es el arte que construye puentes entre ambas. Por lo anterior Guerra *et al.*, (2003) en su búsqueda de contribuir al realismo, precisión y generalidad en la aplicación de modelos estadísticos de regresión proponen catorce criterios a tomar en consideración para la selección de un modelo siendo éstos: Métodos de ajuste de los modelos, error estándar de los estimadores, coeficiente de variación de los estimadores, límites de confianza de los estimadores, test de redundancia de los parámetros, análisis de varianza relacionado con el modelo en cuestión, coeficiente de determinación  $R^2$  y  $R^2$  ajustado por los grados de libertad, suma de cuadrados o cuadrado medio residual, error estándar de estimación, test de falta de ajuste del modelo, análisis del efecto del uso de transformaciones en el modelo, diagnóstico y tratamiento de la multicolinealidad en modelos de regresión lineal múltiple, validación de las predicciones del modelo y análisis de los residuos.

## 2.8 Normativa NLT-382/08

“Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte”

Las normas NLT son características de ensayos de carreteras a cargo del Centro de Estudios de Carreteras CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) propias del gobierno de España.

La prueba tiene como objetivo determinar la adherencia entre las capas de mezcla asfáltica o entre capas tratadas con conglomerantes hidráulicos y capas de mezcla asfáltica.

Mediante un testigo de campo o una probeta fabricada en laboratorio se puede determinar el esfuerzo cortante necesario para separar dos capas al ser sometido el espécimen a un esfuerzo cortante puro a lo largo de su sección transversal midiéndose de forma continua la carga aplicada y la deformación producida. El método también permite evaluar la energía de deformación

correspondiente al área delimitada bajo la curva de carga-deformación obtenida en el ensayo.

#### 2.8.1 Aparatos y materiales de prueba.

- Prensa de compresión, de funcionamiento mecánico o hidráulico, que proporcione una carga de 50 kN mínimos, velocidad uniforme de 2.5 mm/min durante la aplicación de la carga y dispositivo para registrar gráficamente la carga y la deformación.
- Cámara termostática con capacidad suficiente para alojar los testigos de ensayo, manteniendo una temperatura de  $20 \pm 1$  °C.
- Calibrador para medir con una precisión de  $\pm 0.1$  mm el diámetro de los testigos de ensayo.
- Dispositivo de corte con carga para producir un esfuerzo cortante en la interfaz de las dos capas ensayadas. (Esta norma contempla dos posibles dispositivos)

##### Dispositivo A

En la figura 2.20 se muestra el esquema del dispositivo de aplicación de la carga mediante una mordaza de dos cuerpos, consistentes en dos segmentos semicilíndricos, superior e inferior, de diámetro interior igual al de los testigos que se ensayen (100 o 150 mm). Dichos elementos estarán fabricados en acero endurecido y con sus superficies interiores perfectamente mecanizadas. Ambos segmentos estarán alineados horizontalmente en dirección paralela a su eje de revolución y dispuestos de tal manera que el extremo anterior del primero y el posterior del segundo estén contenidos en un plano perpendicular a dicho eje (el plano sobre el que se aplicará de forma tangencial el esfuerzo de corte y que coincidirá con la interfaz entre las dos capas del testigo a ensayar).

El segmento inferior estará firmemente fijado a la base de la mordaza con su superficie cóncava dispuesta hacia arriba. Para mantener los testigos firmemente

sujetos durante el ensayo, este segmento dispondrá de una pieza de sujeción, con forma igualmente cilíndrica e idéntico diámetro interior, que podrá ajustarse junto con el segmento inferior a la superficie curva del testigo, a modo de grillete, mediante tornillos u otros elementos apropiados. Ambas piezas tendrán adheridas tiras de fieltro en su superficie interior para evitar el posible deslizamiento del testigo.

El segmento superior estará colocado en posición contigua al segmento inferior según se ha explicado más arriba, definiendo entre ambos el plano de corte. El segmento no estará fijo sino que podrá desplazarse verticalmente, por acción del actuador de la prensa, paralelamente a dicho plano, produciéndose el efecto de cizallamiento en la interfaz de las capas del testigo ensayado.

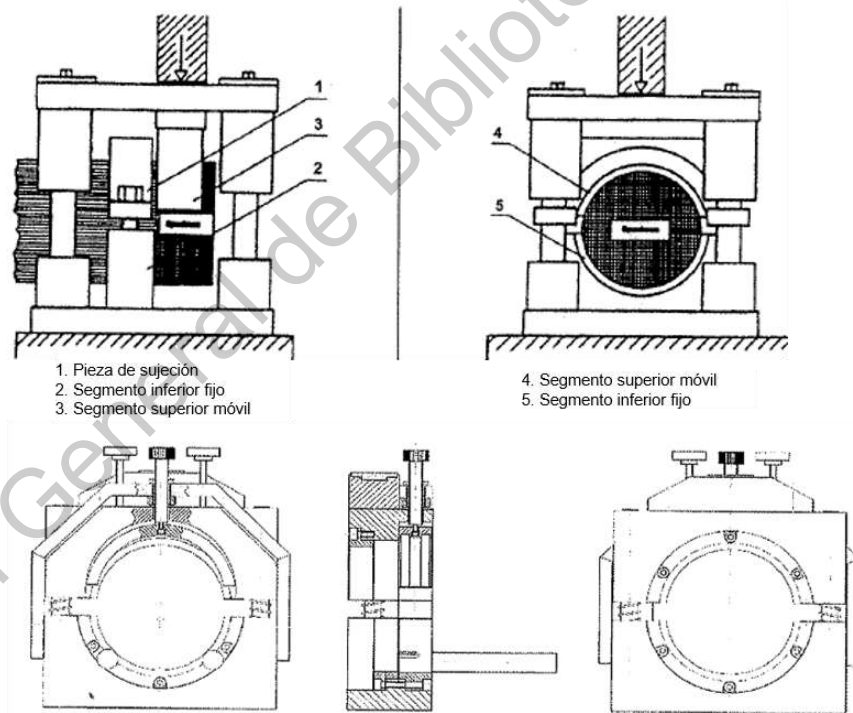


Figura 2.20 Esquema y fotografías del dispositivo de corte A.  
Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2008)

## Dispositivo B

La configuración geométrica de este dispositivo B es la utilizada para este trabajo de investigación. “Consiste en una mordaza cilíndrica desmontable en dos mitades, según un plano que corte a dos generatrices opuestas, en la que se introduce el testigo de ensayo. La mordaza debe tener un diámetro interior de 101.6 o 150 mm y está provista de un sistema de cierre mediante tornillos u otro procedimiento adecuado, que mantenga el testigo firmemente sujeto en su interior, tal como se muestra en la figura 2.21. La interfaz del testigo debe sobresalir 5 mm del extremo de la mordaza. Una vez dispuesto el testigo dentro de la mordaza y cerrada ésta, se coloca el conjunto en posición horizontal sobre una base con dos puntos de apoyo separados 188 mm. La separación entre la interfaz del testigo y el punto de apoyo más cercano a dicha interfaz será también de 5 mm. El punto de aplicación de la carga estará en posición equidistante de los dos puntos de apoyo del conjunto, el cual actúa por tanto como una viga con dos apoyos, donde la sección de ensayo, al estar muy próxima al punto de apoyo, sólo está sometida a esfuerzo cortante” como se enuncia en Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2008).

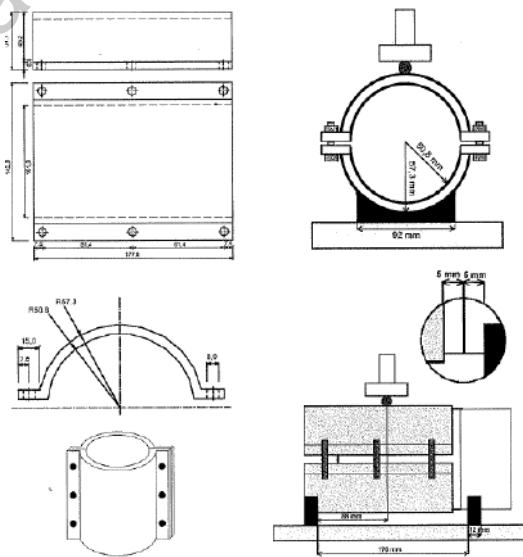


Figura 2.21 Mordazas semicilíndricas para dispositivo B.  
Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2008)

## 2.8.2 Procedimiento de ensayo

Tal como se detalla en Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2008), “el ensayo se realiza sobre testigos extraídos de campo o sobre probetas cilíndricas fabricadas en laboratorio (se recomienda preferentemente utilizar testigos de 100 y 150 mm de diámetro”.

