

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Estimación del tiempo adecuado de curado de la emulsión asfáltica CRS-1
para iniciar el proceso de pavimentación de sobrecapas asfálticas en Costa
Rica

Proyecto de Graduación

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

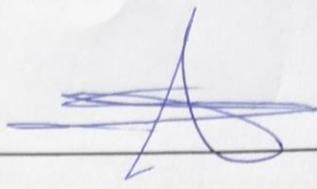
Priscila Granados Azofeifa

Director de proyecto de Graduación:

Ing. Sergio Guerrero Aguilera

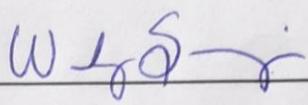
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Comité Asesor



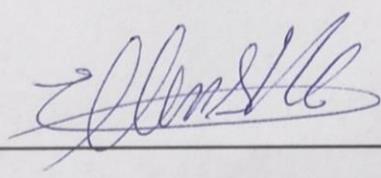
Ing. Sergio Andrés Guerrero Aguilera

Director de Tesis



MSc., Wendy Sequeira Rojas

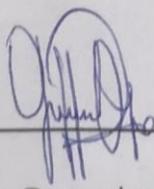
Asesora



Ing. Ellen Rodríguez Castro

Asesora

Presenta



Priscila Granados Azofeifa

Estudiante

Derechos de propiedad intelectual

Fecha: 22 de octubre de 2021

La suscrita, Priscila Granados Azofeifa, cédula 115650825, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné universitario B43062, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación: **“Estimación del tiempo adecuado de curado de la emulsión asfáltica CRS-1 para iniciar el proceso de pavimentación de sobrecapas asfálticas en Costa Rica”**, bajo la Dirección del **Ing. Sergio Guerrero Aguilera**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A mi madre Fricia, por ser el ejemplo más grande de amor y dedicación que tengo, a mi padre Freddy que, aunque no cuento con su presencia física, sé que me ha acompañado desde el cielo en este proceso y lo seguirá haciendo, a mis hermanos Daniela, Alonso y a mi tía Jenny que siempre han estado para mí y me apoyan incondicionalmente; y a mis sobrinas Samantha y Alondra que, con su amor, risas y ocurrencias han sido mi motor para seguir adelante.

Agradecimientos

A mi tío Giovanni, por ser quien me involucró en la ingeniería civil y ser mi guía durante la carrera.

A mis amigos y compañeros: Gerald, Cristian, Erick, Tatiana, Annie, Pablo, Daniela, Jordy, Javier, Priscila, Eladio y Allan; que se convirtieron en mi familia e hicieron que mi travesía por la Universidad fuese mucho más agradable. Sé que serán excelentes profesionales.

A mi director Sergio Guerrero y mis asesoras Wendy Sequeira y Ellen Rodríguez, por guiarme, enseñarme y acompañarme en este proceso.

A cada una de las personas que de una u otra forma fueron parte de mi paso por la Universidad de Costa Rica.

Tabla de contenido

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación.....	1
1.1.1. Problema específico.....	1
1.1.2. Importancia	3
1.1.3. Antecedentes	4
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo General	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. Delimitación del problema	7
1.3.1. Alcance.....	7
1.3.2. Limitaciones.....	8
1.4. Metodología.....	10
1.4.1. Etapa I: Recopilación de información.....	11
1.4.2. Etapa II: Fase experimental	12
1.4.3. Etapa III: Análisis de resultados.....	17
1.4.4. Etapa IV: Informe final	17
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Emulsión asfáltica	18
2.1.1. Componentes de las emulsiones asfálticas	19
2.1.2. Tipos de emulsiones asfálticas	20
2.1.3. Rompimiento de la emulsión	23
2.1.4. Ensayos para la caracterización de las emulsiones asfálticas	25
2.1.5. Importancia y usos de las emulsiones asfálticas para la conservación y construcción de los pavimentos	30
2.2. Riego de liga y su importancia	31

