



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

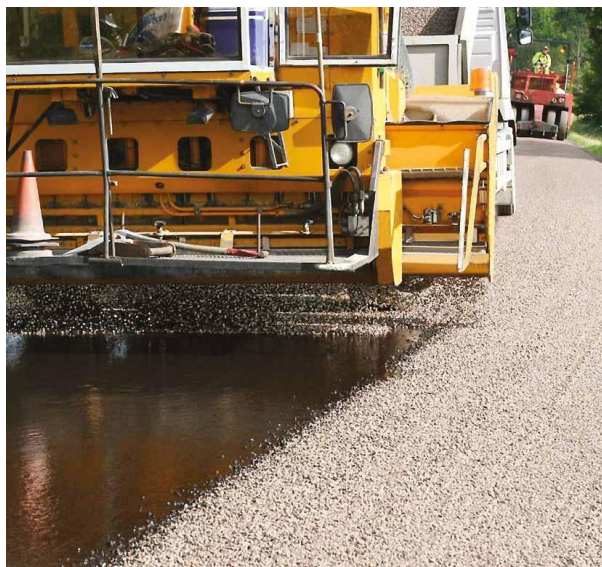
Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Propuesta

Diseño y evaluación del desempeño de emulsiones asfálticas de alta viscosidad para tratamientos superficiales



Preparado por:

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Documento generado con base en el Art. 6, inciso b) de la Ley 8114 y lo señalado en el Capít.7, Art. 68 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

San José, Costa Rica

Octubre, 2022



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 2 de 61

1. Informe: EIC-Lanamme-INF-1174-2022		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Diseño y evaluación del desempeño de emulsiones asfálticas de alta viscosidad para tratamientos superficiales.		4. Fecha del Informe 06 de octubre de 2022
5. Organización y dirección: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500		
6. Notas complementarias		
7. Resumen <i>El tratamiento superficial es una técnica para la preservación de pavimentos que consiste en la aplicación de un riego uniforme de emulsión asfáltica sobre la cual se coloca una capa de agregados de igual tamaño. Su función principal es impermeabilizar la estructura del pavimento y brindar una superficie de rueda resistente al deslizamiento. Para que el tratamiento superficial tenga un adecuado desempeño, es decir, que el agregado no se desprenda por el paso del tráfico y el riego de emulsión asfáltica no se escurra por la pendiente o bombeo del camino, se recomienda que la emulsión sea de rompimiento rápido de alta viscosidad. Sin embargo, en Costa Rica no se cuenta con este tipo de emulsiones y las intervenciones mediante tratamientos superficiales se han colocado con emulsiones de baja viscosidad.</i> <i>La siguiente propuesta de investigación tiene como objetivo diseñar y evaluar el desempeño de emulsiones asfálticas de alta viscosidad en el laboratorio para tratamientos superficiales con el fin de proponer su producción en el país. El uso de tratamientos superficiales de alto desempeño en rutas no pavimentadas implicará caminos más durables con su consecuente beneficio en la eficiencia de la inversión de los recursos públicos y en mejores condiciones para los usuarios.</i>		
8. Palabras clave	9. Nivel de seguridad: No aplica	10. Núm. de páginas 63



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 3 de 61

Tratamiento superficial, emulsión asfáltica de alta viscosidad; CRS- 2h, CRS-2hL		
11. Elaborado:		
Ing. Juan Carlos Múnera Miranda		
Fecha: 06/10/2022	Fecha: / /	Fecha: / /
12. Revisado por:	13. Revisión Legal:	14. Aprobado por:
Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA		Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
Fecha: 06/10/2022	Fecha: / /	Fecha: 06/10/2022



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 4 de 61

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	8
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVO GENERAL	10
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
JUSTIFICACIÓN	10
ALCANCE Y LIMITACIONES	12
ANTECEDENTES	13
MARCO TEÓRICO	15
TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	15
COMPONENTES DE UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL	16
AGREGADOS	17
EMULSIÓN ASFÁLTICA	17
CARACTERÍSTICAS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS PARA TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	19
CARGA ELÉCTRICA	19
ROMPIMIENTO	19
VISCOSIDAD	19
TASA DE APLICACIÓN	20
EMULSIONES MODIFICADAS	20
DETERIOROS EN LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	21
FORMULACIÓN, COMPOSICIÓN Y MECÁNICA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS DE ALTA VISCOSIDAD	22
RELACIÓN AGUA-ASFALTO	23
VISCOSIDAD DEL ASFALTO	24
TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS	24
TIPO Y CANTIDAD DE AGENTE SURFACTANTE	26
TEMPERATURA DE EMULSIFICACIÓN	28
PRESENCIA DE SAL EN EL ASFALTO	29



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 5 de 61

ADITIVOS	30
ENSAYOS DE DESEMPEÑO DE LABORATORIO PARA EMULSIONES Y TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	31
<i>ENSAYOS DE DESEMPEÑO EN EL SISTEMA AGREGADO-LIGANTE ASFÁLTICO</i>	33
<i>ENSAYOS DE DESEMPEÑO EN LA EMULSIÓN ASFÁLTICA</i>	36
<i>ENSAYOS DE DESEMPEÑO EN EL RESIDUO ASFÁLTICO</i>	38
METODOLOGÍA PROPUESTA.....	40
FASE 1: DISEÑO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ALTA VISCOSIDAD	41
<i>MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES</i>	41
<i>DISEÑO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ALTA VISCOSIDAD CRS-2H Y CRS-2HL</i>	43
FASE 2: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO.....	46
<i>ENSAYOS DE DESEMPEÑO EN EL SISTEMA AGREGADO-LIGANTE ASFÁLTICO</i>	46
<i>ENSAYOS DE DESEMPEÑO EN LA EMULSIÓN ASFÁLTICA</i>	47
<i>ENSAYOS DE DESEMPEÑO EN EL RESIDUO ASFÁLTICO</i>	49
RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS	51
CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO	53
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	54
METAS Y ENTREGABLES	56
RECURSOS REQUERIDOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tratamiento superficial.....	16
Figura 2. Agregado retenido ensayo de barrido (a) y Vialit (b) para emulsiones asfálticas sin y con modificación	21
Figura 3. Deterioros en tratamientos superficiales: a) exudación y b) desprendimiento de agregado	22



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 6 de 61

Figura 4. Viscosidad de la emulsión como función de la velocidad de flujo a diferentes contenidos de asfalto.	26
Figura 5. Efecto del uso de diferentes emulsificantes en la viscosidad de la emulsión asfáltica.	28
Figura 6. Efecto de agentes peptizantes en la viscosidad de la emulsión asfáltica	30
Figura 7. Estrategias para aumentar la viscosidad de la emulsión asfáltica	31
Figura 8. Ensayos para especificación por grado de desempeño de emulsiones asfálticas	33
Figura 9. Equipos para ensayos de desempeño en tratamientos superficiales: (a) ABS, (b) Vialit, (c) barrido (c), viscosímetro rotacional (d), probetas de estabilidad (e) y reómetro de corte dinámico (f)	34
Figura 10. Resultados típicos de ensayo de corte a tres pasos con viscosímetro rotacional	37
Figura 11. Metodología propuesta	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Emulsiones asfálticas para tratamientos superficiales.....	18
Tabla 2. Emulsificantes para emulsiones de alta viscosidad	27
Tabla 3. Métodos de ensayo para evaluar el desempeño de tratamientos superficiales ..	39
Tabla 4. Arreglo diseño factorial de dos factores	43
Tabla 5. Matriz del diseño	44
Tabla 6. Niveles de análisis factorial 2^4	45
Tabla 7. Curado y acondicionamiento ensayos en el sistema agregado-asfalto residual .	47



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 7 de 61

Tabla 8. Curado, acondicionamiento y velocidad de corte ensayos en la emulsión asfáltica	49
Tabla 9. Condiciones de carga y temperatura ensayo en el residuo asfáltico	50
Tabla 10. Participantes del equipo investigador	53
Tabla 11. Participantes del equipo investigador (convenio LanammeUCR-RECOPE)	53
Tabla 12. Actividades para el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto ..	54
Tabla 13. Cronograma de la investigación	55
Tabla 14. Costo de personal para el desarrollo del proyecto	Error! Bookmark not defined.
Tabla 15. Costo de ensayos para el desarrollo del proyecto	Error! Bookmark not defined.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 8 de 61

RESUMEN EJECUTIVO

El tratamiento superficial es una técnica para la preservación de pavimentos que consiste en la aplicación de un riego uniforme de emulsión asfáltica sobre la cual se coloca una capa de agregados de igual tamaño. Su función principal es impermeabilizar la estructura del pavimento y brindar una superficie de ruedo resistente al deslizamiento. Para que el tratamiento superficial tenga un adecuado desempeño, es decir, que el agregado no se desprenda por el paso del tráfico y el riego de emulsión asfáltica no se escurra por la pendiente o bombeo del camino, se recomienda que la emulsión sea de rompimiento rápido de alta viscosidad. Sin embargo, en Costa Rica no se cuenta con este tipo de emulsiones y las intervenciones mediante tratamientos superficiales se han colocado con emulsiones de baja viscosidad.

La siguiente propuesta de investigación tiene como objetivo diseñar y evaluar el desempeño de emulsiones asfálticas de alta viscosidad en el laboratorio para tratamientos superficiales con el fin de proponer su producción en el país. El uso de tratamientos superficiales de alto desempeño en rutas no pavimentadas implicará caminos más durables con su consecuente beneficio en la eficiencia de la inversión de los recursos públicos y en mejores condiciones para los usuarios.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento superficial es una solución para la preservación de pavimentos que tiene como objetivo principal proveer una superficie de ruedo impermeable con características antideslizantes. Este tipo de sello asfáltico consiste en la aplicación de una capa uniforme emulsión asfáltica sobre la superficie a tratar, que luego es cubierta por una capa de agregados de tamaño uniforme. El tratamiento puede ser de una o hasta tres capas de emulsión asfáltica y agregado. La técnica tiene como principales beneficios, el proteger la superficie el pavimento de los agentes climáticos, impermeabilizar la superficie de ruedo,



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 9 de 61

proceso y equipo de construcción básicos, intervenciones de menor costo y ambientalmente más sostenibles (menor consumo de energía y generación de gases efecto invernadero).

Para que el tratamiento superficial tenga el desempeño esperado, aparte de las buenas prácticas constructivas, los materiales deben cumplir con ciertas características, por ejemplo, los agregados deben tener una granulometría uniforme en cada una de sus capas, estar limpios, ser resistentes y ser afines a la emulsión asfáltica, entre otros aspectos. A su vez, la emulsión asfáltica debe ser lo suficientemente fluida para el bombeo y riego sobre la superficie a tratar durante la construcción, y por otro, tener una viscosidad elevada donde el agregado quede embebido y adherido, ayudando a evitar el escurrimiento por la pendiente o bombeo de la superficie. Además, debe brindar una elevada impermeabilidad a la superficie sobre la que se aplica, romper rápido para la pronta apertura al tráfico y ser durable. Por estas razones, las emulsiones asfálticas que se recomiendan para los tratamientos superficiales son de rompimiento rápido de alta viscosidad (CRS-2h, CRS-2hL, entre otras). Sin embargo, en Costa Rica por muchos años, por la falta de disponibilidad en el mercado nacional, se han utilizado las emulsiones asfálticas catiónicas de rompimiento rápido de baja viscosidad (CRS-1), lo que se considera afecta el desempeño y durabilidad de los tratamientos superficiales debido principalmente a la dificultad de que las partículas de agregado queden embebidas entre 1/2 y 2/3 partes dentro de la película de emulsión, esto debido a su alta fluidez y poco espesor.

La siguiente investigación tiene como objetivo diseñar y evaluar el desempeño emulsiones asfálticas de alta viscosidad/ tratamientos superficiales en el laboratorio con el fin de proponer su producción en Costa Rica. Los productos de la investigación proporcionarán información valiosa para que, de ser factible, se produzcan este tipo de emulsiones asfálticas que vendrían a mejorar sustancialmente la aplicación de los tratamientos superficiales en el país. Una mejor implementación de los tratamientos superficiales impacta la eficiencia en la inversión de los fondos públicos, aumentando la vida útil de la aplicación, con mejores condiciones de riego durante todo el año, menores costos de



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 10 de 61

mantenimiento y operación, así como un impacto positivo en la salud de la población al reducir la emisión de polvo cuando son utilizadas como capas de ruedo en rutas no pavimentadas.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar recomendaciones para la producción de emulsiones asfálticas de alta viscosidad para tratamientos superficiales mediante su diseño y evaluación del desempeño en el laboratorio con la finalidad de proponer su producción en Costa Rica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar en el laboratorio, mediante la variación de parámetros de formulación, composición y mecánica del molino coloidal, emulsiones asfálticas que cumplan con la alta viscosidad requerida para tratamientos superficiales y demás propiedades de calidad.
2. Evaluar el desempeño de las emulsiones diseñadas mediante ensayos que consideren las condiciones de aplicación y principales deterioros de los tratamientos superficiales.
3. Establecer un procedimiento de diseño de las emulsiones asfálticas de alta viscosidad para tratamientos superficiales producto de la experiencia generada.
4. Identificar las variables críticas en la formulación y producción de la emulsión asfáltica, que podrían incidir en el cumplimiento de especificaciones y condiciones requeridas de desempeño de los tratamientos superficiales, para tomarlos en cuenta en una etapa posterior de implementación a escala industrial.

JUSTIFICACIÓN

En Costa Rica el tratamiento superficial es una técnica para la preservación de pavimentos que se ha venido implementando en caminos de bajo a mediano tráfico para proveer una



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 11 de 61

superficie de rueda impermeable que proteja el pavimento (principalmente caminos de grava) y sea resistente al deslizamiento. Para que el tratamiento superficial tenga un adecuado desempeño, es decir, que el agregado no se desprenda por el paso del tráfico y el riego de emulsión asfáltica no se escurra por la pendiente o bombeo del camino, se recomienda que la emulsión sea de rompimiento rápido de alta viscosidad. Con este tipo de emulsión asfáltica el agregado va a quedar embebido firmemente, generando una mayor adhesión. Si bien la aplicación se ha implementado, la emulsión asfáltica que se utiliza actualmente para los tratamientos superficiales es de baja viscosidad (CRS-1), lo cual deriva en las implicaciones antes mencionadas que afectan la durabilidad y economía de la técnica.