“Los testigos presentarán un diámetro constante en toda su longitud y las superficies laterales no presentarán irregularidades que puedan impedir su adecuada colocación en el dispositivo de ensayo. La interfaz entre las dos capas será perpendicular el eje longitudinal del testigo, siendo 5 mm la desviación máxima aceptable respecto del plano normal a dicho eje para testigos de 100 mm de diámetro, y 7.5 mm para los de 150 mm, tal como se indica en la figura 2.22, los testigos con desviaciones mayores no podrán utilizarse en este ensayo, así como aquellos en los que el espesor de alguna de las capas sobre las que se realice el ensayo sea inferior a 25 mm”.

“Con el calibrador se realizan dos mediciones del diámetro de cada testigo con precisión de  $\pm 0.1$  mm, en dos secciones paralelas situadas próximas y a ambos lados de la interfaz de las capas y se determina el promedio  $d$ . Con este diámetro medio se calcula la superficie de la sección transversal  $S$  mediante la expresión”:

$$S = \pi * d^2 / 4$$

“Enseguida se introducen los testigos a una cámara termostática regulada a  $20 \pm 1$  °C durante tres horas. Se retiran los testigos del acondicionamiento y se sitúa inmediatamente el dispositivo de corte en la posición adecuada, según el dispositivo A o B que se utilice, ajustando la brida de sujeción o colocando y asegurando firmemente la mitad superior de la mordaza, de acuerdo con el tipo de dispositivo. Se aplica la carga sobre el dispositivo a una velocidad de 2.5 mm/min. Durante el ensayo se registran los valores de la carga y del desplazamiento producido hasta la separación de las capas. La figura 2.23 muestra un gráfico típico

del ensayo de corte en el que se indica la carga máxima y la deformación producida para dicho valor de carga máxima”.

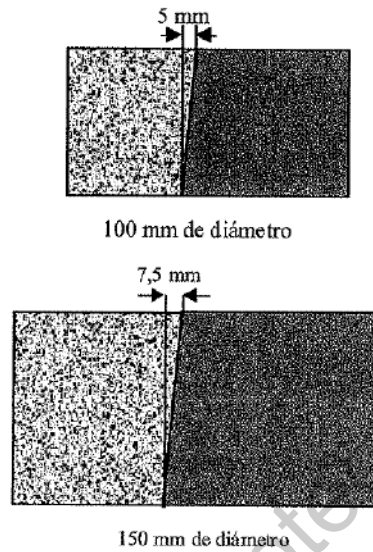


Figura 2.22 Desviación máxima aceptable.  
Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2008)

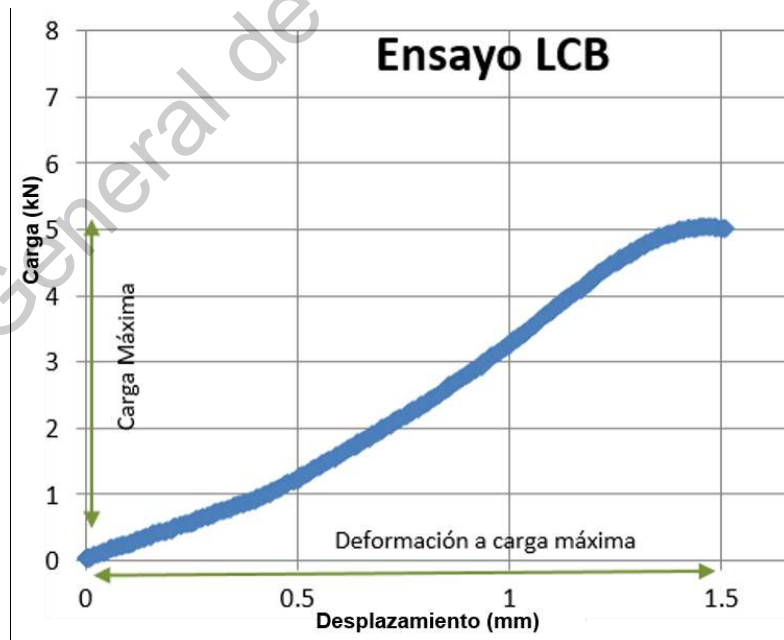


Figura 2.23 Curva Carga-Deformación para ensayo.  
Fuente: Elaboración propia.

El área debajo de la curva de carga-deformación representa la energía de fractura, la cual se define como la energía requerida para crear una nueva unidad de superficie de área a través del proceso de agrietamiento como mencionan Ahmed *et al.*, (2010), la cual además otorga una buena correlación con su resistencia al agrietamiento. La mecánica de fractura permite aumentar la seguridad de los diseños de estructuras además de permitir el análisis y control de los componentes (Arana y González, 2002). Éste análisis completo de los diseños permitiría prolongar la vida de servicio de los pavimentos al tener una predicción más eficiente del desempeño en su condición estructural y particularmente en la propagación de grietas, así con la información de factores externos y probabilidad de agrietamiento permitiría que la gestión de pavimentos desarrolle estrategias apropiadas de rehabilitación como afirman Arístides *et al.*, (2015). La figura 2.25 presenta curvas típicas de ensayos de corte para diferentes dispositivos. La curva de carga-deformación caracteriza el comportamiento mecánico del material y sirve como base numérica para el tratamiento de problemas de superficie además de que es más apropiada para caracterizar la adherencia en comparación con la carga máxima pues representa la evolución de la falla como se sostienen en Tschegg *et al.*, (1995) en la figura 2.24.

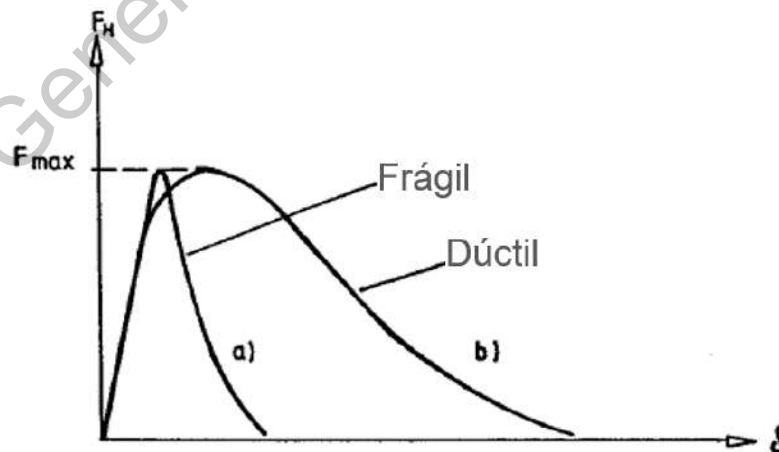


Figura 2.24 Carga-desplazamiento para fallas frágiles y dúctiles.  
Fuente: Tschegg *et al.* (1995)