2.2.1.	Proceso constructivo del riego de liga	33
2.2.2.	Construcción de sobrecapas asfálticas y problemas asociados a la mala aplicación del riego de liga.....	37
2.3.	Norma " <i>ASTM D711, Método de ensayo para el tiempo de no levantamiento de una pintura para demarcación vial horizontal</i> "	46
2.4.	Test de Grubbs para determinar valores atípicos.....	48
2.4.1.	Criterios estadísticos para determinar valores atípicos	49
2.4.2.	Test de Grubbs	50
3.	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	51
3.1.	Mezcla asfáltica.....	51
3.1.1.	Información general	51
3.1.2.	Agregados	51
3.1.3.	Ligante	53
3.2.	Emulsión asfáltica	54
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	56
4.1.	Aplicación del ensayo sobre mezcla asfáltica.....	56
4.1.1.	Proceso realizado para la ejecución del ensayo	56
4.2.	Resultados cualitativos de la aplicación del ensayo.....	57
4.3.	Resultados cuantitativos de la aplicación del ensayo.....	72
4.3.1.	Análisis de varianza de un factor	75
4.3.2.	Gráficos cambio en la masa versus tiempo para cada bloque	76
4.3.3.	Modelo matemático generado	81
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	82
5.1.	Análisis cualitativo.....	82
5.2.	Análisis cuantitativo	83
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88

6.1. Conclusiones	88
6.2. Recomendaciones	90
6.2.1. Aplicación del ensayo	90
6.2.2. Aplicación de riego de liga en proceso constructivo de sobrecapas asfálticas..	92
7. REFERENCIAS	94
8. ANEXOS.....	97
9. APÉNDICES	98

Tabla de Figuras

Figura 1. Arrastre del riego de liga en las llantas de las vagonetas, durante el proceso de colocación de la capa asfáltica.	2
Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto	11
Figura 3. Proceso de cuarteo de la mezcla asfáltica.	14
Figura 4. Colocación de mezcla asfáltica en el compactador	14
Figura 5. Bloque de mezcla asfáltica compactado a 21 ciclos de carga y 7% de vacíos.	15
Figura 6. Especímenes listos para aplicar el ensayo.	15
Figura 7. Esquema de producción de la emulsión asfáltica	19
Figura 8. Fases del rompimiento de la emulsión asfáltica.	23
Figura 9. Estado de esfuerzo en la interfaz del pavimento bajo cargas de servicio	31
Figura 10. Efecto de desligue de capas asfálticas en el inicio y propagación de grietas, modelo de fatiga tradicional.....	32
Figura 11. Efecto de desligue de capas asfálticas en el inicio y propagación de grietas desde la superficie del pavimento	33
Figura 12. ¿Cuándo se permite el tráfico sobre el riego de liga?	36
Figura 13. ¿Cuándo se permite a la pavimentadora colocar mezcla asfáltica después de colocar el riego de liga?	36
Figura 14. Desplazamiento de mezcla asfáltica, Ruta 712, Costa Rica.	38
Figura 15. Delaminación por desplazamiento de la mezcla asfáltica, Ruta 712, Costa Rica. .	38
Figura 16. Agrietamientos por fatiga.....	39
Figura 17. Riego de liga no uniforme en la totalidad de superficie a intervenir.....	40
Figura 18. Exceso de emulsión asfáltica en junta transversal con carpeta recién colocada...	40
Figura 19. Exudación en superficie de rodamiento.....	42
Figura 20. Arrastre de riego de liga debido al tránsito de vehículos sobre la emulsión.....	43
Figura 21. Esquema acerca de la colocación de mezcla asfáltica como "traba" (espesor 1)..	44
Figura 22. Respuestas de Estados Unidos: métodos para minimizar el arrastre de riego de liga	46
Figura 23. Respuestas de Canadá: métodos para minimizar el arrastre de riego de liga	46
Figura 24. Equipo utilizado en el ensayo ASTM D711.....	47
Figura 25. Granulometría de diseño	52
Figura 26. Aplicación de la emulsión asfáltica sobre el bloque de mezcla.....	57

Figura 27. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 al minuto 0.....	58
Figura 28. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 a los 5 minutos	58
Figura 29. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 a los 10 minutos ...	58
Figura 30. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 a los 20 minutos ...	59
Figura 31. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 a los 30 minutos ...	59
Figura 32. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 al minuto 0.....	59
Figura 33. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 a los 5 minutos	60
Figura 34. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 a los 10 minutos ...	60
Figura 35. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 a los 20 minutos ...	60
Figura 36. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 a los 30 minutos ...	61
Figura 37. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 al minuto 0.....	61
Figura 38. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 a los 5 minutos	61
Figura 39. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 a los 10 minutos ...	62
Figura 40. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 a los 20 minutos ...	62
Figura 41. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 a los 30 minutos ...	62
Figura 42. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 al minuto 0.....	63
Figura 43. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 a los 5 minutos	63
Figura 44. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 a los 10 minutos ...	63
Figura 45. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 a los 20 minutos ...	64
Figura 46. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 a los 30 minutos ...	64
Figura 47. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 al minuto 0.....	64
Figura 48. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 a los 5 minutos	65
Figura 49. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 a los 10 minutos ...	65
Figura 50. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 a los 20 minutos ...	65
Figura 51. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 a los 30 minutos ...	66
Figura 52. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 al minuto 0.....	66
Figura 53. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 a los 5 minutos ...	66
Figura 54. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 a los 10 minutos .	67
Figura 55. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 a los 20 minutos .	67
Figura 56. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 a los 30 minutos .	67
Figura 57. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 al minuto 0.....	68
Figura 58. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 a los 5 minutos ...	68