A nivel de normativa nacional, el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR 2020) en su Sección 411 “*Tratamientos superficiales asfálticos*” señala que para los tratamientos superficiales la emulsión asfáltica deberá ser de rompimiento rápido, de alta viscosidad (MOPT, 2022). Sin embargo, en el país únicamente se cuenta con emulsiones asfálticas: catiónicas de rompimiento lento y rápido, ambas de baja viscosidad. Tomando en cuenta que el uso de tratamientos superficiales ha demostrado ser un tipo de intervención eficiente y difundido en Costa Rica, se considera necesario optimizar el tipo de emulsiones asfálticas para tratamientos superficiales, valorando y cuantificando los beneficios obtenidos en los tratamientos superficiales, con el objetivo de mejorar el desempeño y durabilidad de los pavimentos.

El propósito de la investigación es desarrollar en el laboratorio emulsiones de alta viscosidad para proponer su producción en Costa Rica. Los productos que se generen con la propuesta de investigación proporcionarán información valiosa, para la producción de este tipo de emulsiones en el país y potenciar la técnica de tratamientos superficiales mediante la mejora en el desempeño, la eficiencia en la inversión de los recursos públicos, el uso de técnicas ambientalmente más amigables, acceso a más proveedores del servicio



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 12 de 61

(pequeñas y medianas empresas), impacto en la salud de la población y mitigación de los deterioros en los pavimentos.

ALCANCE Y LIMITACIONES

La investigación comprende el diseño de emulsiones asfálticas de alta viscosidad en el laboratorio y su posterior evaluación del desempeño mediante ensayos que consideren los requerimientos de estabilidad de las propiedades reológicas en el tiempo, capacidad de bombeo, manipulación y riego, resistencia al escurrimiento y los principales modos de falla de los tratamientos superficiales como lo son el desprendimiento de agregado, daño por humedad y la exudación.

Las fuentes de agregado para evaluar el desempeño en el sistema agregado-ligante asfáltico se limitan una, contemplando sólo la granulometría D de acuerdo con la Sección 411 del CR 2020. Los agregados con granulometrías E y F son muy finos y difíciles de encontrar limpios. Las granulometrías A y B son muy gruesas y por su tamaño, el espesor de la capa de emulsión no proveería una altura de embebido adecuada.

Se pretende diseñar en el laboratorio dos tipos de emulsión asfáltica de rompimiento rápido de alta viscosidad con y sin polímero: CRS-2h y CRS-2hL. El diseño considera el efecto del tipo de emulsificante, contenido de asfalto y el contenido de polímero en la viscosidad.

Las emulsiones asfálticas se diseñarán en condiciones de laboratorio, y una vez desarrolladas, se deberá comprobar que son reproducibles en planta.

El desempeño de las estructuras de pavimento depende de otros factores como lo son los sistemas de drenaje superficial, la capacidad estructural del pavimento, condiciones ambientales, las características del tráfico (cargas y volumen) y otros. Para el alcance inicial de este proyecto se supondrá que el tratamiento superficial (chip seal) contará con las condiciones óptimas para su desempeño.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 13 de 61

ANTECEDENTES

Sittenfeld (1979) determinó que las cantidades de agregado y emulsión asfáltica que debían utilizarse de acuerdo con el CR-77 eran más elevadas en comparación con las obtenidas por el Método Australiano. Por otra parte, observó que la dosificación de emulsión asfáltica en un mismo proyecto era variable, lo cual era un factor que incidía en el mal desempeño de los tratamientos superficiales en ese momento en el país.

Pintor (1985) analizó las emulsiones asfálticas que se empleaban en ese periodo de tiempo para los tratamientos superficiales en Costa Rica, en su investigación cuestiona la calidad de emulsiones asfálticas disponibles y señala que la razón por la cual los tratamientos superficiales no tienen un buen desempeño radica en las características reológicas y fisicoquímicas que tienen las emulsiones empleadas. Se reportó que un 23 % de las emulsiones muestreadas tenían una viscosidad muy baja, afuera lo límites de especificación. En ese entonces RECOPE producía emulsiones asfálticas CRS-1, RS-1, SS-1 y SS-1h.

A raíz del mal desempeño que se ha observado en las rutas con superficie expuesta (rutas de lastre), el PITRA (2017) planteó el uso de tratamientos superficiales como alternativa para el mantenimiento de rutas secundarias y terciarias del país.

Las emulsiones asfálticas se especifican actualmente mediante ensayos empíricos que no tienen relación directa con el desempeño de los tratamientos superficiales. El Programa Nacional de Investigación Cooperativa de Carreteras (NCHRP, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, en el reporte 837 "*Performance-related specifications for emulsified asphaltic binders used in preservation surface treatments*" propone una nueva generación de ensayos para seleccionar de forma racional las emulsiones asfálticas para los tratamientos de preservación de pavimentos, dentro de un sistema de clasificación de grado por desempeño (EPG) (NCHRP, 2017). Los ensayos EPG evalúan el desempeño de la



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 14 de 61

emulsión y el residuo asfáltico durante el proceso de transporte, construcción y ante los principales deterioros durante el periodo de servicio, tomando en consideración las condiciones de tráfico y clima.

En los últimos años, se ha dado un aumento en la construcción de obras viales nacionales y cantonales, lo cual ha representado un aumento en la producción de emulsiones asfálticas. Entre los años 2013 y 2018 se duplicó la comercialización de 45 758 barriles a 92 878 barriles (RECOPE, 2019). En esta coyuntura la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) decide desarrollar una nueva planta de emulsiones asfálticas con capacidad ampliada, en el Plantel de El Alto en Ochomogo, la cual inaugura y pone en operación en el año 2020. La nueva planta, aparte de ampliar su capacidad de producción y almacenamiento, está diseñada para fabricar emulsiones modificadas con polímero, lo cual abre un abanico amplio de tipos de emulsiones asfálticas que se podrían aplicar en el país. RECOPE en los últimos dos años ha mostrado interés en diseñar y fabricar nuevos tipos emulsiones asfálticas, en especial las modificadas con polímero con el objetivo de aumentar la durabilidad de los tratamientos en los que se utilizan.

La red vial nacional de Costa Rica está compuesta por 8 091 km entre rutas pavimentadas, con capas de protección superficial y no pavimentadas. El 14,31 % de estas rutas tienen como superficie de ruedo un tratamiento superficial múltiple y el 0,25 % un tratamiento superficial simple. Este tipo de superficie está dentro de la nueva clasificación que implementa Planificación Sectorial del MOPT. No obstante, su construcción y mantenimiento se encuentra contemplado dentro de los contratos de mantenimiento de la red vial nacional pavimentada. Los tratamientos superficiales brindan una condición de ruedo superior a una ruta de superficie expuesta (ruta de lastre) pero son superficies de poca durabilidad, que corren el riesgo de ser atendidos con actividades inapropiadas de mantenimiento (LanammeUCR, 2022).



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 15 de 61

En marzo del 2022 se oficializa la actualización del “*Manual de Especificaciones General para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR 2020*” y en su Sección 411 “Tratamientos superficiales asfálticos” se da un cambio muy importante en cuanto al tipo de emulsiones asfálticas que se pueden aplicar en los tratamientos superficiales, se exige que sea de rompimiento rápido de alta viscosidad sin o con polímero (MOPT, 2022).

MARCO TEÓRICO

Tratamientos superficiales

Un tratamiento superficial (TS) simple es esencialmente el riego de una capa emulsión asfáltica sobre la superficie a tratar, que inmediatamente es cubierta por una capa de agregado de tamaño uniforme, con el objetivo principal de impermeabilizar el pavimento y brindar una superficie resistente al deslizamiento (Figura 1) (Kroger & Kroger, 2020). Cuando más de una capa de emulsión asfáltica y agregado se aplican, se utiliza el término de tratamiento superficial doble o triple. Los tratamientos superficiales se originaron en la década de 1920 (Hinkle, 1928). Estos primeros usos fueron predominantemente como capas de rodadura en la construcción de caminos de lastre de bajo volumen de tráfico. En los últimos 75 años, los tratamientos superficiales se han convertido en tratamientos de mantenimiento y preservación capaces de tener un buen desempeño en pavimentos de bajo a alto volumen de tráfico. La popularidad de los tratamientos superficiales radica en sus bajos costos iniciales, menor consumo energético y generación de gases de efecto invernadero, y otros factores en comparación con capas de mezcla asfáltica delgada, que influyen en la selección del tratamiento, donde la capacidad estructural del pavimento es suficiente para soportar las cargas existentes (NCHRP, 2005).



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 16 de 61

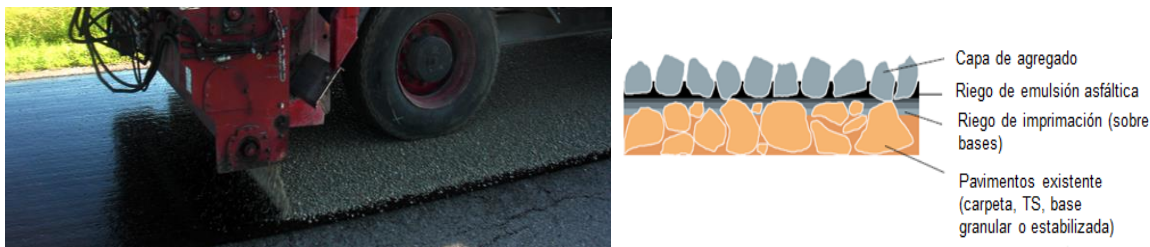


Figura 1. Tratamiento superficial

Las funciones específicas de un TS son (Asphalt Institute, 2008):

- Proveer de una superficie de ruedo duradera y económica para bases granulares con volúmenes de bajo a mediano tráfico. Cuando se utilizan emulsiones asfálticas modificadas con polímero y agregados de alta calidad, los tratamientos superficiales se pueden utilizar en aplicaciones de alto volumen de tráfico.
- Prevenir que el agua superficial penetre la base granular o pavimentos asfálticos que se encuentre con un grado de desgaste o agrietamiento leve, lo cual provocaría el deterioro acelerado de la superficie de ruedo.
- Sellar vacíos, recubrir y adherir partículas sueltas de agregado en la superficie del pavimento.
- Renovar y recuperar la resistencia al deslizamiento de superficies de ruedo donde el agregado ha sufrido pulimento por el desgaste del tráfico.
- Restaurar superficies desgastadas y proteger superficies de pavimento oxidadas.
- Proveer una superficie de ruedo temporal en casos donde se retrase la colocación de una capa de mezcla asfáltica.
- Controlar el polvo en caminos de bajo volumen de tráfico.

Componentes de un tratamiento superficial

La selección de los materiales para un TS generalmente dependerá de las condiciones climáticas, el volumen de tráfico, la calidad y características de la emulsión asfáltica y del



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 17 de 61

agregado, la disponibilidad de materiales y la experiencia. La emulsión asfáltica y el agregado de cobertura constituyen un producto terminado. Las funciones de emulsión asfáltica es sellar la superficie existente contra la intrusión de agua, proporcionar una unión interfacial con el agregado y proporcionar adherencia con la superficie tratada existente. Por su lado, el agregado de cobertura debe proporcionar una buena superficie antideslizante y al mismo tiempo ser resistente al pulido, ser duradero contra los efectos de la abrasión por el tráfico y resistente a la desintegración causada por la intemperie. La selección de materiales se ha ido desarrollando al ir incorporando nuevos tipos de materiales como promotores de adherencia, polímeros para modificación y geotextiles (NCHRP, 2005).

Agregados

La calidad del agregado es importante para que el TS tenga un adecuado desempeño. La calidad del agregado está relacionada con que sean de graduación uniforme, de forma cúbica, resistentes al pulimento, con caras fracturadas, limpios, duraderos y resistentes a la abrasión (NCHRP, 2011; AASHTO, 2021).

Emulsión asfáltica

Las emulsiones asfálticas para tratamientos superficiales deben cumplir con los requisitos de las especificaciones de materiales AASHTO M 140 (2020), AASHTO M 208 (2018) o AASHTO M 316 (2018) o su equivalente INTE C 381 (2020), INTE C 382 (2020) o INTE C 383 (2020) respectivamente, según el tipo de emulsión asfáltica que se seleccione. Los tipos de emulsión asfáltica que se utilizan para los tratamientos superficiales son (Tabla 1):

La selección del de la emulsión asfáltica para un TS se debe basar en las siguientes consideraciones: temperatura de la superficie a tratar, temperatura del aire, tipo y cantidad de tráfico, condición de la superficie, y tipo y condición del agregado a ser aplicado. La



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 18 de 61

cantidad, tipo y grado de emulsión asfáltica para un TS debe ser tal que (Asphalt Institute, 2008):

- Sea suficiente fluida para el riego de la superficie de forma homogénea, pero viscosa de tal manera que la capa de emulsión permanezca uniforme sin que se formen empozamientos en las depresiones o se escurra por la pendiente o bombeo de la superficie
- Después del riego de la capa de emulsión asfáltica, ésta debe conservar su consistencia para mojar y embeber el agregado.
- Curar y desarrollar adherencia rápidamente.
- Después de la compactación y el curado, sostener el agregado firmemente a la superficie del camino para prevenir el desprendimiento por el tráfico.
- No se dé exudación.

Tabla 1. Emulsiones asfálticas para tratamientos superficiales

Autor	Sin modificar	Modificadas con polímero
Asphalt Institute (1965)	RS-1, RS-2, CRS-1, CRS-2	-
Asphalt Institute (2008)	RS-1, CRS-2, CRS-2h, RS-2, HFRS-2, HFRS-2h	CRS-2P, CRS-2L
(ISSA, 2012)	RS-2, RS-2h, HFRS-2, CRS-2, CRS-2h	CHFRS-2P, CRS-2P, CRS-2L
AASHTO (2017)	RS-1, RS-2, HFRS-2, CRS-1, CRS-2	CRS-2hP, CRS-2P, CRS-2sP, CHFRS-2hP, CHFRS-2P, CHFRS-2sP
AASHTO (2018)	-	CRS-2hP, CRS-2P, CRS-2sP, CHFRS-2P, HFMS-2P
ASTM (2021)	RS-1, RS-2, HFRS-2, CRS-1, CRS-2, MS-1, HFMS-1, HFMS-2s	-
MOPT (2022)	CRS-2h, CRS-2, CRS-2s	CRS-2hP, CRS-2P, CRS-2sP, CHFRS-2P



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 19 de 61

Características de las emulsiones asfálticas para tratamientos superficiales

Carga eléctrica

Para tratamientos superficiales se prefieren las emulsiones catiónicas sobre las aniónicas porque son menos sensibles al clima, son promotoras de adherencia y son eléctricamente compatibles con la mayoría de los agregados (McHattie, 2001). Los agregados calizos presentan mayor afinidad con emulsiones aniónicas sin embargo es frecuente que estos agregados presenten alta susceptibilidad al pulimento, generando superficies de ruego con baja fricción y problemas de seguridad vial.