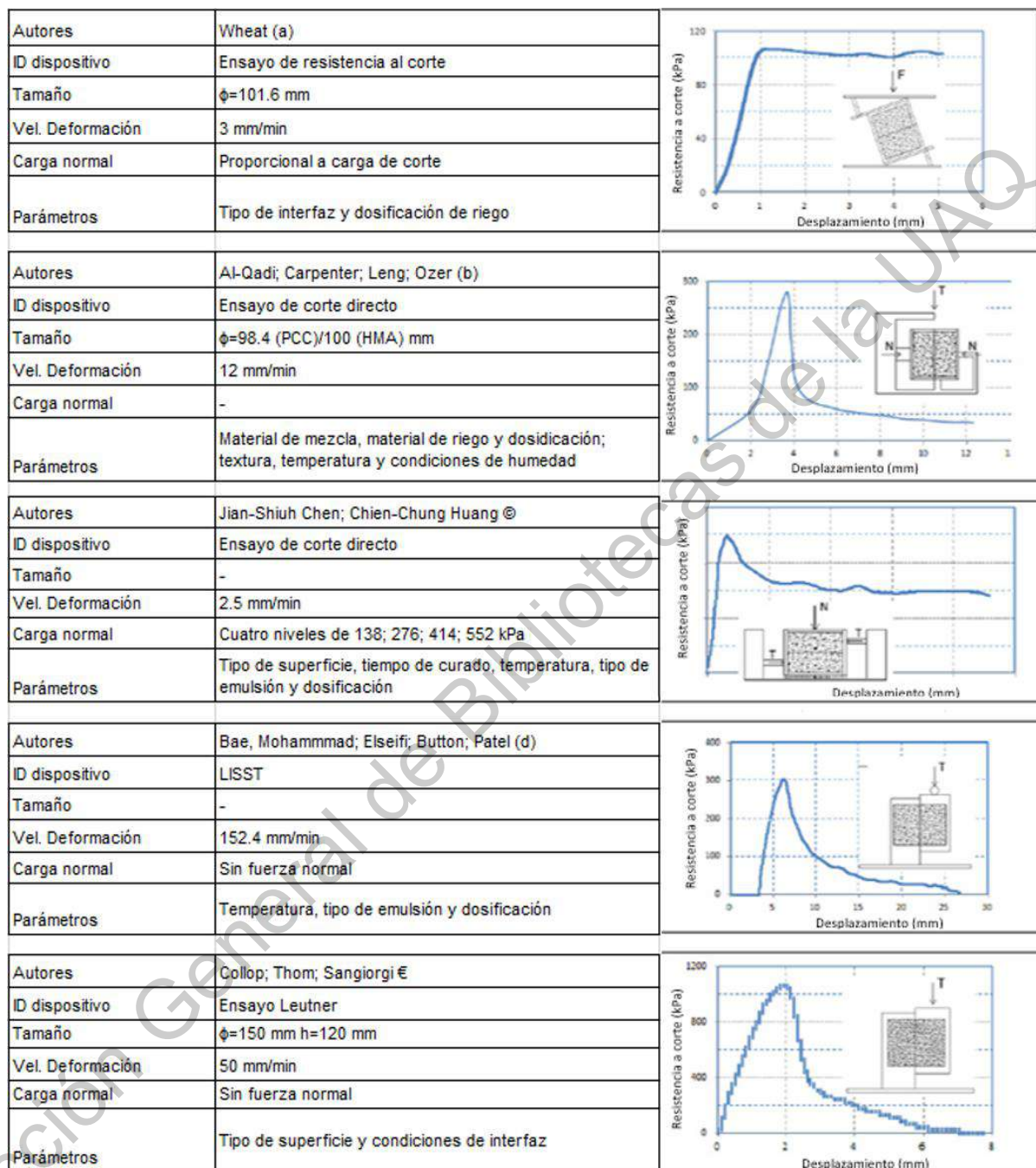


Figura. 2.25 Curvas típicas para diferentes modalidades de ensayos a corte.  
Fuente: D'Andrea y Tozzo (2013)

### 2.8.3 Análisis de resultados

Utilizando el gráfico de carga-deformación resultante de ensayar cada testigo se pueden determinar los siguientes parámetros:

-Carga máxima que provocó la falla,  $F_{\max}$  (kN)

-La deformación máxima alcanzada al momento de la falla. (mm)

- $S$ =superficie de la sección transversal (mm<sup>2</sup>)

-La resistencia a esfuerzo cortante,  $T_c$  (kN/mm<sup>2</sup>), obtenida a partir de la carga máxima de falla con la siguiente expresión:  $T_c = F_{\max}/S$  para dispositivo A,  $T_c = (\frac{F_{\max}}{2})/S$  cuando se emplea el dispositivo B.

También se puede obtener la energía de fractura mediante el gráfico de carga-deformación resultado de continuar cargando el testigo aún después del punto de falla y calculando el área que quedará por debajo de la curva final.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología se compone de un total de 4 pasos como se muestra en la figura 3.1. Primero se inicia con la producción de la emulsión asfáltica y se determinan los porcentajes de *contenido asfáltico*, los cuales son propuestos de 50, 55 y 60% para las emulsiones de rompimiento rápido y las emulsiones súper estables. Después se hace la aplicación de la emulsión asfáltica sobre pastillas elaboradas con el compactador Marshall usando *dosificaciones* como riegos de liga a razón de 0.3 y 0.5 l/m<sup>2</sup>. Luego se establecen 3 *tiempos de curado* para observar el comportamiento del ligante a 1, 3 y 5 días después de la aplicación del riego de liga. Finalmente, se fabrica mediante procedimiento Marshall la segunda capa a adherir y se realiza el ensayo LCB de corte directo para analizar el *desempeño* del riego de liga.

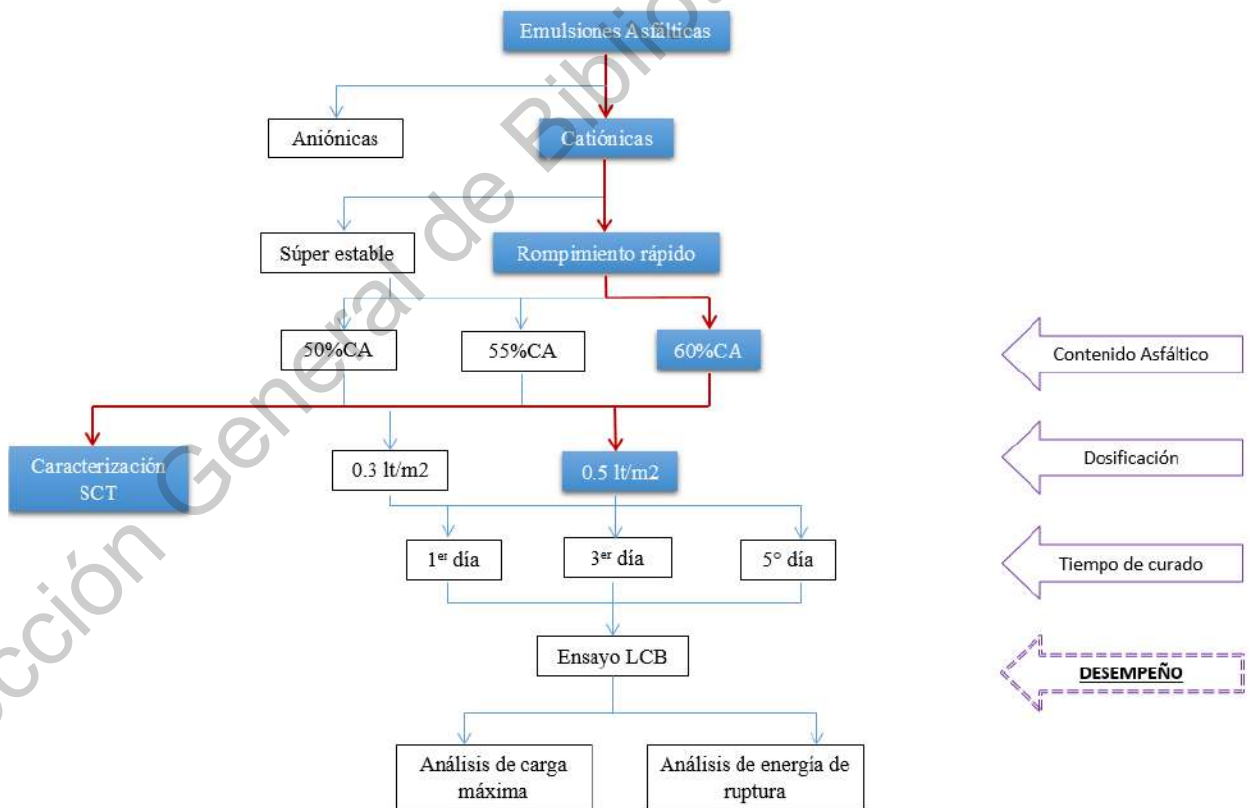


Figura 3.1. Metodología de experimentos.

Fuente: Elaboración propia

La investigación toma como punto de partida la normativa mexicana de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N-CMT-4-05-001/06 para “Calidad de materiales asfálticos” y complementa con la normativa española NLT-382/08 “Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte” emitida por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) para caracterización de una emulsión convencional catiónica y su residuo asfáltico, así como determinar la adherencia entre capas asfálticas. La figura 3.2 muestra los tipos de emulsiones asfálticas según su contenido de cemento asfáltico y polaridad y la figura 3.3 los requisitos de calidad para la emulsión y su residuo asfáltico en cada una de las clasificaciones existentes.

<b>Clasificación</b>	<b>Contenido de cemento asfáltico en masa %</b>	<b>Tipo</b>	<b>Polaridad</b>
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
EAR-60	60		
EAM-60	60	Rompimiento medio	
EAM-65	65		
EAL-55	55	Rompimiento lento	
EAL-60	60		
EAI-60	60	Para impregnación	
ECR-60	60	Rompimiento rápido	Catiónica
ECR-65	65		
ECR-70	70		
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECI-60	60	Para impregnación	
ECS-60	60	Sobrestabilizada	

Figura 3.2 Clasificación de las emulsiones asfálticas.