Figura 59. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 a los 10 minutos .	68
Figura 60. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 a los 20 minutos .	69
Figura 61. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 a los 30 minutos .	69
Figura 62. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 al minuto 0	69
Figura 63. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 a los 5 minutos ...	70
Figura 64. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 a los 10 minutos .	70
Figura 65. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 a los 20 minutos .	70
Figura 66. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 a los 30 minutos .	71
Figura 67. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 1.	76
Figura 68. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 2.	76
Figura 69. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 3.	77
Figura 70. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 4.	77
Figura 71. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 5.	77
Figura 72. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 6.	78
Figura 73. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 7.	78
Figura 74. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 8.	78
Figura 75. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 9.	79
Figura 76 Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 10.	79
Figura 77. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 11.	79
Figura 78. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 12.	80
Figura 79. Diferencia de masa en función del tiempo para los promedios de los 5 tiempos de estudio.	80

Tabla de Cuadros

Cuadro 1. Ensayos requeridos para caracterizar la mezcla asfáltica.....	12
Cuadro 2. Nomenclatura de las emulsiones asfálticas	23
Cuadro 3. Especificaciones de aceptación para las emulsiones asfálticas catiónicas de rompimiento rápido	29
Cuadro 4. Granulometría de diseño	51
Cuadro 5. Graduación promedio de cada apilamiento de agregados	52
Cuadro 6. Fracción grueso	53
Cuadro 7. Fracción fino.....	53
Cuadro 8. Resultados de los ensayos de gravedad específica y porcentaje de absorción de cada agregado utilizado en el diseño	53
Cuadro 9. Parámetros de la mezcla con el óptimo de asfalto	54
Cuadro 10. Resultados de los ensayos para caracterizar la emulsión asfáltica.....	55
Cuadro 11. Resultados obtenidos de la aplicación del ensayo para cada espécimen.....	72
Cuadro 12. Diferencias de masa para cada bloque, para los distintos tiempos evaluados	73
Cuadro 13. Diferencias de masa para cada bloque, para los distintos tiempos evaluados, después del análisis de datos atípicos.....	73
Cuadro 14. Registro de temperaturas y humedades obtenidas en los ensayos.....	74
Cuadro 15. Resumen del análisis de varianza de todos los datos.	75
Cuadro 16. Análisis de varianza tomando todos los datos.....	75
Cuadro 17. Resumen del análisis de varianza tomando los datos de los 0 a los 10 minutos. 75	
Cuadro 18. Análisis de varianza tomando los datos de los 0 a los 10 minutos.....	75
Cuadro 19. Resumen del análisis de varianza tomando los datos de los 10 a los 30 minutos 75	
Cuadro 20. Análisis de varianza tomando los datos de los 10 a los 30 minutos.....	76
Cuadro A. 1. Valores críticos para la prueba T, Grubbs	97
Cuadro A. 2. Resultados de la aplicación del Test de Grubbs	98

Granados Azofeifa, María Priscila

Estimación del tiempo adecuado de curado de la emulsión asfáltica CRS-1 para iniciar el proceso de pavimentación de sobrecapas asfálticas en Costa Rica

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.

P. Granados A., 2021

xii, 96, [3]h; ils. col. – 37 refs.

Resumen

Las sobrecapas asfálticas son una técnica de mantenimiento de carreteras muy utilizada en el país, y parte de este proceso conlleva el riego de liga. El objetivo de la investigación fue estimar un tiempo de curado de la emulsión asfáltica CRS-1, la cual es la comúnmente usada para el riego de liga, bajo condiciones controladas de laboratorio, por medio de la modificación de la norma ASTM D711; permitiendo brindar recomendaciones para mejorar las prácticas constructivas de la aplicación del riego de liga, y que este pueda ser utilizado como referencia en campo.