Rompimiento

Las emulsiones asfálticas para TS deben ser de rompimiento rápido (RS) o de rompimiento medio (MS). Se prefieren las emulsiones asfálticas de rompimiento rápido, ya que permiten un curado más rápido y una eliminación más rápida del control del tráfico. Aunque normalmente se deben usar las emulsiones asfálticas de rompimiento rápido para los TS, cuando hay presencia de agregados sucios o en ciertas condiciones climáticas, el uso de emulsiones asfálticas de rompimiento medio puede ser más favorable. capacidad de los compactadores de rodillo para asentar adecuadamente el agregado se reduce considerablemente.

Viscosidad

Debido a que en las aplicaciones de tratamientos superficiales los agregados requieren aproximadamente un 40 % de embebido inicial durante la construcción y entre 50 % a 70 % de embebido final, el uso de emulsiones asfálticas de alta viscosidad es el más recomendado. Si la viscosidad es demasiado baja, la emulsión asfáltica podría escurrirse del pavimento antes de que los agregados queden embebidos o generar películas sobre el pavimento de poco espesor que no permitan que el agregado quede embebido, lo que provocaría una pérdida de agregados debido al tráfico y posibles problemas ambientales



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 20 de 61

(AASHTO, 2021). Sin embargo, para TS simples con granulometrías finas de tamaño máximo nominal de 4,75 mm a 2,38 mm y arenas, se han utilizado emulsiones de baja viscosidad (CRS-1) con tasas de aplicación más bajas en comparación con agregados de granulometrías más gruesas, en los cuales se prefieren las emulsiones de alta viscosidad por las razones antes mencionadas (Asphalt Institute, 2008; Asphalt Institute, 2009). Se debe tener presente que en Costa Rica agregados limpios y uniformes de tamaño máximo nominal de 4.75mm

Tasa de aplicación

Para que el TS tenga un desempeño óptimo, la tasa de aplicación de emulsión asfáltica debe ser la correcta durante la construcción. Muy poca emulsión asfáltica favorece la pérdida de agregados bajo la acción del tráfico, mientras que demasiado emulsión asfáltica provocará exudación y pérdida de fricción. La tasa de aplicación óptima es una función del tamaño y forma del agregado que afecta el volumen de vacíos en la capa de agregado compactado, el volumen y tipo de tráfico, la pendiente del pavimento y la condición de la superficie del pavimento donde será colocado el tratamiento. En el diseño del TS se determina la tasa óptima de emulsión asfáltica considerando todos estos aspectos (AASHTO, 2021).

Emulsiones modificadas

Se ha demostrado que la modificación con polímeros reduce la susceptibilidad a la temperatura, proporciona una mayor adhesión a la superficie existente, aumenta la retención y flexibilidad de los tratamientos y permite que la carretera se abra antes al tráfico (Jackson et al. , 1990; Zaniewski & Mamlouk, 1996; Johnson & King, 2008). Se considera que los polímeros son beneficiosos para minimizar la exudación, ayudar a la retención del agregado y mejorar la durabilidad del TS, y se recomiendan para carreteras de alto volumen de tráfico (Shuler, 1991; Wegman, 1991). La mejora en el desempeño con el uso de emulsiones modificadas con polímero se ha investigado mediante el ensayo de barrido



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 21 de 61

ASTM D 7000 (2019) y el ensayo de Vialit UNE-EN 12272-3 (2003). La retención de agregados mejoró significativamente para una emulsión modificada con respecto a una sin modificar (Figura 2) (Takamura k. , 2003; Adams et al., 2017).

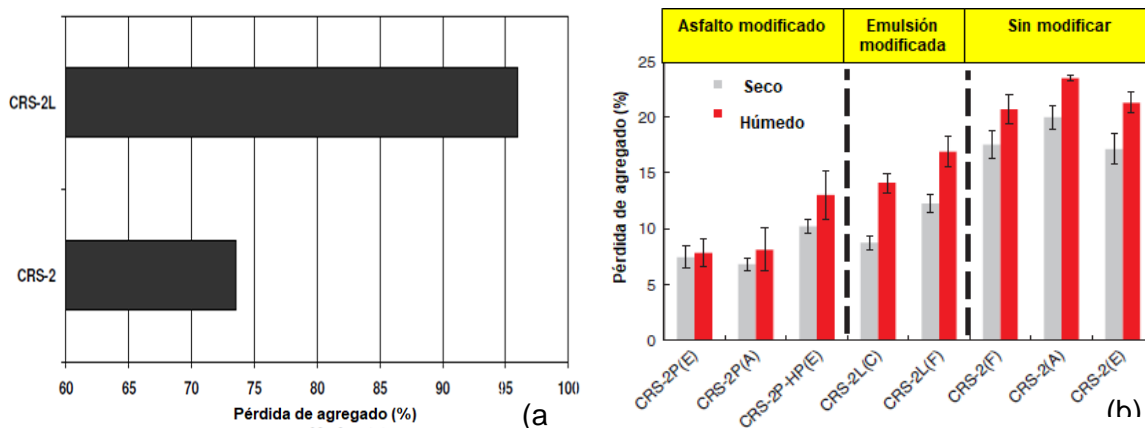


Figura 2. Agregado retenido ensayo de barrido (a) y Vialit (b) para emulsiones asfálticas sin y con modificación

Fuente: Takamura (2003) y Adams (2017)

Deterioros en los tratamientos superficiales

Los tratamientos superficiales se deterioran o fallan como resultado de la oxidación del asfalto, desgaste y pulimento del agregado, exudación, deformación permanente (TS multicapa) y desprendimiento del agregado (Figura 3). La exudación y el desprendimiento de agregado son las fallas más comunes en tratamientos superficiales.

La exudación se manifiesta normalmente por manchas negras por exceso de asfalto en la superficie del tratamiento superficial, con una apariencia suave y resbaladiza donde los agregados son menos visibles, Figura 3a. Este deterioro se localiza generalmente por donde pasan los neumáticos, cuyo paso repetido provoca el embebido excesivo de los agregados. Se asocia a tasas muy altas de emulsión de asfáltica, uso de agregados con graduación no uniforme y a climas calientes, con altas temperaturas, donde el asfalto es



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 22 de 61

más susceptible a ablandarse. La exudación puede causar una condición resbaladiza y peligrosa, especialmente durante la época lluviosa.

El desprendimiento del agregado ocurre cuando falla la adhesión entre el agregado y el ligante asfáltico, lo que hace que el agregado se desplace, siendo el daño por humedad un catalizador de este fenómeno. Las zonas con desprendimiento de agregado tienen una apariencia muy irregular, debido a que la superficie no está completamente cubierta por el agregado, como se muestra en la Figura 3b. Esta condición es peligrosa por el agregado suelto que con el paso de las llantas de los vehículos puede impactar los parabrisas o generar pérdida de tracción. Además, las zonas sin agregado son más propensas al deslizamiento, por la pérdida de fricción y permiten el ingreso de humedad a las capas subyacentes disminuyendo la capacidad estructural y vida útil del pavimento.

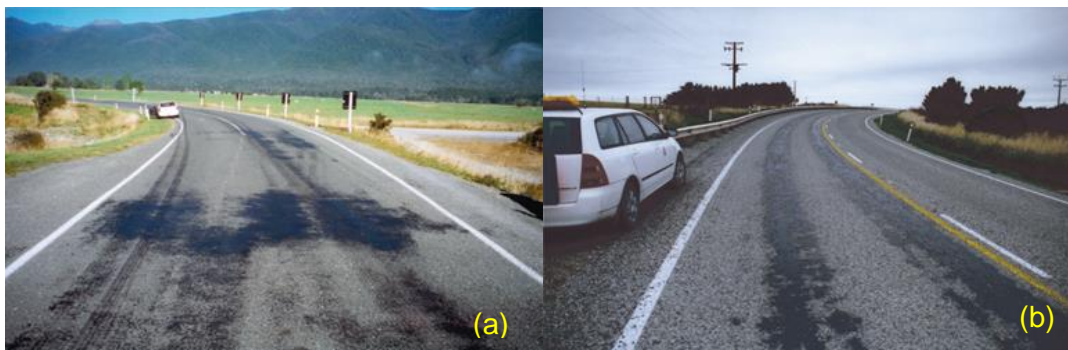


Figura 3. Deterioros en tratamientos superficiales: a) exudación y b) desprendimiento de agregado

Fuente: Transit NZ (2005)

Formulación, composición y mecánica de las emulsiones asfálticas de alta viscosidad

Kroger & Kroger (2020) afirma que para un tratamiento superficial “el ligante debe cumplir una serie de requisitos para poder ser utilizado en los tratamientos superficiales. Por un lado, debe ser lo suficientemente líquido para poder ser bombeado y regado en la superficie



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 23 de 61

a tratar durante la construcción y por otro debe lograr una viscosidad elevada en servicio para mantener adherido al agregado y no fluir de la superficie. Asimismo, debe brindar una elevada impermeabilidad a la superficie sobre la que se riega y ser durable” (p.120). La viscosidad de la emulsión se ve afectada por factores como el tamaño y distribución de las partículas (Boussad et al., 1995), la relación de agua-asfalto (Sherman, 1970), química y cantidad del agente surfactante (Barnes, 1994; Lesueur et al., 2003), la viscosidad del asfalto (Barnes, 1994) y la presencia de sal en el asfalto (Tausk & Wilson, 1981), que puede conducir a una mayor viscosidad durante el almacenamiento de la emulsión (Furlong et al., 1999). A continuación, se describen los principales factores que afectan la viscosidad de la emulsión.

Relación agua-asfalto

La relación agua-asfalto (RAA) tiene un efecto importante sobre la viscosidad. Es razonable considerar que las interacciones entre las micelas de asfalto son más significativas a medida que disminuye la RAA (a mayor concentración de asfalto). Cuando el volumen de asfalto en la emulsión es inferior al 30 %, las interacciones entre las micelas de asfalto desaparecen y las propiedades reológicas del sistema son similares a las de la fase continua (fase jabonosa). Al aumentar el contenido de asfalto, la interacción entre las micelas de asfalto se vuelve importante y aumenta la viscosidad de la emulsión. Este fenómeno puede llevar al sistema a exhibir un comportamiento no newtoniano (adelgazamiento por corte e incluso las propiedades viscoelásticas suelen ser importantes a partir de un contenido de asfalto del 60 %). A bajos contenidos de asfalto, el aumentar la concentración de asfalto tiene un efecto pequeño en la viscosidad. Con altos contenidos de asfalto, un pequeño aumento en la concentración puede inducir un cambio dramático en la viscosidad que puede ser incontrolable (Shell, 2015). Aumentar el contenido de asfalto aumentará la viscosidad y reducirá el asentamiento, pero comparado con el uso de un emulsificante favorezca el aumentar la viscosidad, esta es la forma más costosa de lograr un aumento en la viscosidad de la emulsión (James, 1997).



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 24 de 61

Viscosidad del asfalto

Se obtienen tamaños de gotas de asfalto más pequeñas durante el proceso de emulsificación a medida que disminuye la viscosidad del asfalto al ingresar al molino coloidal (manteniendo constantes los parámetros mecánicos como la velocidad de agitación, etc.) (Mercado et al., 2008). Para una energía mecánica dada del molino coloidal, asfaltos duros producirán tamaños de partícula grandes, asfaltos de alta penetración o rebajados producirán emulsiones de tamaño de partícula más pequeños (Shell, 2015). Por lo tanto, se puede producir un aumento aparente de la viscosidad en el sistema cuando la viscosidad del asfalto disminuye (asfalto blandos o rebajados). En este caso, el aumento de la viscosidad de la emulsión se debe al menor tamaño de las micelas de asfalto y no a la baja viscosidad del asfalto residual (Mercado et al., 2008). Se debe de tener presente que el asfalto que se comercializa en Costa Rica se clasifica como un AC-30 con viscosidades cercanas a los 3900 poises, siendo este un asfalto de alta viscosidad condición a tomar en cuenta en la formulación de emulsión y tener presente que asfaltos de menor grado de viscosidad son más recomendados para este tipo de emulsiones.

Tamaño y distribución de partículas

El tamaño y distribución de las gotas de asfalto también tienen un efecto importante en la viscosidad de la emulsión. Sin embargo, estos parámetros son difíciles de controlar de forma independiente durante la producción. Esto se debe al hecho de que algunas propiedades como la tensión interfacial, la concentración de surfactante y el tipo de surfactante son parámetros dependientes. El tamaño y distribución de partículas dependen de muchas variables: tipo y concentración de surfactante, salinidad, pH de la fase jabonosa (Chen et al., 2022), contenido y tipo de asfalto, mecánica y condiciones de operación de la planta (proceso de emulsificación), temperatura de la preparación de la emulsión, tensión interfacial, viscosidad del asfalto, y otros (Mercado et al., 2008). Estos últimos parámetros juegan un papel importante en la estabilidad de la emulsión (Tadros, 2010). Sin embargo,



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 25 de 61

usualmente la viscosidad de la emulsión aumenta a medida que disminuye el tamaño promedio de las partículas de asfalto. Cuando el tamaño de partícula disminuye, el número de partículas se incrementa, aumentando el número de interacciones partícula-partícula, resultando en una mayor resistencia a fluir. Mientras que la viscosidad de la emulsión disminuye a medida que la distribución del tamaño partículas de asfalto se vuelve más ancha (Vladisavljevic & Schubert, 2002; Ramírez et al., 2002; Buss et al., 2018; Alade et al., 2022). Esto se debe a que una distribución de partículas amplia tiene más espacio libre entre partículas para moverse, por lo que la muestra tenderá más fácilmente a fluir.

El tamaño de partícula es función del diámetro, la abertura y velocidad del molino coloidal (Baumgardner, 2006). La abertura y la velocidad de flujo del molino coloidal influyen fuertemente en el tamaño y distribución partículas de la emulsión: una abertura pequeña dará como resultado un tamaño de partícula pequeño con una distribución de tamaños relativamente estrecha; una alta velocidad de flujo producirá un tamaño de partícula pequeño (Shell, 2015). Normalmente, se pueden obtener gotas más pequeñas y distribuciones estrechas aumentando la velocidad de flujo (Nagata, 1975). Al aumentar la velocidad de flujo a través del molino se da un cambio en la distribución del tamaño de partícula de la emulsión. Con contenidos de asfalto inferiores al 65 %, la viscosidad de la emulsión es prácticamente independiente de la velocidad de flujo. Sin embargo, con contenidos de asfalto superiores al 65 %, los glóbulos de asfalto están muy cerca uno de otros, y al cambiar la velocidad de flujo tiene un marcado efecto en la viscosidad por la incidencia en la distribución del tamaño de partículas, como se muestra en la Figura 4. Aumentar el tiempo de emulsificación (molienda) típicamente resulta en menor tamaño de partícula y distribuciones de tamaños más angostas (Sherman, 1968). Sin embargo, cuando el tiempo de molienda excede el valor óptimo, el efecto de corte excesivo puede conducir a la coalescencia de las gotas generando la tendencia inversa. Además, el efecto de corte excesivo puede aumentar la temperatura de la emulsión asfáltica en el molino, que también puede provocar que las gotas se fusionen durante el enfriamiento (Chen et al., 2022).