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte N-CMT-4-05-001/06 (2006)

Características	Clasificación						
	ECR-60	ECR-65	ECR-70	ECM-65	ECL-65	ECI-60	ECS-60
<b>De la emulsión:</b>							
Contenido de cemento asfáltico en masa; %, mínimo	60	65	68	65	65	60	60
Viscosidad Saybolt-Furol a 25°C; s, mínimo	---	---	---	---	25	5	25
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C; s, mínimo	5	40	50	25	---	---	---
Asentamiento en 5 días; diferencia en %, máximo	5	5	5	5	5	10	5
Retenido en malla N° 20 en la prueba del tamiz; %, máx	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Pasa malla N° 20 y se retiene en malla N° 60 en la prueba del tamiz; %, máximo	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Cubrimiento del agregado seco; %, mínimo	---	---	---	90	90	---	90
Cubrimiento del agregado húmedo; %, mínimo	---	---	---	75	75	---	75
Carga eléctrica de las partículas	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Disolvente en volumen; %, máximo	---	3	3	5	---	15	---
Índice de ruptura; %	< 100	< 100	< 100	80 – 140	> 120	---	> 120
<b>Del residuo de la destilación:</b>							
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s (P <sup>[1]</sup> )	50 ± 10 (500 ± 100)	50 ± 10 (500 ± 100)	50 ± 10 (500 ± 100)	50 ± 10 (500 ± 100)	50 ± 10 (500 ± 100)	50 ± 10 (500 ± 100)	50 ± 10 (500 ± 100)
Penetración <sup>[2]</sup> a 25°C, en 100 g y 5 s; 10 <sup>-1</sup> mm	110–250	110–250	110–250	100–250	100–250	100–400	100–250
Solubilidad; %, mínimo	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	---
Ductilidad a 25°C; cm, mínimo	40	40	40	40	40	40	---

[1] Poises

[2] En climas que alcancen temperaturas iguales o mayores de 40°C, la penetración en el residuo de la destilación de las emulsiones ECR-65, ECR-70, ECM-65, ECL-65 y ECS-60, en el proyecto se puede considerar de 50 a 90 × 10<sup>-1</sup> mm.

Fig. 3.3 Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas.

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte N-CMT-4-05-001/06 (2006)

Las emulsiones catiónicas son de uso común en la construcción de pavimentos asfálticos en México, por lo cual se produjeron emulsiones de esta polaridad con ayuda de una planta de emulsiones proporcionada por Lasfalto S. de R.L. de C.V. Se registraron 2 variantes de estas emulsiones, las de rompimiento súper estable incorporando C31H como agente emulsificante y emulsiones de

rompimiento rápido con C25 como agente emulsificante, ambos proporcionados por el fabricante. Para la elaboración de la emulsión asfáltica se utilizó cemento asfáltico nacional EKBE PG 64-22 regido por el control de calidad de la N-CMT-4-05-003/16 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016) para calidad de mezclas asfálticas para carreteras. Preparada la solución jabonosa se incorporó mediante el molino de la planta de emulsiones el asfalto para obtener las emulsiones asfálticas con los diferentes contenidos asfálticos propuestos.

La Tabla 3.1 resume las proporciones de emulsificante incorporado para la solución jabonosa que compone la emulsión de acuerdo a las recomendaciones del fabricante para emulsiones de rompimiento súper estable y de rompimiento rápido a 50, 55 y 60% de contenido asfáltico.

Tabla 3.1 Proporción de emulsificante.

<b>Tipo de emulsión</b>	<b>Emulsificante</b>	<b>Proporción de emulsificante (kg/Ton)</b>	<b>% Residuo asfáltico</b>	<b>Emulsificante para cada 2 litros de emulsión asfáltica (gr)</b>
Rompimiento Súper Estable	C31H	10.00	50%	40.00
			55%	44.40
			60%	50.00
Rompimiento Rápido	C25	3.00	50%	12.00
			55%	13.33
			60%	15.00

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3.2 resume las variantes de las dosificaciones usadas para cada emulsión aplicada como riego de liga a razones de 0.3 y 0.5 l/m<sup>2</sup>, las cuales son dosificaciones comúnmente aplicadas como riego de liga en la construcción de pavimentos en México. Para simular las condiciones más cercanas de la aplicación en campo por medio de un camión petrolizadora, la emulsión asfáltica se calentó

mediante baño maría a 60°C previo a su aplicación. De las pastillas elaboradas mediante la metodología Marshall a 75 golpes por cara se tomó una relación de las áreas donde se aplicaría la emulsión asfáltica en cada pastilla elaborada dando un promedio de 0.008136 m<sup>2</sup> a partir de la cual se calculó la dosificación a utilizar para las razones propuestas.

Tabla 3.2 Dosificaciones de emulsión asfáltica.

Tipo de emulsión	Área de muestra (m <sup>2</sup> )	Temperatura de aplicación (°C)	Razón del riego de liga (l/m <sup>2</sup> )	Dosificación para cada muestra (gr)
Rompimiento Súper Estable	0.008136	60.00	0.30	2.44
			0.50	4.02
Rompimiento Rápido	0.008136	60.00	0.30	2.44
			0.50	4.02

Fuente: Elaboración propia.

La fabricación del complemento de los especímenes cilíndricos que simulan una sobrecarpeta para el ensayo LCB se realizaron dentro de los moldes descritos en la normativa española NLT-382/08 colocando mezcla asfáltica en caliente sobre la primera pastilla Marshall ya dosificada con emulsión, compactando a 150 golpes en una sola cara. Teniendo hasta este paso una variante de pastillas elaboradas con emulsión de rompimiento lento y rompimiento rápido, dosificadas a 0.3 y 0.5 l/m<sup>2</sup>, los especímenes se curaron durante 1, 3 y 5 días para reproducir los tiempos propuestos.

Conforme se cumplieron los días de curado para cada variante los especímenes se evaluaron mediante el ensayo LCB de corte directo usando una

prensa hidráulica de carga registrando la carga máxima aplicada y la deformación hasta el punto de falla para evaluar el desempeño del riego de liga.

Se registró una ejecución total de 72 ensayos LCB realizados por triplicado y luego del análisis de los datos, se elaboraron gráficas de Carga-Deformación para analizar la energía de fractura calculando el área bajo la curva, comparando la influencia en los resultados entre las emulsiones de rompimiento súper estable y las de rompimiento rápido, los contenidos asfálticos, las dosificaciones y los tiempos de curado.

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM



#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1 Resistencias para ensayo LCB en emulsiones rompimiento lento.

La tabla 4.1 muestra los resultados de resistencias obtenidas para los ensayos por triplicado con emulsión de rompimiento súper estable dosificada a 0.3 l/m<sup>2</sup> curada a 1, 3 y 5 días y con contenidos asfálticos de 50%, 55% y 60%.

Tabla 4.1 Resistencias para ensayo LCB con dosificación de 0.3 l/m<sup>2</sup>. (Emulsión rompimiento súper estable)

CURADO	%CA	ESPECÍMEN	RESISTENCIA (kN)	PROMEDIO (kN)
<b>1 DÍA</b>	60%	19.1	3.21	3.87
		19.2	3.22	
		19.3	5.18	
	55%	20.1	3.94	4.04
		20.2	4.98	
		20.3	3.21	
	50%	15.1	6.83	6.13
		15.2	5.06	
		15.3	6.51	
<b>3 DÍAS</b>	60%	7.1	6.72	5.25
		7.2	4.00	
		7.3	5.04	
	55%	8.1	9.69	8.23
		8.2	7.98	
		8.3	7.02	
	50%	16.1	4.91	6.22
		16.2	7.62	
		16.3	6.14	
<b>5 DÍAS</b>	60%	3.1	3.71	4.90
		3.2	5.62	
		3.3	5.36	
	55%	6.1	6.03	6.55
		6.2	6.78	
		6.3	6.84	
	50%	12.1	6.95	6.79
		12.2	6.41	
		12.3	7.01	
26.2		6.40		
		26.3	4.36	

Fuente: Elaboración propia

La dosificación de 0.3 l/m<sup>2</sup> al momento de ser aplicada en las pastillas de la parte inferior se apreciaba insuficiente para la macro textura de la pastilla y en apariencia no cubría uniformemente los espacios de la misma por lo que se infirió que los resultados de resistencia podrían ser desfavorables en comparación con los resultados que se obtendrían con las siguientes dosificaciones. Sin embargo las resistencias para el ensayo de corte LCB con dosificaciones de 0.3 l/m<sup>2</sup> resultaron ser muy similares e incluso estar por encima de los demás experimentos en la condición de residuo asfáltico de 55%.

Cada experimento se realizó por triplicado con la finalidad de obtener valores repetitivos de los resultados. Se hace hincapié en tener controlada la temperatura de aplicación de la emulsión a 60°C mediante baño maría pues por la baja cantidad aplicada tiende a enfriarse con rapidez para los tres ensayos así como la dosificación de la emulsión asfáltica en la pastilla que puede variar derivado del mismo tema de la temperatura de aplicación.

La resistencia más alta obtenida para este grupo de datos fue de 8.23 kN promedio para el tiempo de curado de 3 días y contenido asfáltico de 55%, seguida de una resistencia de 6.79 kN para 5 días de curado y 50 % de cemento asfáltico.