La investigación se llevó a cabo en los laboratorios del LanammeUCR. Para los ensayos se utilizó mezcla asfáltica y emulsión asfáltica, las cuales se obtuvieron bajo el convenio de donación. Se caracterizaron estos materiales para conocer si sus propiedades cumplían con las especificaciones requeridas. El ensayo consistió en la aplicación de emulsión asfáltica sobre la superficie de bloques de mezcla asfáltica, donde se hacía rodar un cilindro con anillos de hule, que representa la presión de los neumáticos en el pavimento. Dicho cilindro se deslizó en cinco tiempos distintos. Después de obtener los datos de la pérdida de masa de la emulsión, se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo para determinar el tiempo de curado.

Se observó que existe una disminución en la masa de la emulsión con el paso del tiempo, la cual se debe al arrastre de emulsión en los hules y la evaporación del agua de la emulsión. Además, se encontró un tiempo de curado de 40 minutos con 11 segundos para la emulsión CRS-1. P.G.A.

EMULSIÓN ASFÁLTICA, SOBRECAPAS ASFÁLTICAS, RIEGO DE LIGA, ARRASTRE DE EMULSIÓN ASFÁLTICA, ADHERENCIA DE CAPAS.

Ing. Sergio Guerrero Aguilera

Escuela de Ingeniería Civil.

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

1.1.1. *Problema específico*

Costa Rica cuenta con una red vial total de casi 40 000 km, de los cuales cerca de 10 000 kilómetros están pavimentados y 30 000 km son en lastre. A la Red Vial Nacional pertenecen poco más de 7 600 km y de estos cerca de 5 000 km están pavimentados (INECO y MOPT, 2011). En contraste con el área y la extensión del país, se tienen muchos kilómetros dedicados a carreteras, es por esto que se deben propiciar técnicas de mantenimiento de la red vial adecuadas, de forma que se preserve el buen estado de las mismas.

En nuestro país las sobrecapas asfálticas constituyen una técnica de mantenimiento de uso común para el reforzamiento de las estructuras de pavimento de la Red Vial Nacional. Una de las actividades fundamentales para llevar a cabo esta técnica de mantenimiento es la aplicación de riego de liga.

La aplicación del riego de liga esta normado en nuestro país por medio del *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*, conocido también como el *CR-2010*. En este se hace referencia a este procedimiento como la aplicación de una emulsión asfáltica o asfaltos rebajados, previo a la colocación de una capa asfáltica sobre una capa asfáltica existente (sea de base o de ruedo) o sobre una losa de concreto hidráulico.

La emulsión asfáltica es el material comúnmente utilizado para esta actividad, ya que proporciona la adherencia adecuada entre las capas de pavimento, la cual es crítica para transferir los esfuerzos inducidos por las cargas de tránsito a la estructura del pavimento (NCHRP, 2012).

Una incorrecta aplicación de la emulsión asfáltica sobre la superficie se verá reflejado en la posible aparición de deterioros como: desplazamiento de la mezcla por deslizamiento, pérdida de superficie del pavimento y agrietamientos (NCHRP, 2012).

Los problemas generados por una inadecuada aplicación del riego de liga tienen varias causas. Una de las principales causas de un riego de liga deficiente está asociada al insuficiente tiempo que se le da a la emulsión asfáltica para alcanzar el rompimiento, estabilización y curado del

material, lo cual puede generar un problema común en los procesos constructivos de las sobrecapas asfálticas, como lo es el arrastre del ligante asfáltico en las ruedas de las vagonetas al entrar a la superficie sin estar en las condiciones requeridas de curado, lo cual repercute en la pérdida de asfalto residual y por ende una afectación directa en la adherencia entre las capas que se desean ligar.

Diversos informes publicados por la Unidad de Auditoria Técnica (UAT) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), han evidenciado malas prácticas constructivas relacionadas con el tiempo de rompimiento y curado de la emulsión para iniciar con el proceso constructivo de las sobrecapas asfálticas. Además, en dichos informes se ha reiterado la importancia de la aplicación uniforme del riego de liga, así como dar un tiempo prudencial para que se dé el rompimiento y curado de la emulsión, y así evitar el arrastre de la misma, situación que se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Arrastre del riego de liga en las llantas de las vagonetas, durante el proceso de colocación de la capa asfáltica.