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 26 de 61

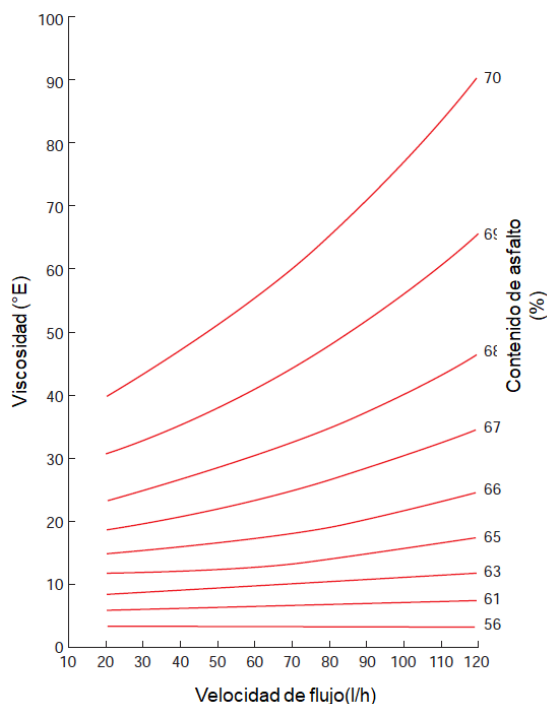


Figura 4. Viscosidad de la emulsión como función de la velocidad de flujo a diferentes contenidos de asfalto.

Fuente: Shell (2015)

Tipo y cantidad de agente surfactante

El tamaño de las gotas de asfalto disminuye cuando aumenta la concentración de surfactante, lo que conduce a un aumento de la viscosidad de la emulsión. Esto puede explicarse por un aumento en la capacidad de cubrir una superficie interfacial más grande. En el caso de las emulsiones catiónicas, un menor contenido de ácido puede aumentar la viscosidad de la emulsión (Shell, 2015). Un pH alto favorece una tensión interfacial más baja, lo que hace que la emulsificación del asfalto sea más fácil de lograr (Cui & Pang, 2017). La viscosidad de la emulsión también puede verse afectada por la estructura química del surfactante. En el mercado se ofrecen agentes emulsificantes especialmente diseñados



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 27 de 61

para obtener altas viscosidades de la emulsión sin requerir altos contenidos de asfalto en la emulsión asfáltica, y adecuados para emulsiones modificadas con polímeros (Tabla 2).

Tabla 2. Emulsificantes para emulsiones de alta viscosidad

Marca	Nombre	Dosificación
Nouryon	Redicote E-4819, Redicote E-4900, Redicote C-580	0,15 % - 0,25 % pH 2,0 - 4,5
Ingevity	Indulin AA-89, Indulin AA-86	0,18 % - 0,45 % pH 1,5 - 2,5
Arkema-Roadscience	Arrmuls 710	0,24 % - 0,45 % pH 1,6 - 2,0
Kao	Asfier N-100L	0,16 % - 0,29 % pH 2,0

Fuente: Nouryon (2021), Ingevity (2016), Arkema-Roadscience (2019) y Kao (2013)

El efecto del uso de diferentes emulsificantes (A-E) sobre la viscosidad de la emulsión se puede observar en la Figura 5. En este estudio se observó que la diferencia en la viscosidad entre diferentes emulsificantes no se debió a un efecto en el tamaño y distribución de partículas. Todas las emulsiones tuvieron un diámetro medio de tamaño de partícula entre 3,1 μm y 3,7 μm . Se encontró una correlación entre la viscosidad con diferentes emulsificantes y la cantidad de agua atrapada en los glóbulos de asfalto (el volumen de la fase dispersa es mayor que el volumen de asfalto debido al agua atrapada en los glóbulos de asfalto) (James, 1997).

Las emulsiones catiónicas de rompimiento rápido (CRS) se preparan con una dosis baja (0,15 % - 0,40 %) de tensioactivos de amina grasa C16–18, diamina grasa o amidoamina en forma de sus sales de clorhidrato o, con mucha menos frecuencia, como sales de acetato. Los emulsificantes se suministran al fabricante de emulsiones en forma de amina insoluble, a menudo como una mezcla de varios componentes, y el fabricante de



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 28 de 61

emulsiones los disuelve en agua caliente mediante el uso de ácido para formar la solución jabonosa. La adición de ácido no es estequiométrica y el pH de la solución jabonosa puede variar de 1,5 a 4,5. El pH tiene efectos sutiles sobre la reactividad y las propiedades físicas de la emulsión (Takamura & James , 2015).

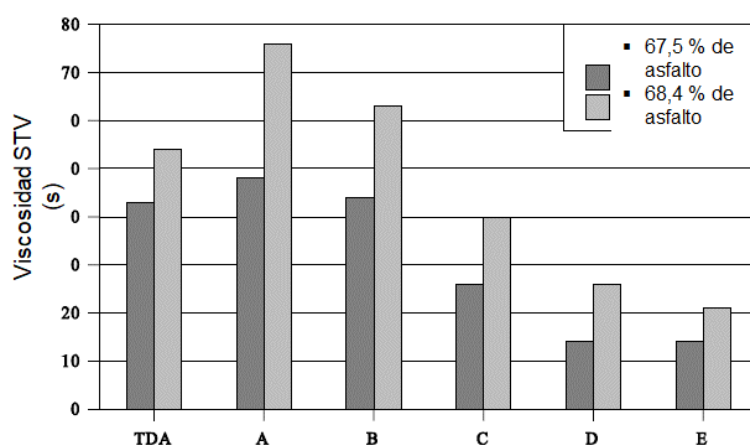


Figura 5. Efecto del uso de diferentes emulsificantes en la viscosidad de la emulsión asfáltica.

Nota: La viscosidad STV (Standard Tar Viscometer) se realizó con orificio de 4 mm a 50°C.

Fuente: James (1997)

Temperatura de emulsificación

En el proceso de emulsificación, la energía mecánica requerida para proporcionar a las partículas de asfalto el tamaño y distribución correctos se ve favorecida por el aumento en la temperatura de la fase de dispersa (asfalto). Para permitir que el ligante asfáltico se disperse adecuadamente en la fase acuosa, es necesario que su viscosidad sea relativamente baja.

En plantas de emulsión asfáltica con sistemas no presurizados, la temperatura de la emulsión nunca debe llegar a 100 °C durante la fabricación y debe mantenerse entre 85 °C y 95 °C para evitar ebullición con consecuentes efectos de estabilidad y proporciones de componentes. La temperatura de salida de la emulsión está determinada por las



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 29 de 61

temperaturas de las dos fases (asfalto y fase jabonosa). La temperatura mínima del asfalto depende del grado de viscosidad y varía entre 125 °C para un asfalto con penetración de 200, a 140 °C para un asfalto de penetración de 50. La temperatura mínima del agua de la fase jabonosa debe ser lo suficientemente alta para facilitar la disolución del agente emulsificante y el ácido, entre 40 °C y 50 °C suele ser suficiente. El aumento de la temperatura de la fase acuosa o el asfalto normalmente disminuye el tamaño medio de los glóbulos de asfalto en la emulsión (Shell, 2015). Las temperaturas de emulsificación más altas favorecen el desarrollo de gotas de asfalto más pequeñas. Sin embargo, se ha encontrado que el tamaño de las gotas también puede aumentar como consecuencia de un aumento de la temperatura en algunos casos especiales, esto debido a la fragilidad térmica de los agentes surfactantes (Gingras et al., 2005).

Presencia de sal en el asfalto

El asfalto puede contener pequeñas cantidades de sal (cloruro de sodio), que ha concentraciones mayores a 20 ppm, puede provocar un hinchamiento osmótico de las gotas de asfalto en una emulsión a medida que el agua entra en la gota. Esto da como resultado un aumento en la viscosidad de la emulsión, seguido de una disminución a medida que la sal se escapa lentamente. Si la diferencia de concentración iónica entre el glóbulo de asfalto y la fase acuosa que la rodea es lo suficientemente alta, la partícula continuará expandiéndose hasta el punto en que se rompa. Si se alcanza este punto de falla, puede desencadenar la coagulación entre otras partículas, desestabilizando la emulsión. En estos casos se adiciona cloruro de calcio (emulsiones catiónicas) o cloruro de sodio (emulsiones aniónicas) en la fase jabonosa o en la emulsión a una tasa de 0,1 % a 0,2 % para reducir la ósmosis de agua en el asfalto y minimizar los cambios de viscosidad (Tausk & Wilson, 1981; James, 2006; Shell, 2015).



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 30 de 61

Aditivos

Un enfoque alternativo para aumentar la viscosidad en la emulsión es usar productos químicos que se agregan a la fase de asfalto antes de la emulsificación. Estos aditivos aparentemente mejoran la peptización de los asfaltenos en el asfalto, haciendo que el asfalto se emulsione más fácilmente. Son particularmente útiles con asfaltos difíciles de emulsionar. La Figura 6 muestra el efecto del agente peptizante sobre las viscosidades de emulsiones de rompimiento rápido. Los beneficios en este caso generalmente se extienden a un asentamiento reducido y una mejor adhesión de la emulsión.

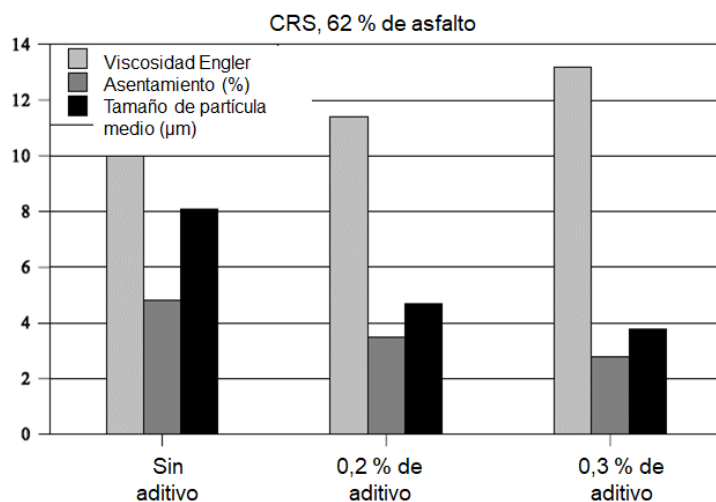


Figura 6. Efecto de agentes peptizantes en la viscosidad de la emulsión asfáltica
Fuente: James (1997)

También se pueden incorporar agentes espesantes solubles en agua para aumentar la viscosidad de la emulsión, ayudando a cumplir las especificaciones y reduciendo el escurrimiento de la emulsión en mezclas de granulometría abierta. Pueden añadirse en la fase acuosa o en la emulsión terminada y normalmente en una dosis de 0,02 % a 0,20 %. Los espesantes pueden afectar el rompimiento y la adhesión de las emulsiones, por lo que deben ser seleccionados cuidadosamente (Akso Nobel, 2014).



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 31 de 61

En la Figura 7 se resumen las estrategias disponibles para aumentar la viscosidad de las emulsiones asfáltica.

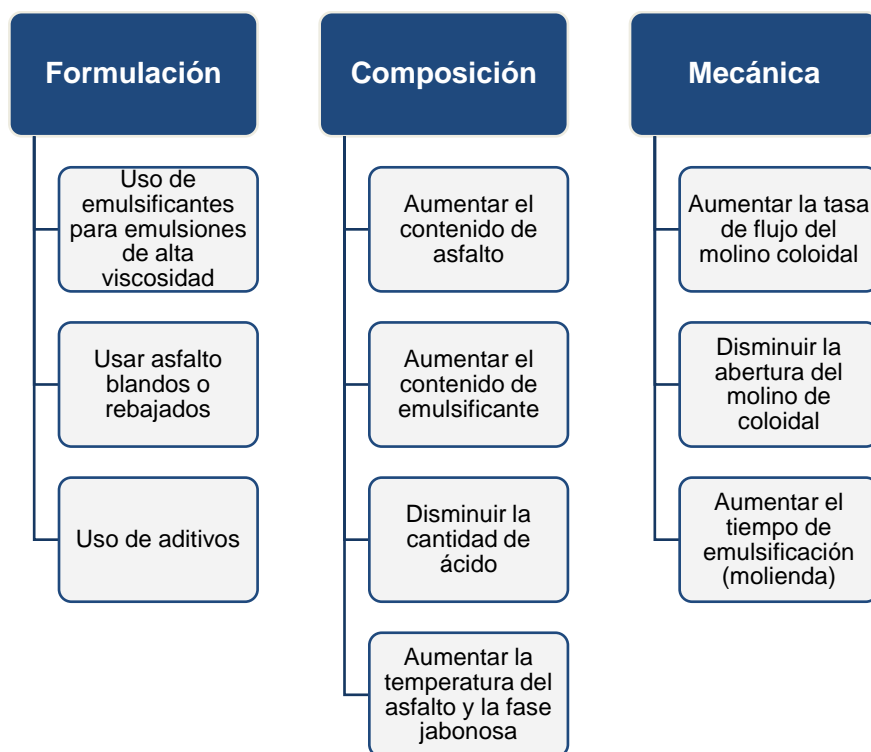


Figura 7. Estrategias para aumentar la viscosidad de la emulsión asfáltica

Ensayos de desempeño de laboratorio para emulsiones y tratamientos superficiales

Las emulsiones especificadas actualmente muchas veces muestran problemas de desempeño ya que las normas no contemplan los siguientes factores (Kroger & Kroger, 2020):

- No clasifican a los ligantes asfálticos basándose en las propiedades críticas relacionadas directamente con el desempeño (desprendimiento de agregado y exudación).



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 32 de 61

- No contemplan totalmente las propiedades de la emulsión relacionadas con la parte constructiva, “capacidad de riego”, “escurrido” y “capacidad de mezclado”.
- No ensayan los materiales en el rango de temperaturas a los que estarán expuestos en campo.
- No clasifican a los ligantes según el tráfico previsto.
- No toman en cuenta el tiempo de curado y tiempo de apertura al tráfico.
- Los ensayos convencionales son empíricos y no tienen relación directa con el desempeño del material.