La tabla 4.2 muestra los resultados de las resistencias obtenidas para los ensayos hechos por triplicado con emulsión súper estable dosificada a 0.5 l/m<sup>2</sup> en tiempo de curado de 1, 3 y 5 días y con contenidos asfálticos de 50%, 55% y 60%.

Tabla 4.2 Resistencias para ensayo LCB con dosificación de 0.5 l/m<sup>2</sup>. (Emulsión rompimiento súper estable)

<b>CURADO</b>	<b>%CA</b>	<b>ESPECÍMEN</b>	<b>RESISTENCIA (kN)</b>	<b>PROMEDIO (kN)</b>
<b>1 DÍA</b>	60%	9.1	5.41	6.00
		9.2	7.18	
		9.3	5.40	
	55%	11.1	5.50	5.43
		11.2	4.90	
		11.3	5.90	
		10.1	4.44	
	50%	10.2	4.35	3.76
		10.3	2.50	
<b>4 DÍAS</b>	60%	4.1	5.76	6.12
		4.2	8.54	
		4.3	4.05	
	55%	5.1	4.15	4.08
		5.2	4.81	
		5.3	3.27	
		13.1	4.21	
	50%	13.2	6.79	5.91
		13.3	6.72	
<b>5 DÍAS</b>	60%	1.1	6.01	7.25
		1.2	7.71	
		1.3	8.03	
	55%	2.1	6.01	6.25
		2.2	6.94	
		2.3	5.81	
		22.1	4.78	
	50%	22.2	3.55	4.54
		22.3	5.28	
		26.2	6.40	
26.3		4.36		

Fuente: Elaboración propia

La dosificación de 0.5 l/m<sup>2</sup> al momento de ser aplicada en las pastillas inferiores y mediante una inspección visual aparentó cubrir de forma aceptable la superficie a ligar e incluso parte de la emulsión alcanzaba a penetrar en los vacíos que se apreciaban en la superficie propios de la macro textura de la mezcla utilizada.

Para los experimentos a dosificaciones de 0.5 l/m<sup>2</sup> con variantes en contenido asfáltico y tiempo de curado se procedió con la misma metodología que los experimentos con dosificaciones de 0.3 l/m<sup>2</sup>, realizando especímenes por triplicado y manteniendo constantes la temperatura de aplicación de emulsión a 60°C y en consecuencia la dosificación.

La resistencia más alta obtenida para este grupo de datos fue de 7.25 kN promedio para el tiempo de curado de 5 días y contenido asfáltico de 60%, seguida de 6.25 kN para los mismos 5 días de curado y 50% de contenido asfáltico.

#### 4.2 Resistencias para ensayo LCB en emulsiones rompimiento rápido.

La tabla 4.3 muestra los resultados de las resistencias obtenidas para los ensayos hechos por triplicado con emulsión de rompimiento rápido dosificada a 0.3 l/m<sup>2</sup> en tiempo de curado de 1, 3 y 5 días y con contenidos asfálticos de 50%, 55% y 60%.

Tabla 4.3 Resistencias para ensayo LCB con dosificación de 0.3 l/m<sup>2</sup>. (Emulsión rápida)

<b>CURADO</b>	<b>%CA</b>	<b>ESPECÍMEN</b>	<b>RESISTENCIA (kN)</b>	<b>PROMEDIO (kN)</b>
<b>1 DÍA</b>	60%	41.1	4.11	4.08
		41.2	4.25	
		41.3	3.89	
	55%	38.1	4.46	5.54
		38.2	6.29	
		38.3	5.88	
	50%	46.1	4.44	3.77
		46.2	3.74	
		46.3	3.12	
<b>3 DÍAS</b>	60%	30.1	9.03	7.71
		30.2	6.60	
		30.3	7.51	
	55%	29.1	6.39	5.97
		29.2	5.04	
		29.3	6.48	
	50%	34.1	3.63	3.33
		34.2	3.07	
		34.3	3.28	
		32.2	3.59	
		32.2	2.82	

Fuente: Elaboración propia

Los experimentos con emulsión de rompimiento rápida dosificada a 0.3 l/m<sup>2</sup> arrojaron un incremento en la resistencia entre el día 1 y 3 para los contenidos de 60% y 55% siendo la resistencia más alta de 7.71 kN para un residuo de 60% y seguida con 5.97 kN para el residuo de 55%.

La tabla 4.4 muestra los resultados de las resistencias obtenidas para los ensayos hechos por triplicado con emulsión de rompimiento rápido dosificada a 0.5

l/m<sup>2</sup> en tiempo de curado de 1, 3 y 5 días y con contenidos asfálticos de 50%, 55% y 60%.

Tabla 4.4 Resistencias para ensayo LCB con dosificación de 0.5 l/m<sup>2</sup>. (Emulsión rápida)

<b>CURADO</b>	<b>%CA</b>	<b>ESPECÍMEN</b>	<b>RESISTENCIA (KN)</b>	<b>PROMEDIO (kN)</b>
<b>1 DÍA</b>	60%	40.1	4.27	4.77
		40.2	4.64	
		40.3	5.4	
	55%	39.1	4.61	4.06
		39.2	3.64	
		39.3	3.93	
	50%	45.1	2.64	2.86
		45.2	4.03	
		45.3	1.91	
<b>3 DÍAS</b>	60%	37.1	4.96	4.38
		37.2	4.3	
		37.3	3.87	
	55%	35.1	2.09	2.41
		35.2	2.49	
		35.3	2.66	
	50%	33.1	5.22	4.14
		33.2	3.08	
		33.3	4.12	

Fuente: Elaboración propia

Para la condición de dosificación a 0.5 l/m<sup>2</sup> en los experimentos con emulsión rápida se obtuvo un incremento de la resistencia entre el día uno y tres para la condición de un residuo al 50%. La resistencia máxima de 4.77kN se obtuvo a partir del espécimen con residuo de 60% sin embargo es una resistencia baja respecto al resto de experimentos realizados.

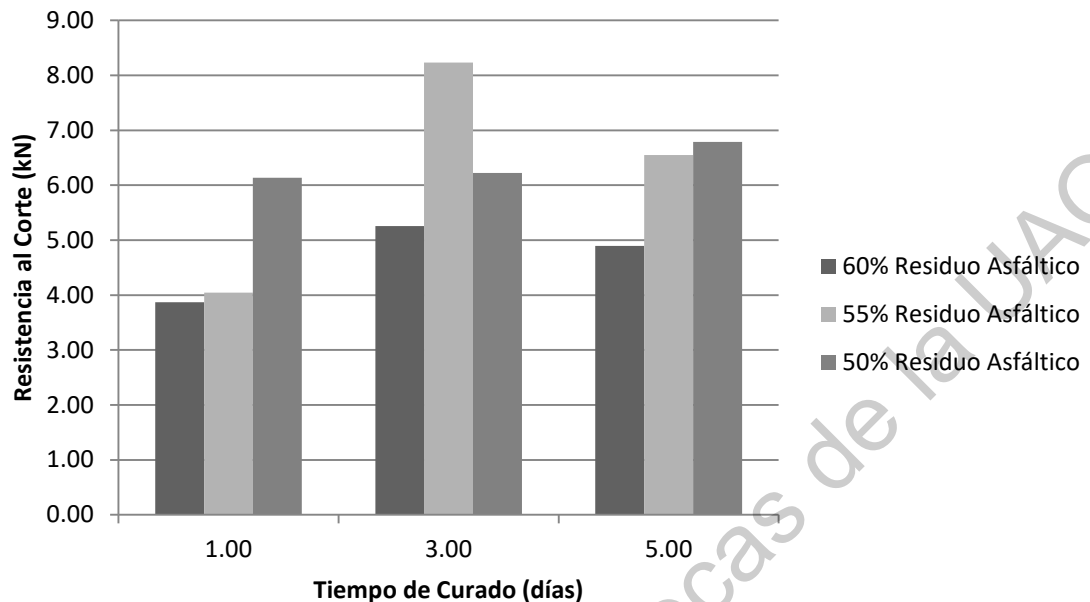


Figura 4.1 Resistencias del ensayo LCB aplicando emulsión de rompimiento súper estable a razón de 0.3 l/m<sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia.