Fuente: (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019)

El arrastre de riego de liga generalmente se da en las huellas de los vehículos, la cual es la zona crítica donde se transmiten los esfuerzos de las cargas de tránsito, si la capa de esta sección se encuentra desligada puede incidir en el desempeño de la estructura del pavimento, debido a que las capas dejan de actuar como un sistema monolítico, por la falta de adherencia, repercutiendo en deterioros prematuros a corto y mediano plazo. Este problema es común en la construcción de las sobrecapas asfálticas, pues muchas veces el tiempo que se da entre la colocación del riego de liga y la colocación de la mezcla asfáltica no es el adecuado, ya que,

tanto a nivel nacional como internacional, no se cuenta con especificaciones que regulen el tiempo de curado de la emulsión asfáltica para iniciar el proceso de pavimentación de sobrecapas asfálticas.

1.1.2. Importancia

Existen muchos tipos de emulsiones asfálticas, estas se pueden clasificar según el tiempo de rompimiento, en emulsiones de rompimiento rápido, medio, lento y controlado (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019). En Costa Rica la emulsión asfáltica utilizada para la aplicación del riego de liga, es la emulsión asfáltica tipo catiónica de rompimiento rápido de baja viscosidad (CRS-1).

A nivel internacional no se cuenta con una especificación sobre el tiempo o momento en que debe comenzar con la colocación de la sobrecapa asfáltica después de haberse realizado la aplicación del riego de liga. La mayoría de las especificaciones lo que establecen es la importancia de que exista un tiempo de rompimiento de la emulsión para iniciar la pavimentación. Por otra parte, existen especificaciones a nivel internacional que sugieren el tiempo de curado o rompimiento total como el tiempo necesario para la colocación de la sobrecapa (Guerrero, 2015).

A nivel nacional no existen investigaciones que indiquen el tiempo que se le debe dar a la emulsión asfáltica para iniciar el proceso de pavimentación y así disminuir el problema de arrastre del riego de liga. El procedimiento que se realiza usualmente en frentes de colocación de sobrecapas asfáltica es empírico y consiste en esperar que la emulsión cambie de color café a negro, sin embargo, esto no garantiza que el agua se haya evaporado totalmente del material, lo cual constituye un factor que contribuye al arrastre del riego de liga en las llantas de las vagonetas que ingresan a la zona de trabajo para descargar la mezcla asfáltica a la pavimentadora. Además, muchas veces ni siquiera se cumple con el tiempo de rompimiento de la emulsión asfáltica para iniciar con el proceso de pavimentación.

El LanammeUCR en publicaciones como *Buenas prácticas constructivas en la aplicación de riego de liga para la colocación de sobrecapas asfálticas*, recalca la importancia de dar un tiempo de curado al riego de liga en el proceso constructivo de las sobrecapas. El tiempo de curado no debe verse como una demora para la colocación de la sobrecapa, más bien debe

considerarse como una práctica correcta para disminuir el efecto de adherencia del riego de liga a las llantas de la vagoneta.

Actualmente como parte del desarrollo social y económico, el país está invirtiendo en numerosa infraestructura vial y, parte de esta inversión se traduce en brindar mantenimiento a la existente por medio de técnicas como la colocación de sobrecapas asfálticas. Por lo que se requiere que esta técnica constructiva de mantenimiento de carreteras se realice bajo estándares constructivos adecuados que garanticen el adecuado desempeño de los pavimentos e inversión realizada. Es por esta razón que se considera de suma importancia generar una investigación que permita por medio de pruebas en laboratorio, determinar el tiempo de curado de la emulsión que se aplica en el país (CRS-1), con el fin de proveer una recomendación que pueda ser aplicada en campo como parte de las mejoras al proceso constructivo. De esta forma se ayudaría a mejorar la función de adherencia de la emulsión asfáltica en el proceso constructivo de capas asfálticas, así como ayudar a disminuir problemas de arrastre del riego de liga y el uso de traba.

1.1.3. Antecedentes

El riego de liga o tack coat es una actividad importante en el proceso constructivo de las carreteras para conseguir la adherencia que se necesita entre capas asfálticas, para que estas funcionen como un solo sistema en la transmisión de las cargas de tránsito a la estructura del pavimento. Diferentes investigaciones han demostrado que, al brindar el tiempo de curado al riego de liga, el material es menos propenso a presentar problemas arrastre o adherencia en las llantas de las vagonetas que transportan la mezcla asfáltica en relación a una emulsión que acaba de romper (Asphalt Institute, 2008). A continuación, se presentan extractos de bibliografía consultada sobre el tema a investigar en este proyecto.