Para evaluar el desempeño de las emulsiones asfálticas para tratamientos superficiales se realizan ensayos de laboratorio en el tratamiento superficial (sistema agregado-ligante asfáltico), la emulsión y el residuo asfáltico. Los ensayos en el sistema agregado-ligante asfáltico están relacionados con las propiedades de adhesividad y compatibilidad del ligante asfáltico con el agregado, y con el tiempo de apertura al tráfico. Los ensayos de desempeño en la emulsión y el residuo asfáltico están dentro de la propuesta de especificaciones de grado por desempeño de emulsiones asfálticas (EPG) para tratamientos superficiales, micropavimentos y riegos de emulsión (NCHRP, 2017). Estas especificaciones de EPG están condicionadas por el clima y las cargas de tráfico que se prevén durante la vida útil de cada técnica de preservación de pavimento. En el caso del grado por desempeño de emulsiones (EPG) se mantienen los criterios de clasificación para asfaltos, pero con la salvedad de que las temperaturas del pavimento son superficiales y por ende la temperatura aumenta 3°C tanto para XX como para YY para los rangos de temperatura de operación. Los ensayos dentro de las especificaciones EPG abordan las propiedades de la emulsión que están relacionadas con el almacenamiento y la aplicación en campo (estabilidad de almacenaje, capacidad de riego, resistencia al escurrimiento), así como las propiedades del residuo asfáltico que están relacionadas con el desempeño de la mezcla (exudación, ahuellamiento, desprendimiento de agregado). En la Figura 8 se muestran los ensayos para especificaciones de grado por desempeño.

EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 33 de 61

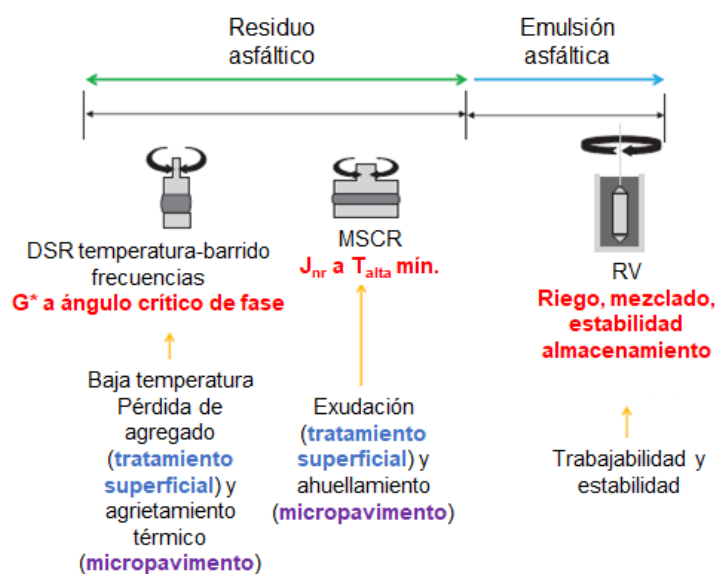


Figura 8. Ensayos para especificación por grado de desempeño de emulsiones asfálticas
Fuente: NCHRP (2017)

Ensayos de desempeño en el sistema agregado-ligante asfáltico

Ensayo de adherencia de asfalto ABS

El ensayo de ABS se utiliza para evaluar el potencial de resistencia al desprendimiento del asfalto y se realiza según la norma de ensayo AASHTO T 361 (2020). El ensayo de ABS mide la tensión requerida para desprender una muestra ligante asfáltico que está adherida a un sustrato agregado de 100×100×18,75 mm (es decir, la prueba mide la fuerza de adhesión de la muestra asfalto con el agregado). El ensayo se emplea para cuantificar la resistencia del residuo de la emulsión a la pérdida de agregados. En la Figura 9a se muestra el equipo para el ensayo de ABS. En el ensayo, se usa un tornillo extraíble para adherir el asfalto a una placa de sustrato de agregado. Cuando se ejecuta ensayo, se fija un soporte de anillo al tornillo de extracción para evitar una carga excéntrica. Luego, el anillo de presión se coloca alrededor del tornillo extraíble y se aplica una carga neumática a una tasa que



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 34 de 61

aumenta linealmente hasta que el tornillo extraíble se separe del sustrato (Adams et al., 2017).

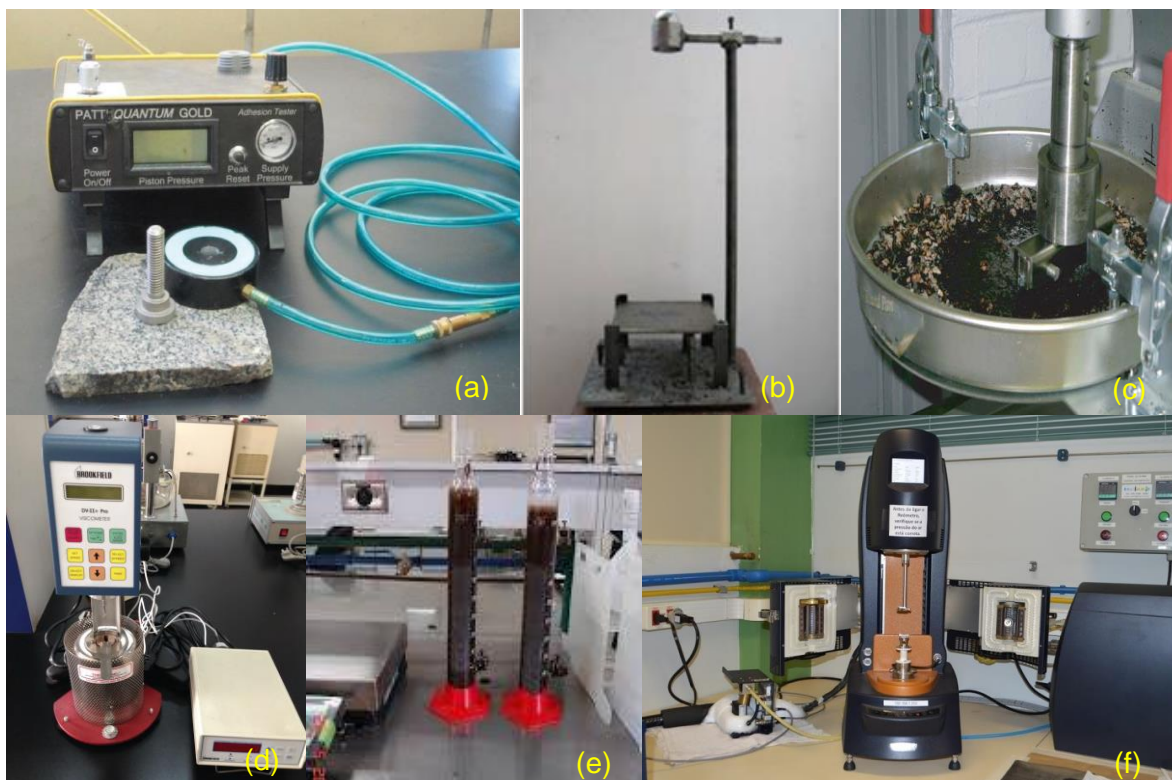


Figura 9. Equipos para ensayos de desempeño en tratamientos superficiales: (a) ABS, (b) Vialit, (c) barrido (c), viscosímetro rotacional (d), probetas de estabilidad (e) y reómetro de corte dinámico (f)

Ensayo de Vialit

El ensayo Vialit (Figura 9b) utiliza tanto la gravedad como el impacto para medir la capacidad de retención de agregados de tratamiento superficial al someter una muestra de tratamiento superficial invertida fijada a una placa de acero al impacto de una bola de acero que se deja caer desde una altura fija. El método de ensayo se describe la norma UNE EN 12272-3 (2003) y es relativamente simple de realizar (Adams et al., 2017). A nivel de



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 35 de 61

especificación se establece que la adherencia, medida con placa Vialit, debe ser mayor a 90 % (Kroger & Kroger, 2020). La pérdida de agregados está relacionada tanto con las tasas de aplicación del material como con las propiedades del material. El desprendimiento de agregado puede ocurrir bajo diversas condiciones. El desprendimiento temprano puede resultar de un curado inadecuado o del insuficiente desarrollo de resistencia cuando el camino se abre al tráfico. El desprendimiento tardío resulta de los efectos a largo plazo del tráfico a temperaturas intermedias y bajas. A temperaturas intermedias, la pérdida de agregados se atribuye principalmente a la pérdida de adhesividad entre el asfalto y los agregados; a bajas temperaturas, la pérdida de agregados es causada por la fractura cohesiva del residuo de asfáltico frágil. El desprendimiento húmedo ocurre como resultado del daño por humedad en el residuo asfáltico. El daño por humedad puede conducir a una reducción significativa en adhesividad entre el residuo asfáltico y el agregado y puede acelerar el desprendimiento a temperaturas intermedias. Para simular el daño por humedad, los especímenes de ensayo, previo al ensayo de desprendimiento, se curan a 25 °C por 4 horas, seguidamente se sumergen en agua a 40 °C por 16 horas, y después se dejan secar y enfriar a 25 °C por 1 hora antes del ensayo (Adams et al., 2017).

Ensayo de barrido

El ensayo de barrido ASTM D 7000 (2019) mide la cantidad de agregado desprendido, a niveles variables de humedad (curado) de una muestra de emulsión asfáltica y agregado, simulando el barrido de un tratamiento superficial en el laboratorio (Figura 9c). Se aplica emulsión asfáltica y una sola capa de los agregados a un disco de teja asfáltica. Luego, la muestra se acondiciona en un horno a una temperatura y tiempo para llegar a un contenido de humedad preestablecido antes del ensayo. Un mezclador aplica abrasión a la superficie de la muestra con un cepillo de nailon. Después de 1 minuto de abrasión, se detiene la prueba, se elimina cualquier agregado suelto y se calcula el porcentaje de pérdida de masa. El tratamiento superficial se considera listo para el tráfico, cuando la pérdida de agregado del ensayo de barrido es inferior al 10 %. El tiempo de acondicionamiento que da menos



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 36 de 61

del 10 % de pérdida agregado se toma como el tiempo de espera para la apertura al tráfico de un tratamiento superficial recién colocado (Johannes et al., 2011). Este método de ensayo es útil para clasificar emulsiones de rompimiento rápido de acuerdo con el tiempo de apertura al tráfico (ASTM, 2019). El ensayo sigue siendo muy utilizado ya que evalúa los materiales del proyecto y es un medio para evaluar la adhesión agregado-asfalto. Este procedimiento es relativamente efectivo para evaluar las diferencias en la capacidad de adhesión de diferentes emulsiones con un solo agregado (NCHRP, 2005). La ganancia en resistencia al desprendimiento (adherencia) depende más del contenido de humedad que del tiempo de curado. A medida que la pérdida de humedad se acerca de 75 % a 90 %, la resistencia al desprendimiento mejora significativamente (Howard et al. , 2011).

Ensayos de desempeño en la emulsión asfáltica

Capacidad de riego (sprayability) y resistencia al escurrimiento (drainout)

La emulsión asfáltica utilizada para aplicaciones de riego debe tener valores bajos de viscosidad para que pueda aplicarse uniformemente a través de la barra de rociado del distribuidor, pero al mismo tiempo debe ser lo suficientemente viscoso para no drenar desde la corona o pendiente de la carretera. Este método de ensayo utiliza un viscosímetro rotacional y una cámara térmica de temperatura controlada para medir la viscosidad de la emulsión asfáltica (Figura 9d). Los ensayos se llevan a cabo a distintas velocidades de corte para simular las condiciones de manipulación y aplicación de la emulsión en los riegos y tratamientos superficiales; estas condiciones incluyen bombeo, riego y escurrimiento. El ensayo se lleva a cabo variando la velocidad de corte en tres pasos (Figura 10).

El espécimen de ensayo se ensaya a una velocidad de corte de $4,65 \text{ s}^{-1}$ (5 RPM) durante 15 minutos, luego la velocidad de corte se cambia a 142 s^{-1} (150 RPM) durante 5 minutos y luego vuelve a una tasa de corte de $4,65 \text{ s}^{-1}$ durante 5 minutos. El torque y la velocidad de rotación se utilizan para determinar la viscosidad del asfalto. Los resultados se utilizan



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 37 de 61

para determinar la capacidad de riego (la facilidad con la que se puede rociar la emulsión asfáltica) y la resistencia al escurrimiento (NCHRP, 2017).

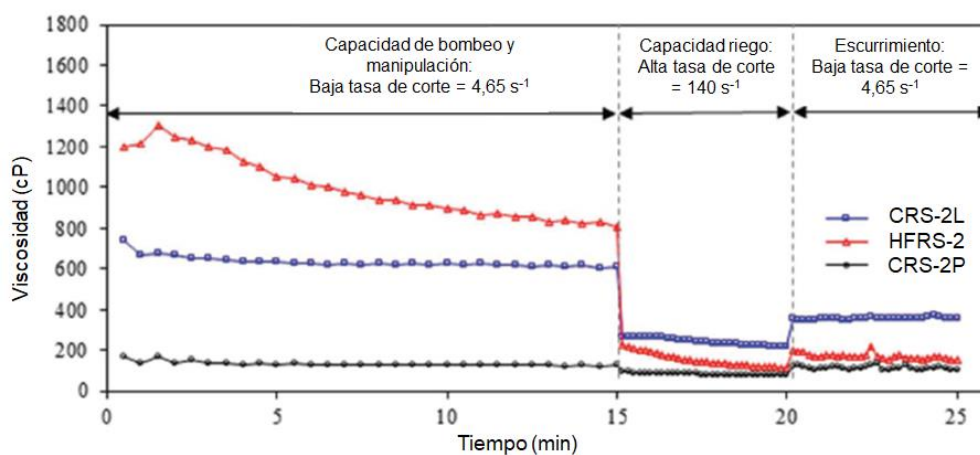


Figura 10. Resultados típicos de ensayo de corte a tres pasos con viscosímetro rotacional
Fuente: NCHRP (2017)

Resistencia a la separación física y cambio en las propiedades reológicas

Este método de ensayo cubre el procedimiento para evaluar la capacidad de la emulsión asfáltica para permanecer homogénea y resistir la separación física o el cambio en las propiedades reológicas durante el almacenamiento, mediante el viscosímetro rotacional (Figura 9d y 9e) según la norma de ensayo AASHTO T 316 (2019). La estabilidad durante el almacenamiento se evalúa en función de la resistencia al cambio tanto en las propiedades físicas como en las propiedades reológicas después de un tiempo de acondicionamiento prescrito. La estabilidad frente a la separación física o la homogeneidad se evalúa comparando las proporciones de viscosidad medidas a partir de muestras tomadas de la parte superior e inferior de un cilindro colocado en un almacenamiento simulado sin perturbaciones durante un período de tiempo específico (Figura 9e). El resultado se expresa mediante una relación de separación (R_s), calculada como la relación de las viscosidades de las dos muestras. La estabilidad frente al cambio en las propiedades reológicas se



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 38 de 61

evalúa midiendo la viscosidad de la emulsión asfáltica antes y después del acondicionamiento. El resultado se expresa mediante una relación de degradación (R_d), determinada como la relación de la viscosidad antes del acondicionamiento con respecto a la viscosidad después del acondicionamiento.