La figura 4.1 presenta a manera de gráfico los resultados de resistencias alcanzadas en el ensayo LCB para una emulsión súper estable a una dosificación de 0.3 l/m<sup>2</sup> a través de 5 días como periodo de curado, donde se observa un incremento de la resistencia entre el primer y tercer día para los contenidos de 60% y 55%, aunque registran una baja en resistencia al día cinco siendo así que la resistencia máxima se alcanzó con 8.23 kN a un contenido asfáltico de 55% en el día tres de curado. La figura 4.2 presenta los resultados para el ensayo de corte LCB usando las mismas variantes en contenido asfáltico y tiempo de curado que los demás experimentos pero con una dosificación a 0.5 l/m<sup>2</sup> para emulsión de rompimiento súper estable. A diferencia de las últimas condiciones de ensayo, durante este experimento el riego de liga aparentó cubrir perfectamente la superficie de contacto y se observó que la emulsión penetraba en las oquedades superficiales de la mezcla asfáltica en caliente, tal como se podría observar en campo en un adecuado riego de liga realizado por medio de una petrolizadora. Una mejora en el

desempeño a través del tiempo se observó principalmente para los datos con un residuo asfáltico de 60% y donde se registró una resistencia máxima de 7.25 kN para 5 días de curado y seguida de una resistencia de 6.25 kN para los mismos 5 días y 55% de residuo asfáltico. Este grupo de datos con dosificación de 0.5 l/m<sup>2</sup> presenta un desempeño más equilibrado entre los tres contenidos asfálticos respecto al experimento con dosificación de 0.3 l/m<sup>2</sup>. Así, se concluye que para estas condiciones una emulsión de bajo contenido asfáltico puede ser aplicada como riego de liga y monitoreada mediante el ensayo LCB con el fin de validar su desempeño. Esto nos permite ahorrar recursos durante el proceso de producción de la emulsión asfáltica y seguir garantizando el desempeño del riego de liga en la construcción del pavimento.

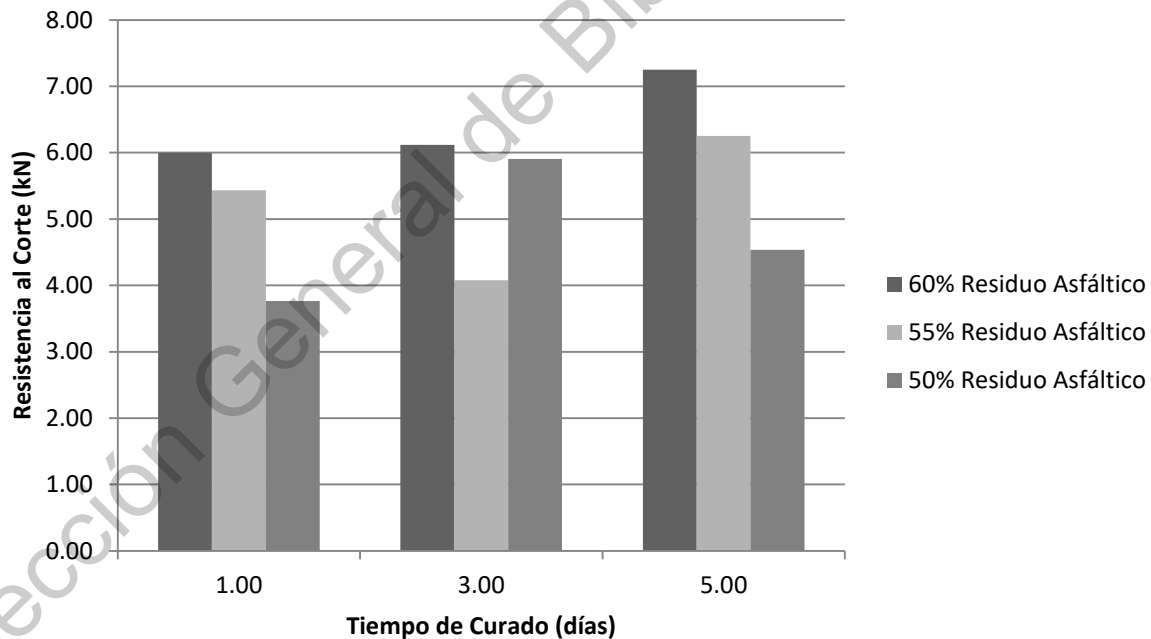


Figura 4.2 Resistencias del ensayo LCB aplicando emulsión de rompimiento súper estable a razón de 0.5 l/m<sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia.



La figura 4.3 presenta una curva típica de Carga-Desplazamiento resultado del ensayo de corte LCB para una emulsión de rompimiento rápido y una emulsión de rompimiento súper estable, ambas con un residuo asfáltico de 55%. Además se presenta el concepto de energía de fractura referido al área bajo la curva de ambas curvas. La emulsión asfáltica de rompimiento rápido presenta 5.48 J/m<sup>2</sup> para este experimento, lo cual representa casi la mitad de la energía de fractura que se obtiene a partir de la emulsión de rompimiento lento con 11.86 J/m<sup>2</sup> por lo cual resulta una alternativa viable como riego de liga dentro de la construcción de pavimentos ya que mediante este complemento se ejemplifica la cantidad de energía requerida para llevar a la falla una de las muestras ensayadas. El hecho de poder tener una petrolizadora con emulsión asfáltica de rompimiento lento representa una ventaja porque esta emulsión podría ser utilizada tanto para riegos de liga como para riegos de impregnación.

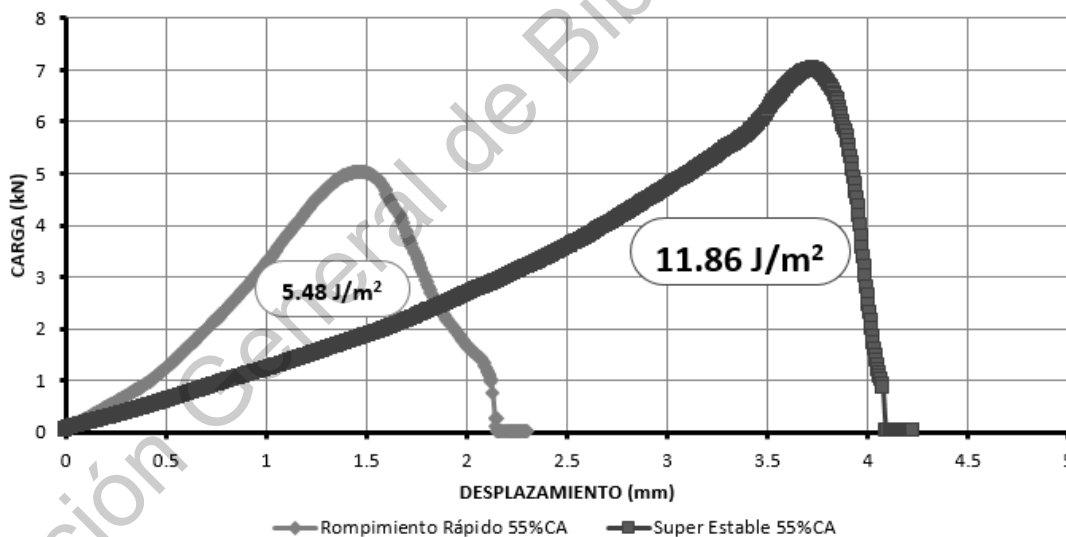


Figura 4.3 Comparación de energía de fractura entre emulsión de rompimiento rápido y rompimiento súper estable con 55% de residuo asfáltico.

Fuente: Elaboración propia.

## 5. CONCLUSIONES

El desempeño de ambas emulsiones asfálticas (rompimiento rápido y rompimiento súper estable) mejora con el tiempo aunque no significativamente según los experimentos llevados durante un periodo de curado de 1 a 5 días con especímenes elaborados en laboratorio. Lo anterior permite asumir que el riego de liga continúa trabajando aún después del paso de los días, sin embargo el último aporte de adherencia se obtiene a partir de la inducción de compactación al abrir al tránsito un tramo como refieren Canestrari *et al.*, (2005) mediante su investigación con extracciones de campo. Si se transfiere este análisis a condiciones de campo, la resistencia al corte de un riego de liga en un camino de 15 días de construcción ya abierto a tránsito vehicular será mayor que la resistencia de un camino recién construido y abierto a tránsito, en este caso el tránsito continuará compactando la capa asfáltica y densificando la estructura del pavimento.

Los bajos contenidos asfálticos (50% y 55%) presentan resistencias al corte similares en comparación con los contenidos de 60% y en algunos casos se reportan resistencias mayores por lo que se concluye que para estas condiciones de experimento las emulsiones asfálticas con residuos de entre 50% y 55% y en consecuencia con baja viscosidad pueden ser usadas como riegos de adherencia sin ningún inconveniente en los procedimientos constructivos del pavimento, verificando el desempeño del riego mediante el complemento del ensayo de Laboratorio de Caminos de Barcelona.