En cuanto a las consecuencias de una mala adherencia entre las capas asfálticas, la *Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos*, señala que se podrían presentar deterioros o fallas por deslizamiento y empuje del pavimento. Además, puede generar problemas de agrietamiento por fatiga. También, indica que una mala adherencia de las capas provoca una pérdida significativa de la vida útil del pavimento.

Esta investigación añade que se logran excelentes rendimientos cuando las emulsiones de asfalto se usan adecuadamente, lo cual considera el rompimiento y curado de la emulsión. Los

principales factores que afectan la ruptura y los tiempos de curado son la velocidad de aplicación y las condiciones climáticas. Cuanto mayor sea la tasa de aplicación, más tiempo tomará en romper y curar la emulsión. Típicamente el uso de una emulsión asfáltica diluida requerirá más tiempo para romper y curar en comparación con una no diluida, debido a la mayor cantidad de agua presente (Federal Highway Administration, 2016).

Por otro lado, Lan, Dong, y Huu en el 2016 realizaron una investigación sobre la interfaz entre capas de asfalto en pavimento flexible; en el estudio utilizaron la prueba de corte de Leutner modificada, que permite determinar la resistencia al corte y el módulo de rigidez al cortante en la interfaz de la muestra de doble capa. Las pruebas se realizaron para varias temperaturas y para diferentes tasas de aplicación de la emulsión CRS-1. Los resultados del estudio mostraron que la temperatura tiene un efecto profundo en la resistencia de unión de la interfaz entre las capas de asfalto y la tasa de aplicación tiene un menor impacto. Estos resultados se utilizaron para establecer ecuaciones de regresión, relacionando la resistencia de la unión, la temperatura y la tasa de aplicación, las cuales fueron utilizadas para analizar la influencia de la unión de la interfaz en fallas prematuras en pavimentos como grietas por fatiga prematura. Sin embargo, los autores no utilizan el tiempo de curado como una variable para el estudio.

Por su parte Destrée y De Visscher realizaron una investigación sobre el impacto de las condiciones de aplicación del riego de liga en la adherencia entre capas. El objetivo del trabajo fue llevar a cabo un estudio sobre la adhesión entre capas, evaluando la influencia de parámetros como el tipo, la tasa de dispersión de la emulsión, naturaleza, tiempos de ruptura y curado de la emulsión asfáltica antes de la superposición. De este deducen que los parámetros que afectan la adherencia son muchos y que estos interfieren entre sí, y concluyen que para garantizar una adherencia adecuada es esencial controlar estos parámetros.

Una publicación realizada en el 2012 por el *Departamento de Transportes del Estado de Ohio*, recalca la importancia de que la aplicación del riego de liga se realice de manera uniforme y con una cobertura total de la superficie para lograr una adecuada adherencia de las capas. En su publicación también mencionan que permitir que la emulsión asfáltica cure antes de colocar la capa de asfalto propiciará la unión adecuada entre las mismas. La capacidad de la emulsión para adherir capas mejora una vez el material se ha curado. En esta misma se menciona que las llantas de los vehículos, utilizados para transportar la mezcla asfáltica, pueden arrastrar material que no haya tenido tiempo suficiente para curar; y que el arrastre de riego de liga en las llantas de los camiones pueden afectar la adherencia de las capas asfálticas.

A nivel nacional, la colocación del riego de liga se realiza de forma empírica, pues no existen especificaciones que normen un tiempo adecuado para el curado de la emulsión asfáltica. No obstante, el LanammeUCR ha evidenciado en múltiples informes (LM-PI-AT-109-16, LM-PI-AT-140-15 y LM-PI-AT-64-15) malas prácticas constructivas en la aplicación del riego de liga, como lo son: riegos no uniformes con cobertura parcial, excesos de colocación de riego de liga, poco tiempo para que la emulsión asfáltica rompa totalmente, arrastre de ligante asfáltico en las llantas de las vagonetas que transportan la mezcla asfáltica, entre otros. Además, han advertido de las consecuencias de no realizar este procedimiento de manera correcta, entre ellas: afectación de la adherencia entre las capas asfálticas para que actúen como un solo paquete estructural ante las cargas que pasan sobre estas, afectación en la transmisión y disipación de los esfuerzos al pavimento, reducción de la vida por fatiga de la estructura y la aparición de deterioros prematuros de las carreteras de la red nacional vial.