Ensayos de desempeño en el residuo asfáltico

Resistencia a la exudación y ahuellamiento

La resistencia a la exudación y al ahuellamiento se puede evaluar mediante el ensayo de creep (fluencia) y recuperación del ligante asfáltico a esfuerzos múltiples (MSCR) utilizando reómetro de corte dinámico (DSR) de acuerdo con la norma de ensayo AASHTO T 350 (2019) (Figura 9f). Este método está diseñado para identificar la presencia de la respuesta elástica en un ligante asfáltico y el cambio en la respuesta elástica a dos niveles de esfuerzo diferentes mientras se somete a diez ciclos de esfuerzos de fluencia y recuperación. Se ha demostrado que el creep compliance no recuperable (J_{nr}) es un indicador de la resistencia de un ligante asfáltico a la deformación permanente bajo carga repetida. A la temperatura máxima del pavimento el ligante deberá tener el valor de J_{nr} más bajo posible para que sea resistente a la deformación permanente (plástica). Los ensayos se realizan sobre el residuo asfáltico recuperado mediante el procedimiento de recuperación de residuos de emulsiones asfálticas utilizando técnicas de evaporación de baja temperatura según la norma de ensayo AASHTO R 78 (2020), método B.

Resistencia al desprendimiento de agregados a bajas temperaturas

Este método de ensayo cubre el procedimiento para determinar el módulo de corte dinámico del residuo de una emulsión asfáltica a valores de ángulo de fase críticos mediante la realización de un barrido de frecuencias con el reómetro de corte dinámico (DSR) a temperaturas intermedias (Figura 9f). Conforme mayor sea el módulo de corte del asfalto, este será más rígido y susceptible al desprendimiento del agregado, así como a menor ángulo de fase. Este procedimiento de ensayo se realiza sobre el residuo asfáltico para



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 39 de 61

evaluar la resistencia al agrietamiento térmico en micropavimentos y la resistencia al desprendimiento de agregados en los tratamientos superficiales. Se forman especímenes de ensayo con una altura de 2,0 mm entre placas paralelas de 8 mm de diámetro. Durante el ensayo, los especímenes de ensayo se someten a oscilaciones torsionales a frecuencias preseleccionadas y amplitudes de deformación rotacional. Los ensayos se realizan sobre el residuo asfáltico recuperado según la norma de ensayo AASHTO R 78 (2020), método B.

En la Tabla 3 se muestra un resumen de los métodos de ensayo para desempeño de TS.

Tabla 3. Métodos de ensayo para evaluar el desempeño de tratamientos superficiales

Material	Propiedad	Método de ensayo	Parámetro medido
Agregado-ligante asfáltico	Tiempo de apertura al tráfico	Ensayo de barrido (ASTM D 7000)	Porcentaje de pérdida de agregado
	Adhesividad a temperaturas intermedias	Ensayo de adhesividad con placa Vialit (UNE-EN 12272-3)	Porcentaje de pérdida de agregado
	Adhesividad y compatibilidad del ligante asfáltico con el agregado	Ensayo de adherencia de asfalto BBS	Resistencia a la tracción, POTS
Emulsión asfáltica	Estabilidad de almacenaje	Asentamiento y sedimentación NCHRP 837/ASTM D 7496/ D 7226	Viscosidad rotacional, η Relación de separación a 24 h, R_s Relación de estabilidad a 24 h, R_d
	Capacidad de riego	NCHRP 837/ASTM D 7226	Viscosidad rotacional, η , @ alta tasa de corte
	Resistencia al escurrimiento	NCHRP 837/ASTM D 7226	Viscosidad rotacional, η , @ baja tasa de corte
Residuo asfáltico	Exudación a alta temperatura EPG	Creep y recuperación del ligante asfáltico a esfuerzos múltiples (AASHTO T 350)	Creep compliance no recuperable, J_{nr}
	Desprendimiento a baja temperatura EPG	Barrido de frecuencias con el reómetro de corte dinámico (DSR)	Módulo de corte dinámico (G^*) a $\delta_{crítico}$



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 40 de 61

METODOLOGÍA PROPUESTA

En la Figura 11 se muestra un esquema con las diferentes etapas del proyecto. Seguidamente se explica detalladamente cada una de las fases.

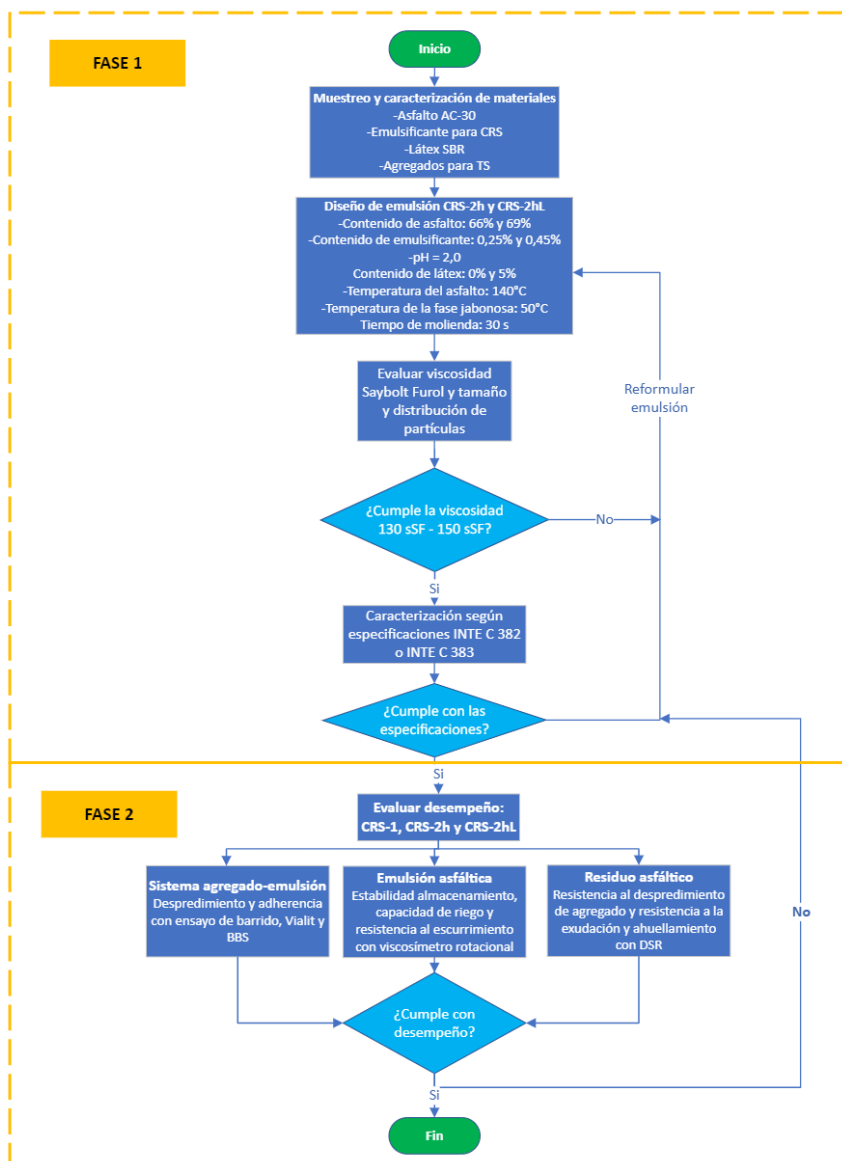


Figura 11. Metodología propuesta



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 41 de 61

Fase 1: Diseño de emulsión asfáltica de alta viscosidad

Muestreo y caracterización de materiales

Se propone muestrear los siguientes materiales: asfalto AC-30, agente emulsificante para emulsión catiónica de rompimiento rápido de baja viscosidad, agente emulsificante para emulsión catiónica de rompimiento rápido de alta viscosidad, polímero látex tipo SBR, ácido clorhídrico al 37 % grado reactivo, emulsión de rompimiento rápido de baja viscosidad (CRS-1) y agregado con granulometría D de acuerdo con la Sección 411 del CR 2020. El asfalto, emulsificante, ácido clorhídrico y emulsión CRS-1 serán aportados por RECOPE. El muestreo y caracterización de la emulsión CRS-1 se hará durante la Fase 2, ya que no se recomienda su almacenaje por tiempos muy prolongados, y es en esa etapa del proyecto donde se va a ensayar. Los agregados se muestrearán de una fuente representativa que sea utilizada en el país para la construcción de carreteras. Posterior al muestreo se procederá a caracterizar el asfalto y los agregados.

Caracterización del asfalto AC-30

La caracterización del asfalto comprende los ensayos indicados por el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.01.22 (2004):

- Viscosidad absoluta, 60°C (ASTM D 2171).
- Viscosidad cinemática, 135 °C (ASTM D 2170).
- Penetración, 25 °C, 100 g, 5s. (ASTM D 5).
- Punto de inflamación (ASTM D 92).
- Solubilidad en tricloroetileno (ASTM D 2042).
- Pruebas sobre residuo del ensayo de horno rotatorio sobre película delgada (ASTM D 2872):
 - Viscosidad absoluta, 60 °C (ASTM D 2171).
 - Ductilidad, 25°C, 5cm/min (ASTM D 113).
- Contenido de cenizas (ASTM D 8078)



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 42 de 61

Caracterización de los agregados

La caracterización de los agregados comprende los ensayos indicados en el CR 2020 en la sección 703.10:

- Granulometría (ASTM C 136 / ASTM C 117).
- Abrasión de los Ángeles (ASTM C 131).
- Densidad (ASTM C 127).
- Partículas planas y elongadas, en una proporción 1:3 y el peso calculado por masa como un promedio en malla 9,5 mm (ASTM D 4791).
- Índice de durabilidad de agregado grueso (ASTM D 3744).
- Arcilla y partículas friables (AASHTO T 112).
- Caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821).
- Peso unitario (ASTM C 29).

Caracterización de la emulsión CRS-1

La caracterización de la emulsión CRS-1 comprende los ensayos indicados por el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.01.22 (2004):

- Viscosidad Saybolt Furol a 50 °C (ASTM D 7496).
- Estabilidad al almacenamiento, 24 h (ASTM D 6930).
- Demulsibilidad, 35 ml, 0,8% sulfocianato de dioctil sodio (ASTM D 6936).
- Prueba de carga eléctrica de partículas (ASTM D 7402).
- Prueba de malla N° 20 (ASTM D 6933).
- Residuo asfáltico y aceite destilado (ASTM D 6997).
- Penetración, 25°C, 100 g, 5 s (ASTM D 5).
- Ductilidad, 25°C, 5 cm/min (ASTM D 113).
- Solubilidad en tricloroetileno (ASTM D 2042).
- Tamaño y distribución de partículas por difracción láser.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 43 de 61

Diseño de emulsión asfáltica de alta viscosidad CRS-2h y CRS-2hL

Antes de iniciar con el diseño de las emulsiones se harían pruebas preliminares con el fin de analizar la variabilidad entre lotes de producción el mismo día y entre días diferentes. Esto permitirá comprobar si el procedimiento de producción de emulsión en el laboratorio se encuentra controlado y el grado de variabilidad esperable de los resultados. Para el análisis de la variabilidad del proceso de producción se plantea realizar un diseño factorial de dos factores, donde la variable respuesta (y) sería la viscosidad Saybolt Furol a 50 °C, y los factores serían: (A) día de producción y (B) lote de producción. El molino coloidal de laboratorio disponible para el estudio tiene una capacidad de producción de 1 litro de emulsión, cada producción se considerará como un lote. En la Tabla 4 se muestra el arreglo del diseño factorial de dos factores. Es importante aleatorizar los lotes de producción a la hora de medir la viscosidad para minimizar cualquier efecto perturbador. El experimento se llevaría a cabo con la formulación de la corrida 2 de la Tabla 5.

Tabla 4. Arreglo diseño factorial de dos factores

Factor B	Factor A		
	1	2	3
1	Y ₁₁₁ , Y ₁₁₂ , Y ₁₁₃	Y ₁₂₁ , Y ₁₂₂ , Y ₁₂₃	Y ₁₃₁ , Y ₁₃₂ , Y ₁₃₃
2	Y ₂₁₁ , Y ₂₁₂ , Y ₂₁₃	Y ₂₂₁ , Y ₂₂₂ , Y ₂₂₃	Y ₂₃₁ , Y ₂₃₂ , Y ₂₃₃
3	Y ₃₁₁ , Y ₃₁₂ , Y ₃₁₃	Y ₃₂₁ , Y ₃₂₂ , Y ₃₂₃	Y ₃₃₁ , Y ₃₃₂ , Y ₃₃₃
4	Y ₄₁₁ , Y ₄₁₂ , Y ₄₁₃	Y ₄₂₁ , Y ₄₂₂ , Y ₄₂₃	Y ₄₃₁ , Y ₄₃₂ , Y ₄₃₃

Las variables que se mantendrán constantes y se controlarán durante la fabricación de las emulsiones son:

- pH de la fase jabonosa: 2,0.
- Temperatura de fase jabonosa: 50 °C.
- Temperatura del asfalto: 140 °C.
- Tiempo de molienda: 30 s.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 44 de 61

Para el diseño de la emulsión asfáltica se plantea hacer un análisis factorial 2^4 donde la variable de respuesta es la viscosidad Saybolt Furol a 50 °C y los factores a considerar son: contenido de asfalto (A), contenido de emulsificante (B), contenido de polímero látex (C) y tipo de emulsificante (D). Cada factor con dos niveles (alto “+” y bajo “-”). Cada corrida tendrá 3 réplicas. En la Tabla 5 se muestra la matriz del diseño factorial. Los niveles de cada factor se detallan en la Tabla 6. El análisis factorial permitirá determinar cuáles son los efectos principales y en qué magnitud inciden en la viscosidad. Además, será posible generar un modelo para predecir la respuesta (viscosidad) considerando los factores analizados. Por lo tanto, se podrá definir la formulación y composición óptima para las emulsiones CRS-2h y CRS-2hL de acuerdo con las condiciones analizadas.