La dosificación de 0.3 l/m<sup>2</sup> usada durante la experimentación aparentaba no ser suficiente para trabajar como un adecuado riego de liga en comparación con la dosificación de 0.5 l/m<sup>2</sup> la cual luego de ser aplicada cubría perfectamente la superficie a adherir. Los resultados para el ensayo de corte LCB muestran que la primera dosificación representa mejor desempeño en determinados resultados y que puede ser aplicada y reproducida en campo como una opción viable de riego de liga durante la construcción de pavimentos. Esto puede ser consecuencia de que

el riego de liga a pesar de ser requerido en el proceso constructivo como una interfaz para generar adherencia entre las capas que componen el pavimento, bien podría trabajar como una interfaz que induzca al deslizamiento de estas capas en ciertas condiciones, si las características del riego no son las adecuadas como un exceso en la dosificación o un exceso en el contenido asfáltico. Por ello la relevancia de la investigación en emulsiones asfálticas usadas como riego de liga y complementadas mediante un ensayo que evalúe su comportamiento.

A partir de los resultados de los ensayos LCB se complementa la normativa N-CMT-4-05-001-06 y se sustenta la aplicación de emulsiones con bajos contenidos asfálticos como una opción sustentable durante la construcción de pavimentos entendiendo que una emulsión de bajo contenido representa un ahorro de recursos durante el proceso de construcción preservando los estándares de calidad en un riego de adherencia. Para los experimentos acotados como riegos convencionales a un contenido asfáltico de 60% se obtuvieron para el parámetro de carga máxima en resistencia al corte valores promedio de 4.67 kN y 6.45 kN respectivamente para dosificaciones de 0.3 l/m<sup>2</sup> y 0.5 l/m<sup>2</sup>, mientras que los experimentos con emulsiones a 55% de contenido asfáltico presentaron 6.27 kN y 5.25 kN de carga al corte y los experimentos de emulsiones al 50% de contenido asfáltico presentaron 6.38 kN y 4.74 kN para las mismas dosificaciones lo que arroja resistencias de entre 4.67 kN a 6.45 kN que bien establecen la opción de diseñar una emulsión asfáltica que cumpla requerimientos de resistencia tomando como referencia estos límites. Por otra parte los datos de cargas máximas enunciadas anteriormente y reflejadas como esfuerzos de corte resultan en valores de 0.34 MPa, 0.35 MPa y 0.34 MPa respectivamente para los contenidos en emulsiones súper estables de 60%, 55% y 50% lo que confirma nuevamente la posibilidad de trabajar con una emulsión de menor contenido asfáltico como riego de adherencia bajo condiciones de especificaciones particulares.

Respecto a las energías de fractura obtenidas a partir de los ensayos LCB se muestra que corriendo el ensayo hasta después de la falla a la carga máxima

para poder completar la gráfica de Carga-Desplazamiento, los especímenes contruidos con emulsión de rompimiento súper estable tienen una falla gradual y más prolongada en comparación con los especímenes contruidos con emulsión de rompimiento rápido, los cuales tienen una falla más abrupta. Por ejemplo, para la figura 4.3 se ejemplifica para el caso particular de un ensayo con emulsión súper estable y emulsión rápida a 55% de contenido asfáltico donde la energía requerida para llevar a la falla la emulsión súper estable equivale a 11.86 J/m<sup>2</sup> mientras que la emulsión rápida requiere únicamente 5.48 J/m<sup>2</sup>, lo cual también se observa a través del análisis de la carga máxima alcanzada para cada ensayo donde se obtuvo 7.02 kN y 5.04 kN respectivamente. Bajo este análisis de energía de fractura también se observa que la emulsión súper estable permite mayores desplazamientos antes de alcanzar la falla con 3.74 mm en comparación con 1.51 mm que alcanza la emulsión de rompimiento rápido.

La metodología aquí descrita permite satisfacer condiciones de especificaciones particulares para emulsiones asfálticas utilizadas como riegos de liga donde se complementa una especificación de emulsión convencional caracterizada mediante pruebas de la N-CMT-4-05-001-06 con un requerimiento específico de desempeño en campo y se establezcan los límites mínimos necesarios de esfuerzo a corte que deberá satisfacer el riego según la exigencia del proyecto. Al igual que hoy en día se diseña la estructura de un pavimento, debe de considerarse el diseño del riego de adherencia para garantizar que la estructura trabaje de forma continua. Para los experimentos particulares que se ensayaron la emulsión con desempeño superior es la emulsión de rompimiento súper estable curada a 3 días con una dosificación de 0.3 l/m<sup>2</sup>, 55% de contenido asfáltico, 8.23 kN de carga máxima y 0.51 MPa de esfuerzo a corte obtenido a partir del ensayo de Laboratorio de Caminos de Barcelona. La caracterización de los experimentos LCB fue realizada para condiciones con temperaturas ambiente de 25 a 27°C que fue donde se encontró continuidad en los resultados, y se observó de forma atípica que algunos ensayos LCB que se corrieron a temperaturas ambiente de 0°C presentaron resistencias de carga a la falla por debajo de los 1.5 kN por lo cual no

fueron incluidos dentro de esta investigación, se propone que la temperatura de trabajo del riego de liga es variable que debería diseñarse debido a la susceptibilidad térmica del asfalto.

## **6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

La presente investigación acotó los ensayos realizados a especímenes de laboratorio, teniendo como área de investigación la revisión de adherencias en condiciones reales de campo con sobre carpetas nuevas, superficies existentes y superficies fresadas, así como hacer ensayos para evaluar la adherencia de los riegos bajo variaciones en las temperaturas ambiente. Además se sugiere la evaluación de adherencias en tramos tendidos mediante pavimentadoras de riego sincronizado con el fin de evaluar estas nuevas tecnologías.

## 7. LITERATURA CITADA

Ahmed S., Dave E., Behnia B., Buttlar W., Exline M. (2010) Fracture characterization of gap-graded asphalt mixtures and thin bonded wearing courses. *International Journal of Pavement Research and Technology*. Vol. Vol. 3 pp. 128-134.

Arana J. González J. (2002) *Mecánica de Fractura*. Universidad del país Vasco. pp. 242.

Aristides G., Karlaftis G., Badr A. (2015) Predicting asphalt pavement crack initiation following rehabilitation treatments. *Transportation Research*. Part C. pp. 8

Ayar P., Moreno-Navarro F., Rubio M. (2016) The healing capability of asphalt pavements: A state of the art review. *Journal of cleaner production* 6506 pp. 1:47.

Banihashemrad A., Sahaeifar M., Wilson B., Young A. (2018) Investigation of the Significant Factors Affecting the Shear Bond Strength in Field. *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*. PN. 19-05126. Pp. 1:8

Bowen W. (1997) *Experimentos de campo y el arte de los modelos*. Circular del Colegio de Ingenieros del Perú Vol. 22 pp. 2:5

Canestrari, F., Bocci M. (1997) *Influence of the Old Pavement Surface Conditions on the Effectiveness of Tack Coat Emulsions*. Proceedings of the 2nd World Congress on Emulsion, Bordeaux, France.

Canestrari F., Ferrotti G., Partl M., Santagata E. (2005) Advanced testing and characterization of interlayer shear resistance. *Transportation Research Record* Vol. 1929 pp. 68:78.

Central Federal Lands Highway Division (2005) *Guidelines for using prime and tack coats*. U.S. Department of Transportation. pp. 111.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2008). *NLT-382/08 Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte*. Pp:5

Chen D. (2010) Slippage failure of a new hot-mix asphalt overlay. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. pp. 258-264.

Chen Y., Lopp G., Roque R. (2012) Test Methods to evaluate the effect of interface bonding conditions on top-down and reflective cracking. *Engineering Journal*. Vol. 16 pp. 92-98.

Chen Y., Tebaldi G., Roque R., Lopp G. (2012) Effects of trackless tack interface on pavement top-down cracking performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* Vol. 53 pp 432:439.

Coleri E., Mahmoud A., Batti J., Covey D. (2018) A Field Torque Test System For Tack Coat Performance Evaluation. *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*. PN 19-05381 Pp. 1:7

Collop A.C., Sutanto M.H., Airey G.D., Elliot R.C. (2009) Shear bond strength between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores. *Construction and Building Materials* Vol. 23 pp 2251:2258.

Coria C., Hernández R., Garnica P. (2018) Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista. Instituto Mexicano del Transporte *Documento Técnico No. 72*. pp 385.

D'Andrea A., Tozzo C. (2012) *Interlayer shear failure evolution with different test equipments*. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. Vol. 53 pp 556-567.

D'Andrea A., Tozzo C., Boschetto A., Bottini L. (2013) Interface roughness parameters and shear strength. *Canadian Center of Science and Education*. Vol. 10 pp. 10.