Además, el LanammeUCR ha sido enfático en la importancia de incorporar buenas prácticas constructivas en los procesos de construcción de las carreteras y ha generado documentos como lo son "*Aplicación de riego de liga, Guía para Inspectores*" y "*Buenas prácticas constructivas en la aplicación de riego de liga para la colocación de sobrecapas asfálticas*" donde brindan recomendaciones de cómo realizar de una mejor manera la aplicación del riego de liga, con el fin de evitar y corregir las malas prácticas constructivas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estimar el tiempo adecuado de curado bajo condiciones controladas de laboratorio para una emulsión asfáltica catiónica de rompimiento rápido de baja viscosidad, antes de iniciar el proceso de pavimentación de sobrecapas asfálticas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar una recopilación bibliográfica sobre el rompimiento y curado de las emulsiones asfálticas, así como las metodologías y normativas existentes que regulen dicho procedimiento.
- Caracterizar la emulsión asfáltica y la mezcla asfáltica a utilizar en los ensayos.

- Adaptar el ensayo de la norma "*ASTM D711, Método de ensayo para el tiempo de no levantamiento de una pintura para demarcación vial horizontal*", para aplicarla a la determinación del tiempo de curado de la emulsión asfáltica CRS-1, sobre una superficie de mezcla asfáltica.
- Elaborar un análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados obtenidos en el laboratorio, sobre la pérdida de masa de la emulsión asfáltica en los primeros 30 minutos después de colocada sobre una superficie de mezcla asfáltica, siguiendo la metodología de ensayo propuesta.
- Estimar un valor de tiempo de curado, que pueda servir como referencia para la aplicación de riego de liga en campo.

1.3. Delimitación del problema

1.3.1. Alcance

El presente estudio tiene como fin estimar el tiempo de curado de la emulsión CRS-1, la cual es la utilizada para la aplicación del riego de liga en el proceso constructivo de las sobrecapas asfálticas, en Costa Rica. Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio del LanammeUCR, ubicado en la Ciudad de la Investigación de la Universidad de Costa Rica. Donde se realizaron ensayos bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y tasa de aplicación de la emulsión asfáltica, con el fin de obtener resultados que sean representativos.

Debido a que no existen investigaciones similares y porque como cualquier proyecto se cuenta con recursos y tiempo limitado, el estudio realizado se orienta a determinar el tiempo de curado, por lo que no se evaluó el efecto con distintas emulsiones, temperaturas, humedades y tasas de aplicación. Y para poder establecer un tiempo confiable y repetible los ensayos se realizaron en el laboratorio.

Como no existe un método de ensayo que permita estimar el tiempo de curado en las emulsiones, se usa como referencia la norma ASTM D711, Método de ensayo para el tiempo de no levantamiento de una pintura para demarcación vial horizontal, el cual se adaptó para ser realizado con emulsión asfáltica y sobre bloques de mezcla asfáltica construidos en laboratorio, esto con el fin de generar una condición más representativa de los procesos de constructivos de sobrecapas asfálticas.

Se elaboraron, en el laboratorio del LanammeUCR, tres bloques de mezcla asfáltica, los cuales se cortaron cada uno, en cuatro bloques de 15 cm de ancho, 22 cm de largo y 5 cm de espesor, para un total de 12 muestras. Los bloques de mezcla asfáltica se elaboraron a partir de un único diseño; mezcla densa y con tamaño nominal de 12,5 mm; la cual corresponde a una mezcla usualmente utilizada en proyectos de conservación vial de la Red Vial Nacional. Esta mezcla asfáltica fue proporcionada por Constructora Herrera.

En cuanto a la emulsión asfáltica utilizada, se trabajó con la CRS-1, proveniente de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE).

1.3.2. Limitaciones

Al no existir un ensayo que determine el tiempo de curado de la emulsión asfáltica, se adapta el ensayo de la norma ASTM D711, el cual es utilizado para estimar el período de secado requerido de la pintura utilizada para demarcar el pavimento, para que el neumático de un automóvil no la arrastre. En la investigación se aplicó emulsión asfáltica en vez de pintura, y sobre bloques de mezcla asfáltica, en lugar de una placa de metal, y por la naturaleza del objeto de ensayo se generan limitaciones al variar dicha norma.

La investigación no contempla el análisis de emulsiones distintas a la CRS-1, ya que esta es la que se utiliza mayormente para el riego de liga en el proceso de sobrecapas asfálticas, y es una de los tipos que se produce en Costa Rica. La investigación tampoco considera la afectación en el tiempo de curado por aplicación de riegos de emulsión asfáltica en exceso.