Tabla 5. Matriz del diseño

Número de corrida	Factor			
	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 45 de 61

Adicionalmente, se medirá el tamaño y distribución de partículas con el analizador de tamaños de partículas por difracción laser. La viscosidad es una propiedad que está intrínsecamente relacionada con el tamaño y distribución de partículas, y es fundamental para entender su comportamiento.

Tabla 6. Niveles de análisis factorial 2⁴

Factor	Nivel bajo	Nivel alto
(A) Contenido de asfalto	66 %	69 %
(B) Contenido de emulsificante	0,25 %	0,45 %
(C) Contenido de látex	0,0 %	5,0 %
(D) Tipo de emulsificante	De baja viscosidad	De alta viscosidad

Nota: El porcentaje de látex se calcula sobre el peso de asfalto, y considerando el contenido de sólidos del látex.

Una vez definida la formulación y composición de las emulsiones asfálticas CRS-2h y CRS-2hL, que cumple con la viscosidad requerida (viscosidad Saybolt Furol a 50 °C entre 130 sSF y 150 sSF), éstas se caracterizarán para comprobar que satisfagan los criterios de calidad de las normas INTE C 382 (2020) e INTE C 383 (2020), equivalentes a las normas AASHTO M 208 (2018) y AASHTO M 316 (2018) respectivamente, referidas en la sección 702.03 del CR 2020.

- Viscosidad Saybolt Furol a 50 °C (ASTM D 7496).
- Estabilidad al almacenamiento, 24 h (ASTM D 6930).
- Demulsibilidad, 35 ml, 0,8% sulfocianato de dioctil sodio (ASTM D 6936).
- Prueba de carga eléctrica de partículas (ASTM D 7402).
- Prueba de malla N° 20 (ASTM D 6933).
- Residuo asfáltico y aceite destilado (ASTM D 6997).
- Penetración, 25°C, 100 g, 5 s (ASTM D 5).
- Recuperación elástica, 25 °C, de lado recto, 5 cm/min, 20 cm de elongación, 5 min de sostenimiento (ASTM D 6084).



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 46 de 61

- Contenido de ceniza (ASTM D 8078)
- Tamaño y distribución de partículas por difracción láser

Fase 2: Evaluación del desempeño

La evaluación del desempeño de las emulsiones asfálticas, CRS-2h y CRS-2hL diseñadas en la Fase 1 y la emulsión de CRS-1 disponible actualmente en Recope, se efectuará sobre el sistema agregado-ligante asfáltico (tratamiento superficial), la emulsión y el residuo asfálticos. Los ensayos pretenden valorar: resistencia a la separación física y al cambio en las propiedades reológicas, capacidad de riego, resistencia al escurrimiento, tiempo de apertura al tráfico, adhesividad y compatibilidad con el agregado, resistencia al desprendimiento de agregado y exudación. La emulsión CRS-1 se muestreará durante esta fase para la caracterización (de acuerdo con las especificaciones del RTCA 75.01.22 (2004)) y evaluación del desempeño. Se incluye en el estudio la emulsión CRS-1 fabricada por Recope para comprobar si realmente hay una mejoría en el desempeño con el uso de emulsiones de alta viscosidad para los tratamientos superficiales.

Ensayos de desempeño en el sistema agregado-ligante asfáltico

El sistema agregado-ligante asfáltico se evaluará con los siguientes ensayos:

- Ensayo de adhesión a tracción (ABS) (AASHTO T 361).
- Ensayo de barrido (ASTM D 7000).

Para el ensayo de ABS se utilizará el procedimiento de preparación de muestras para emulsión asfáltica de acuerdo con la norma de ensayo AASHTO T 361. El procedimiento de preparación consiste en colocar emulsión fresca sobre el sustrato de agregado al comienzo del proceso de curado, lo que simula la interacción química natural entre la emulsión y el agregado y permite que se desarrolle una unión adhesiva más representativa entre los materiales. El curado de los especímenes de ensayo se realizará a $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, y el ensayo se ejecutará a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Adicionalmente,



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 47 de 61

se realizará el ensayo de ABS en el asfalto original. Esto permitirá determinar si el agente emulsificante y/o el polímero tienen un efecto en la adherencia agregado-asfalto. Estas muestras no requieren de curado.

El tiempo de apertura al tránsito y la susceptibilidad al desprendimiento se determinará con el ensayo de barrido variando el tiempo de curado con frecuencias de 1, 2, 3, 4, 6 y 24 horas. Estas frecuencias consideran el desprendimiento a corto y largo plazo debido al tráfico. La temperatura de curado será de $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la temperatura de ensayo de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para evaluar el desprendimiento de agregado por daño por humedad se fabricarán especímenes adicionales los cuales después del curado (24 horas a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$) se someterán a inmersión en un baño con agua a $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, luego se dejarán secado y enfriando por 1 hora. La temperatura de ensayo es de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la Tabla 7 se resumen las condiciones de curado y acondicionamiento para los ensayos de ABS y barrido, así como la cantidad de réplicas.

Tabla 7. Curado y acondicionamiento ensayos en el sistema agregado-asfalto residual

Ensayo	Curado		Daño por humedad		Ensayo	
	Temperatura de horno ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (h)	Temperatura de baño ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de inmersión en agua (h)	Temperatura de ensayo ($^{\circ}\text{C}$)	Réplicas de ensayo
ABS	35 ± 3	24	-	-	25 ± 3	3
ABS	35 ± 3	24	40 ± 2	24	25 ± 3	3
Barrido	35 ± 3	1, 2, 3, 4, 6, 24	-	-	25 ± 3	3
Barrido	35 ± 3	24	40 ± 2	24	25 ± 3	3

Ensayos de desempeño en la emulsión asfáltica

Los procedimientos de ensayo que se usarán para evaluar la resistencia a la separación física y al cambio en las propiedades reológicas, la capacidad de riego y la resistencia al escurrimiento se describen en el informe “Performance-related specifications for emulsified



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 48 de 61

asphaltic binders used in preservation surface treatments” (NCHRP, 2017), y serían los siguientes:

- Estabilidad de almacenamiento de emulsiones asfálticas: Resistencia a la separación física y al cambio en las propiedades reológicas.
- Capacidad de riego y resistencia al escurrimiento: Viscosidad de las emulsiones asfálticas para riego utilizando ensayo de corte de tres pasos.

La estabilidad frente a la separación física o la homogeneidad se evalúa comparando las proporciones de viscosidad medidas con el viscosímetro rotacional a partir de muestras tomadas de la parte superior e inferior de un cilindro de sedimentación simulando las condiciones de almacenamiento en planta durante un período de tiempo específico (24 horas o 5 días). El resultado se expresa mediante una relación de separación (R_s), calculada como la relación de las viscosidades de las dos muestras. La estabilidad frente al cambio en las propiedades reológicas se evalúa midiendo la viscosidad de la emulsión asfáltica antes y después del acondicionamiento (24 horas a 60 °C). El resultado se expresa mediante una relación de degradación (R_d), determinada como la relación entre la viscosidad antes del acondicionamiento y la viscosidad después del acondicionamiento.

En la capacidad de riego y resistencia al escurrimiento se utiliza un viscosímetro rotacional para medir la viscosidad de la emulsión asfáltica a diferentes velocidades de corte a una temperatura de 60 °C. El ensayo se lleva a cabo variando la velocidad de corte en tres pasos. Primero a una velocidad de corte de $4,65 \text{ s}^{-1}$ (5 RPM) durante 15 minutos (capacidad de bombeo y manipulación), y luego la velocidad de corte se cambia a 142 s^{-1} (150 RPM) durante 5 minutos (capacidad de riego), y luego vuelve a una tasa de corte de $4,65 \text{ s}^{-1}$ durante 5 minutos (resistencia al escurrimiento). El torque y la velocidad de rotación se utilizan para determinar la viscosidad del asfalto. En la Tabla 8 se resumen las características del curado, acondicionamiento y velocidad de corte para los ensayos de desempeño en la emulsión asfáltica.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 49 de 61

Tabla 8. Curado, acondicionamiento y velocidad de corte ensayos en la emulsión asfáltica

Ensayo	Acondicionamiento		Ensayo		Réplicas de ensayo
	Temperatura de horno (°C)	Tiempo (h)	Temperatura de ensayo (°C)	Tasa de corte	
Estabilidad almacenamiento	60 ± 5	24	60 ± 1	5 rpm	3
Riego y escurrimiento	-	-	60 ± 1	5 rpm y 150 rpm	3

Ensayos de desempeño en el residuo asfáltico

Los procedimientos de ensayo que se usarán para evaluar la resistencia al desprendimiento de agregado y la exudación y deformación permanente se describen en el informe “Performance-related specifications for emulsified asphaltic binders used in preservation surface treatments” (NCHRP, 2017) y en la norma AASHTO T 350 (2019) y serían los siguientes:

- Exudación y deformación permanente: Fluencia y recuperación del ligante asfáltico a esfuerzos múltiples (MSCR) utilizando reómetro de corte dinámico (DSR) (AASHTO T 350).
- Desprendimiento: Módulo de corte dinámico de residuos de emulsión asfáltica a valores críticos de ángulo de fase utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR).

En ambos ensayos el residuo asfáltico se recupera mediante técnicas de evaporación a bajas temperaturas de acuerdo con la norma de ensayo AASHTO R 78 (2020) método B.

El ensayo de fluencia y recuperación a esfuerzos múltiples (MSCR) utiliza una geometría de placas paralelas de 25 mm con un ajuste de espacio de 1 mm. El espécimen se ensaya en fluencia a dos niveles de esfuerzo seguido de la recuperación para cada nivel de esfuerzo. Los niveles de esfuerzo utilizados son 0,1 kPa y 3,2 kPa. La fase de fluencia del ensayo dura 1 s, seguida de una fase de recuperación de 9 s. Se ensayan diez ciclos de



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 50 de 61

fluencia y recuperación en cada nivel de esfuerzo. La temperatura de ensayo es la máxima temperatura de la superficie del pavimento estimada para un proyecto y se mantiene dentro de $\pm 0,1$ °C durante el ensayo.

Para el ensayo de resistencia al desprendimiento mediante el barrido de frecuencias con el DSR, se moldean especímenes de ensayo con una altura de 2,0 mm entre placas paralelas de 8 mm de diámetro. Durante el ensayo, las muestras se someten a oscilaciones torsionales a frecuencias preseleccionadas y amplitudes de deformación rotacional (barrido de frecuencias de 0,1 a 100 rad/s con 10 frecuencias de carga por década manteniendo una amplitud de deformación de 1 %). La temperatura de ensayo (5 °C y 15 °C, temperaturas intermedias) se mantiene dentro de $\pm 0,1$ °C mediante calentamiento y enfriamiento positivo de las placas superior e inferior o encerrando las placas superior e inferior en un ambiente controlado térmicamente o en cámara de ensayo. En la Tabla 9 se resumen las características de la temperatura de ensayo y las condiciones de carga.

Tabla 9. Condiciones de carga y temperatura ensayo en el residuo asfáltico

Ensayo	Temperatura de ensayo (°C)	Condiciones de carga	Réplicas de ensayo
Exudación a alta temperatura	Máxima temperatura de la superficie del pavimento	Los niveles de esfuerzo: 0,1 kPa y 3,2 kPa. La fase de fluencia: 1 s Fase de recuperación de 9 s	3
Desprendimiento a temperaturas intermedias	5 °C y 15 °C	Barrido de frecuencias de 0,1 a 100 rad/s con 10 frecuencias de carga por década manteniendo una amplitud de deformación del 1 %	3

Adicionalmente, se realizará la clasificación de grado por desempeño, usando el ensayo de fluencia y recuperación del ligante asfáltico a esfuerzos múltiples (MSCR), del asfalto original y el residuo asfáltico, de acuerdo con las especificaciones de la norma AASHTO T 332 (2019). Esto permitirá determinar si el agente emulsificante y/o el polímero tienen un efecto en las propiedades reológicas. La temperatura para el ensayo de MSCR sería la



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 51 de 61

máxima temperatura del pavimento estimada para un proyecto (medida a 20 mm por debajo de la superficie del pavimento) y se mantiene dentro de $\pm 0,1$ °C durante el ensayo.

RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS

Artículo científico en revista indexada	Libro
X Informe de investigación	X Actividad de transferencia de tecnología
Artículo científico en revista indexada	Capítulo de libro
X Artículo de divulgación	X Revisión de especificaciones técnicas
Ponencias en congresos	Hardware
Conferencias o seminarios	Software
Patentes	Trabajos o proyectos de graduación
Diseño de cursos	Nuevas metodologías
Formación de la comunidad científica	

Generación de nuevo conocimiento: Científico y/o Académico

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Metodología de diseño para emulsiones de alta viscosidad para tratamientos superficiales	Metodología establecida	Entidades públicas y privadas del sector transporte que relacionadas con la producción de emulsiones y aplicación de tratamientos superficiales
Impacto a nivel nacional en la comunidad científica		
Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 52 de 61

Impulsar técnicas eficientes de bajo costo para la intervención de pavimentos de bajo volumen de tránsito y rutas no pavimentadas, mediante informe de investigación que permite una mejora en la implementación de nuevos materiales	Informe de Investigación	RECOPE, MOPT, Municipalidades, empresas vinculadas con el sector.
Beneficios sociales y/o culturales		
Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Colaboración con RECOPE para establecer el sustento técnico para justificar la implementación de nuevos productos asfálticos ampliando la oferta de soluciones con una perspectiva económica, ambientalmente más sostenible y con un enfoque de atención a rutas no pavimentadas	Resultados que permitan justificar la necesidad de la comercialización de nuevos productos.	<p>Instituciones públicas encargadas de la atención de la red vial cantonal y nacional de medio y bajo volumen de tránsito.</p> <p>Los usuarios de caminos y carreteras mejorar las condiciones de la infraestructura con impacto en la economía y calidad de vida</p> <p>El estado costarricense al ampliar la vida útil de los caminos atendidos con la técnica de tratamientos superficiales.</p>
Fortalecimiento de vínculos de apoyo y reconocimiento de la Universidad de Costa Rica con el sector externo		
Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Convenio con RECOPE en la implementación de proyectos de investigación conjunta	Producto de las investigaciones (informes, talleres, normativa)	RECOPE, MOPT, CONAVI al investigador y promover la oferta de productos más competentes para nuestras condiciones, con un enfoque práctico que facilite la implementación.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 53 de 61

CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO

En la Tabla 10 se detalla la conformación del equipo de trabajo para el proyecto de investigación.