- Deysarkar I. (2004) *Test set-up to determine quality of tack coat*. Collection for University of Texas at El Paso. pp. 250.
- Diakhaté M., Phelipot A., Millien A., Petit C., Pouteau B., Goacolou H. (2007) *Comportement en cisaillement des couches d'accrochage: comparaison entre essais monotones de cisaillement et de torsion*. Laboratoire Mécanique et Modélisation des Matériaux et Structures du Génie Civil. pp. 8.
- Diakhaté M., Phelipot A., Millien A., Petit C. (2010) Shear fatigue behaviour of tack coats in pavements. *Road Materials and Pavement Design*. Vol. 7 pp. 201-222.
- Diakhaté M., Millien A., Petit C., Phelipot A., Pouteau B. (2011) Experimental investigation of tack coat fatigue performance: Towards an improved lifetime assessment of pavement structure interfaces. *Construction and Building Materials* Vol. 25 pp 1123:1133.
- Giovanon O., Buono F. (2008) Riego de liga, su importancia estructural y análisis tensional. Comisión Permanente del Asfalto XXXV Reunión del Asfalto. Pp. 194:212
- Ghaly N.F., Ibrahim I.M., Noamy E.M. (2014) Tack Coats for Asphalt Paving. *Egyptian Journal of Petroleum* Vol. 23 pp. 61:65.
- Guerra C., Cabrera A., Fernández L. (2003) Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* Vol. 37 pp. 3:10
- Hachiya Y. 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.
- Hartadi M. (2009) *Assessment of bond between asphalt layers*. Department of Civil Engineering Nottingham Transportation Engineering Centre. pp. 294.



Ibañez H. (2003) *Uso de emulsiones en pavimentos asfálticos*. Universidad Austral de Chile. pp. 224.

Jaskula P. (2014) *Influence of compaction effectiveness on interlayer bonding of asphalt layers*. The 9<sup>th</sup> International Conference “Environmental Engineering”. pp. 7

Johnson E. (2015) *Tack coat testing-Measuring field bond strength*. Office of Materials and Road Research-Minnesota Department of Transportation. pp. 67.

Leng Z., Ozer H., Al-Qadi I., Carpenter S. (2008) Interface Bonding Between Hot-Mix Asphalt and Various Portland Cement Concrete Surfaces. *Transportation Research Record* Vol. 2057 pp. 46:53.

Lv Q. y Bahia H. (2018) Factors Affecting the Tracking Performance of Tack Coat Materials. *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*. Pp. 1:18

Ministerio de Fomento (2015). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3. *Boletín Oficial del Estado*. Pp. 365.

Miró R., Martínez A., Jiménez F. (2005) Assessing heat-adhesive emulsions for tack coats. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport* Vol. 158 pp. 45:51.

Miró R., Martínez A., Jiménez F. (2006) Evaluation of effect of heat-adhesive emulsions for tack coats with shear test: from the road research laboratory of Barcelona. *Transportation Research Record* Vol. 1970 pp. 64:70.

Mohammad L. Elseifi M., Bae A., Patel N. (2012) Optimization of Tack Coat for HMA Placement. *National Cooperative Highway Research Program*. 712. Pp. 1:145

Mohammad L., Raqib A., Huang B. (2002). Influence of Asphalt Tack Coat Material on Interface Shear Strength. *Transportation Research Record* Vol. 1789 pp. 56:65

Ontiveros L. (2013) *Evaluación de la adherencia entre capas de pavimento empleando diferentes emulsiones asfálticas*. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 140.

Raab C., Partl M. (2009) *Influence of the gap width between the shearing rings on interlayer shear bond testing*. *Enviroad*. pp. 8.

Raab C., Partl M. (2009) Interlayer bonding of binder, base and subbase layers of asphalt pavements: Long-term performance. *Construction and Building Materials* Vol. 23 pp. 2926:2931.

Redman A. (2010). Emulsion Basics. *Midwestern Pavement Preservation Partnership*

Reposeiras A., Vega A., Calzada M, Castro D. (2013) New procedures to control the tack coat applied between bituminous pavement layers. *Construction and Building Materials*. Vol. 44 pp. 228-235.

Reposeiras A.C., Castro D., Vega A., Rodriguez J. (2013) Test Methods and Influential Factors for Analysis of Bonding between Bituminous Pavement Layers. *Construction and Building Materials*. Vol. 43 pp. 372:381.

Reposeiras A.C., Vega A., Calzada M., Castro D. (2012) Influence of surface macrotexture and binder dosage on the adhesion between bituminous pavement layers. *Construction and Building Materials*. Vol. 28 pp. 187:192.

Rico A. (2012) *La ingeniería de suelos en las vías terrestres* 2. Ed. Limusa SA de CV, México Vol 2 pp. 99

Rodriguez R., Castaño V., Martínez M. (2001) *Emulsiones Asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte. Documento Técnico No. 23 pp. 48

Roffé J. (2017) *Innovative technology for improved durability-a global perspective*. Bitumen Emulsion Federation. pp. 30.

Salazar J. (2011) Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano. *Métodos y Materiales* Vol. 1 pp. 25:38.

Sapei J., González R. (2014) Emulsion primers, their contribution to bonding. *Infraestructura Vial*. Vol. 16 pp. 33-43.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2006) Materiales para pavimentos N-CMT-4-05-001/06. *Características de los materiales-Calidad de Materiales Asfálticos*. pp. 1:13

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*. Vol. 73 pp. 771:806.

Stasiuk L., Soliman H., Anthony A. (2018) Effect of Emulsion Type on Bond Behaviour of Asphalt Concrete Layers in Cold Regions. *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*. Pp. 1:19

Song W., Shu X., Huang B., Woods M. (2015) Factors affecting shear strength between open-graded friction course and underlying layer. *Construction and Building Materials*. Vol. 101 pp 527-535.

Swiertz D., Abouelsaad A., Bahia H. (2018) Study of Factors Affecting Curing Of Asphalt Emulsion Tack Coats. *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*. Pp.1:14

Tashman L., Nam K., Papagiannakis T. (2006) *Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers*. Washington State Department of Transportation. pp. 91.

Transportation Research Board (2006) *Asphalt emulsion technology*. Transportation Research Circular. pp. 58.

Transportation Research Board (2007) *Asphalt emulsion technology Review of Asphalt Emulsion Residue Procedures*. Transportation Research Circular. pp. 34.

Tschegg E., Kroyer G., Tan D., Stanzl-Tschegg S., Litzka J. (1995) Investigation of Bonding Between Asphalt Layers on Road Construction. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 121 pp. 309:316

Tschegg E., Macht J., Jamek M., Steigenberger J. (2007) Mechanical and fracture mechanical properties of asphalt–concrete interfaces. *ACI Materials Journal*. Vol. 104 pp. 474:480.

Vaitkus A., Cygas D., Laurainavicius A., Vorobjovas V., Kleiziene R. (2012) Research of Asphalt Layer Bonding in Lithuanian Pavement Structures. *Gradevinar 11*. Pp. 915:921

Wang J., Xiao F., Chen Z., Li X., Amirghanian S. (2017) Application of tack coat in pavement engineering. *Construction and Building Materials*. Vol. 152 pp. 856:871.

West R., Zhang J., Moore J. (2005) *Evaluation of bond strength between pavement layers*. National Center of Asphalt Technology-Auburn University. pp. 64.

Yao B., Li F., Wang X., Cheng G. (2016) Evolution of the Shear Characteristics of Steel-Asphalt Interface by a Direct Shear Test Method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Pp: 1:32

Zamora D., Calzada M., Castro D., Vega A. (2010) New procedure for measuring adherence between a geosynthetic material and a bituminous mixture. *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 28 pp. 483-489.

## 8. ANEXOS

### 8.1 Anexo Fotográfico.



Calentamiento de emulsificante C25 para emulsión rápida.



Preparación de solución jabonosa para emulsión rápida.



Medición de PH en solución jabonosa.



Solución jabonosa para emulsión al 50%, 55% y 60% de contenido asfáltico.



Planta de emulsión utilizada propiedad de Surfax SA de CV



Contenido de ligante para emulsión asfáltica.



Emulsión asfáltica rápida con contenido asfáltico de 50%, 55% y 60%.



Pesaje de mezcla asfáltica utilizada para elaboración de pastillas Marshall.



Calentamiento de mezcla asfáltica.



Colocación de mezcla asfáltica en moldes Marshall previo a compactación.





Compactador Marshall utilizado para elaborar pastillas.



Dosificación de emulsión asfáltica sobre pastillas Marshall.



Pastillas con riego de liga en proceso de curado.



Proceso de rompimiento de emulsión asfáltica.



Pastillas para ensayo Laboratorio de Caminos de Barcelona.



Montaje de pastillas en moldes de dispositivo LCB.



Montaje de dispositivo LCB en prensa hidráulica.



Proceso de falla durante aplicación de carga en ensayo LCB.



Punto de falla en riego de liga para ensayo LCB.



Fabricación de losa de concreto asfáltico.



Ensayo de círculo de arena.



Ensayo de péndulo inglés.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