Tabla 10. Participantes del equipo investigador

Investigador/C olaborador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Ing. Juan Carlos Múnera Miranda	Licenciatura	Interino	Investigador principal	12	17
Ing. Fabián Elizondo Arrieta	Maestría	Interino	Investigador asociado	4	17
Ing. Ellen Rodríguez Castro	Licenciatura	Interino	Investigador asociado	4	17

Tabla 11. Participantes del equipo investigador (convenio LanammeUCR-RECOPE)

Investigador/ Colaborador	Grado académico	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Ing. Paola Orozco Ballesteros	Maestría	Investigador asociado	4	17
Quim. Rodrigo Gonzalez Rojas	Licenciatura	Investigador asociado	4	17



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 54 de 61

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

A continuación, se muestran las actividades detalladas de acuerdo con el esquema experimental propuesto y organizadas de manera tal que se cumpla con cada uno de los objetivos específicos planteados (Tabla 12).

Tabla 12. Actividades para el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto

Objetivo específico 1: Diseñar en el laboratorio, mediante la variación de parámetros de formulación, composición y mecánica del molino coloidal, emulsiones asfálticas que cumplan con la alta viscosidad requerida para tratamientos superficiales y demás propiedades de calidad.

Actividades	Resultados esperados y/o entregables	Duración estimada de la actividad (meses)
-Muestreo de materiales.	Informes de laboratorio	1
-Caracterización de materiales	Informes de laboratorio	1
-Elaboración de emulsiones asfálticas y estudio de viscosidad.	Informes de laboratorio	5
-Caracterización de emulsiones diseñadas.	Informes de laboratorio	1
-Generar reporte de avance	Reporte de avance	1

Objetivo específico 2: Evaluar el desempeño de las emulsiones diseñadas mediante ensayos que consideren las condiciones de aplicación y principales deterioros de los tratamientos superficiales.

Actividades	Resultados esperados y entregables	Duración estimada de la actividad (meses)
-Evaluación del desempeño agregado-ligante asfáltico	Informes de laboratorio	2
-Evaluación del desempeño emulsión asfáltica	Informes de laboratorio	2
-Evaluación del desempeño residuo asfáltico	Informes de laboratorio	2
-Generar reporte de avance	Reporte de avance	1

Objetivo específico 3: Establecer un procedimiento de diseño de las emulsiones asfálticas de alta viscosidad para tratamientos superficiales producto de la experiencia generada.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 55 de 61

Actividades	Resultados esperados y entregables	Duración estimada de la actividad (meses)
Definir procedimiento de diseño	Esquema de diseño	1
Generar informe final	Informe final	
Duración total estimada del proyecto:		17 meses

En la Tabla 13 se muestra el cronograma propuesto del proyecto. Algunas actividades se pueden realizar en paralelo con otras.

Tabla 13. Cronograma de la investigación

Actividad	Mes																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Fase 1: Diseño de emulsión asfáltica de alta viscosidad																	
Muestreo de materiales																	
Caracterización de materiales																	
Estudio de viscosidad																	
Caracterización de emulsiones																	
Reporte de avance																	
Fase 2: Evaluación del desempeño																	
Desempeño agregado-ligante asfáltico																	
General reporte de avance																	
Desempeño emulsión asfáltica																	
Desempeño residuo asfáltico																	
Generar informe final																	



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 56 de 61

METAS Y ENTREGABLES

Se deberá entregar un informe parcial al finalizar cada año, de acuerdo con lo establecido en el cronograma de trabajo y un informe final al cumplirse el plazo de ejecución del proyecto. Las fechas de cada entrega, así como la vigencia del proyecto, serán establecidas una vez se haya concretado el convenio interinstitucional de colaboración entre RECOPE y la UCR.

Con base en los resultados de la investigación se deberá realizar la transferencia de las conclusiones con el objetivo de impulsar el adecuado uso de los tratamientos superficiales.

Brindar las pautas para que mediante los resultados y hallazgos se tengan las bases para continuar con una etapa de implementación a nivel industrial en colaboración con RECOPE que permite obtener un producto que cumpla con los requerimientos contractuales y durabilidad del material.

Fortalecer la relación entre RECOPE y LanammeUCR para que dentro de su campo de expertiz sean aliados en la implementación de nuevos materiales requeridos en Costa Rica.

Con base en los hallazgos de esta investigación hacer una revisión de la normativa nacional para su actualización en caso de ser requerida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (2017). *Standard practice for selection and use of Emulsified Asphalts AASHTO R 5*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2018). *Standard specification for cationic emulsified asphalt AASHTO M 208*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2018). *Standard specification for polymer-modified emulsified asphalt AASHTO M 316*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 57 de 61

- AASHTO. (2019). *Multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR) AASHTO T 350*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2019). *Viscosity determination of asphalt binder using rotational viscometer AASHTO T 316*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2020). *Determining asphalt binder bond strength by means of the binder bond Strength (BBS) Test AASHTO T 361-16*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2020). *Recovering residue from emulsified asphalt using low-temperature evaporative techniques AASHTO R 78*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2020). *Standard specification for emulsified asphalt AASHTO M 140*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2021). *Best practices for emulsified asphalt chip seals*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Adams et al. (2017). Addressing raveling resistance in chip seal specifications. *Journal of the Transportation Research Board*, 39-46. doi:10.3141/2612-05
- AENOR. (2003). *Determinación de la adhesión entre ligante y árido por el método de ensayo de choque de la placa vialit UNE-EN 12272-3*. Madrid, España: Asociación Española de Normalización y Certificación .
- Akso Nobel. (2014). *Emulsiones bituminosas*. Chicago, Estados Unidos: Akso Nobel.
- Alade et al. . (2022). Experimental and numerical studies on production scheme to improve energy efficiency of bitumen production through insitu oil-in-water (O/W) emulsion. *Energy*, 244. doi:10.1016/j.energy.2021.122700
- Arkema-Roadscience. (2019). *Emulsifier and emulsion performance-improving additive chemistry*. Tulsa Oklahoma: Arkema-Roadscience.
- Asphalt Institute. (2008). *MS-19 Basic Asphalt Emulsion Manual*. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute.
- Asphalt Institute. (2009). *MS-16 Asphalt in Pavement Preservation and Maintenance*. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute.
- ASTM. (2019). *Standard test method for sweep test of emulsified asphalt surface treatment sample ASTM D 7000*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 58 de 61

- ASTM. (2021). *Standard Practice for selection and use of emulsified asphalts ASTM D3628*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM Internacional.
- Barnes, H. (1994). Rheology of emulsions. A review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 91(3), 89-95. doi:10.1016/0927-7757(93)02719-U
- Baumgardner, G. (2006). Asphalt emulsion manufacturing today and tomorrow. *Transportation Research Circular E-C102: Asphalt Emulsion Technology*, 16-25.
- Boussad et al. (1995). La distribution granulométrique des émulsions bitume: Un paramètre clé pour ajuster leur viscosité. *Rev. Gen*, 1, 72-73.
- Buss et al. (2018). *Enhancing the fundamental knowledge and use of asphalt emulsions using systematic scientific and engineering approaches*. Ames, Iowa: Institute for Transportation. Iowa State University.
- Chen et al. (2022). Factors Influencing the droplet size of asphalt emulsion. *Coatings*, 12(575). doi:10.3390/coatings12050575
- Cui, D., & Pang, J. (2017). The effect of pH on the properties of a cationic bitumen emulsifier. *Tenside Surfactants Detergents*. doi:10.3139/113.110520
- Furlong et al. (1999). Water enclosed within the droplets of bitumen emulsions and its relation to viscosity changes during storage. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 152(1), 147-153. doi:10.1016/S0927-7757(98)00628-1
- Gingras et al. (2005). Effect of process parameters on bitumen emulsions. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(9), 979-986. doi:10.1016/j.cep.2005.01.003
- Hinkle, A. (1928). Maintenance of gravel and stone roads especially surface treatments. *Highway Research Board Proceedings*, 7, 270-273.
- Howard et al. . (2011). Correlation of moisture loss and strength gain in chip seals. *Journal of the Transportation Research Board*, 49-57. doi:10.3141/2207-07
- Ingevity. (2016). *Indulin Chipseal*. North Charleston, Carolina del Sur: Ingevity.
- Instituto del Asfalto. (1965). *Tratamientos asfálticos superficiales y macadam a penetración*. Caracas, Venezuela: Instituto del Asfalto.
- INTECO. (2020). *Emulsión asfáltica catiónica. Especificaciones INTE C 382*. San José, Costa Rica: Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- INTECO. (2020). *Emulsión asfáltica modificada con polímero. Especificaciones INTE C 383*. San José, Costa Rica: Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 59 de 61

- INTECO. (2020). *Emulsión asfáltica. Especificaciones INTE C 381*. San José, Costa Rica: Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- ISSA. (2012). *Recommended performance guideline for chip seal A165*. Glen Ellyn, Illinois: International Slurry Surfacing Association.
- Jackson et al. . (1990). Washington state chip seal study. *Transportation Research Record, National Research Council*, 1-10.
- James, A. (1997). Solving emulsion viscosity problems by the choice of emulsifier. *24th AEMA Meeting*. Cancún, Mexico: Asphalt emulsions manufacturers Association.
- James, A. (2006). Overview of asphalt emulsion. *Transportation Research Circular E-C102: Asphalt Emulsion Technology*, 1-15.
- Johannes et al. (2011). Sensitivity of ASTM D7000 sweep test to emulsion application rate and aggregate gradation. *Journal of the Transportation Research Board*, 95-102. doi:10.3141/2235-11
- Johnson, J., & King, G. (2008). *Using polymer modified asphalt emulsions in surface treatments*. Federal Lands Highway.
- Kao. (2013). *Asfíer N100-L Technical data sheet*. México, D. F.: QuimiKao S.A. de C.V.
- Kroger, I., & Kroger, S. (2020). *Tratamientos superficiales de alto desempeño*. Canelones, Uruguay: Grupo Bitafal.
- LanammeUCR. (2022). *Conformación y análisis preliminar de la inversión en la red vial nacional no pavimentada (Informe: EIC-Lanamme-INF-0337-2021)*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA).
- Lesueur et al. (2003). The rheological properties of bitumen emulsions part II experimental characterization. *Road Materials and Pavement Design*, 169-184. doi:10.1080/14680629.2003.9689945
- McHattie, R. (2001). *Asphalt surface treatment guide. Report FHWA-AK-RD-01-03*. Juneau, Alaska: Alaska Department of Transportation and Public Facilities.
- Mercado et al. (2008). *Emulsiones asfálticas. Usos y rompimiento*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.
- MOPT. (2022). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2020)*. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- Nagata, S. (1975). *Mixing: principles and applications*. Tokyo, Japón: Halsted press. doi:10.1002/aic.690220234



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 60 de 61

- NCHRP. (2005). *Chip seal best practices. NCHRP synthesis 342*. Washigton D.C.: Transportation Research Board of the National Academies.
- NCHRP. (2011). *Manual for emulsion-based chip seals for pavement preservation. Research report 680*. Washigton D.C.: The National Academies Press.
- NCHRP. (2017). *Performance-related specifications for emulsified asphaltic binders used in preservation surface treatments. Research report 837*. Washington, D.C.: The National Academies Press. doi:10.17226/24694
- Nouryon. (2021). *Asphalt applications*. Chicago, Estados Unidos: Nouryon.
- Pintor, F. (1985). *Las emulsiones asfálticas en la construcción de tratamientos superficiales en Costa Rica [Tesis de licenciatura]*. San José, Costa Rica: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- PITRA. (2017). *Tratamientos superficiales como alternativa en rutas de lastre*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte.
- Ramírez et al. (2002). Drop size distribution bimodality and its effect on O/W emulsion viscosity. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 309-321. doi:10.1080/01932690208984207
- RECOPE. (20 de Marzo de 2019). *RECOPE*. Obtenido de Modernizan infraestructura de producción de emulsiones asfálticas en el Plantel del Alto: <https://www.recope.go.cr/modernizan-infraestructura-produccion-emulsiones-asfalticas-plantel-del-alto/>
- RTCA. (2004). *Productos de petróleo. Asfaltos. Especificaciones. RTCA 75.01.22:04*. Reglamento Técnico Centroamericano.
- Shell. (2015). *The Shell bitumen handbook*. Westminster, Londres: ICE Publishing.
- Sherman, P. (1968). *Emulsion Science*. Nueva York, Estados Unidos: Academic Press.
- Sherman, P. (1970). *Industrial rheology with particular reference to foods, pharmaceuticals, and cosmetics*. Cambridge, Massachusetts: Academic Press.
- Shuler, S. (1991). High traffic chip seal construction: the Tulsa test road. *Transportation Research Board*, 116-124.
- Sittenfeld, M. (1979). *Usos y abusos de los tratamientos superficiales en Costa Rica [Tesis de licenciatura]*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Tadros, T. (2010). *Rheology of dispersions*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA.
- Takamura, k. (2003). Improved fatigue resistance of asphalt emulsion residue modified with SBR latex. *AEMA Annual Meeting*. Nashville, Tennessee.



EIC-Lanamme-INF-1174-2022

Página 61 de 61

- Takamura, K., & James, A. (2015). Paving with asphalt emulsions. *Advances in Asphalt Materials*, 393-426. doi:10.1016/B978-0-08-100269-8.00013-1
- Tausk, R., & Wilson, P. (1981). Colloid chemical studies on bitumen-in-water emulsions part I. absorption of water in the bitumen droplets and other factors affecting emulsion viscosity. *Colloids and Surfaces*, 2(1), 71-80. doi:10.1016/0166-6622(81)80054-6
- Transit NZ. (2005). *Chipsealing in New Zealand*. Wellington, Nueva Zelandia: Transit New Zealand, Road Controlling Authorities.
- Vladisavljevic, G., & Schubert, H. (2002). Preparation and analysis of oil-in-water emulsions with a narrow droplet size distribution using Shirasu-porous-glass (SPG) membranes. *Desalination*, 144, 167-172. doi:10.1016/S0011-9164(02)00307-7
- Wegman, S. (1991). *Design and construction of seal coats*. Mendota Heights, Minnesota: Minnesota Department of Transportation.
- Zaniewski, J., & Mamlouk, M. (1996). *Preventive maintenance effectiveness. Preventive maintenance treatments. Participant's handbook*. Washington, D.C: Federal Highway Administration.