Debido a todas las variables que se tienen al adaptar un método a un material distinto y a la misma variabilidad que aporta la naturaleza de la mezcla asfáltica, se planteó el uso de un solo tipo de mezcla asfáltica para poder detectar cuáles son los parámetros más importantes, por lo que los resultados son representativos únicamente para este diseño. Para otros tipos de mezcla asfáltica serviría como una referencia.

La parte experimental tuvo dependencia de los laboratorios del LanammeUCR y de los equipos con los que ahí se cuenta, por lo que durante la implementación se detectaron necesidades en el equipamiento que no estaban disponibles. En primera instancia se intentó conseguir una balanza que reportara más de un decimal, esto con el fin de poder medir la cantidad emulsión que arrastra el rodillo y la que pierde el bloque al rodar el rodillo sobre él, pues la cantidad de emulsión arrastrada es muy pequeña en comparación con la masa total del bloque y del rodillo;

sin embargo, no fue posible obtener una balanza con capacidad de más de 10 kg que reportara más de un decimal. Por lo tanto, no se pudo tomar la cantidad de masa que arrastraba el rodillo, ya que después de los cinco minutos no se lograba registrar diferencia alguna entre la masa del rodillo y la masa del mismo con la emulsión arrastrada; es por esto que se descartó la toma de la masa arrastrada por el rodillo.

En cuanto a la diferencia de masa registrada en el bloque de mezcla asfáltica, por pérdida de emulsión, a pesar de que si se registraba una diferencia de masa en la balanza, no se logró determinar el porcentaje de esta que pertenecía al asfalto y al agua, pues como se mencionó en el párrafo anterior, no se pudo medir la cantidad de emulsión que se arrastraba en el rodillo, y con esto aunque visualmente se observaba una clara disminución de arrastre en el rodillo con el paso del tiempo, se seguía observando un aumento en la pérdida de masa en el bloque debido a la evaporación del agua de la emulsión, la cual no fue posible determinar.

Unido a lo anterior, la presencia de pequeñas corrientes de aire que existían en el laboratorio y la exactitud de la balanza (cantidad de decimales) afectaban en el momento de realizar la lectura de los datos, ya que en ocasiones tardaba unos segundos en estabilizarse el dato de la masa del bloque de mezcla asfáltica.

Otra de las limitaciones importantes de la investigación fue que al variar la superficie especificada en la norma ASTM D711, la cual es una placa lisa, por una superficie de mezcla asfáltica, se está agregando una variable más la cual influye en los ensayos, y cuya influencia no pudo ser medida, pues aunque los bloques de mezcla asfáltica utilizados representan mejor lo que pasa en la realidad, la irregularidad de la superficie limita la exactitud y precisión del ensayo de laboratorio, no obstante simula una condición más real o cercana al proceso constructivo de sobrecapas asfálticas.

En las pruebas realizadas previo a la aplicación del ensayo, se intentó aplicar la tasa de emulsión asfáltica con un aplicador de recubrimiento (enrasador) con el fin de obtener un espesor uniforme, primero se realizó sobre una superficie de aluminio y se lograba obtener el espesor requerido, sin embargo, al momento de realizarlo en el bloque de mezcla asfáltica y leer el espesor con el medidor de película (galga), se observa que además de que no se lograba cubrir la tasa requerida tampoco se lograba obtener un espesor uniforme, por lo que se descartó este método para la aplicación de la emulsión y se decidió utilizar una brocha de pintura.

En cuanto a las brochas utilizadas para la aplicación de la emulsión asfáltica, se tuvo la limitación de que no se podía controlar con exactitud el espesor de la película de emulsión a lo largo del área del bloque, además se dificultaba llegar a la cantidad de gramos exactos de emulsión que se debían colocar, es por esto que en muchos bloques se tiene una pequeña cantidad, ya sea mayor o menor, de emulsión colocada a la teóricamente requerida.

Debido a que la emulsión asfáltica al estar en contacto con el aire pierde agua, con el tiempo tendía a presentar problemas de asentamiento y manejabilidad, por lo que la colocación de la emulsión con la brocha se tornaba más complicada al ir aumentando la cantidad de especímenes ensayados, pues la brocha se volvía dura y difícil de manipular debido a la cantidad de asfalto que quedaba de los ensayos previos, lo cual aumentaba el tiempo de colocación y afectaba la homogeneidad y distribución; lo que podrían llegar a afectar los resultados de los ensayos. Sin embargo, no se procedió a limpiar la brocha con Queroseno, ya que podían quedar restos del mismo en la brocha los cuales también podían influir en los resultados de los ensayos.

Asociado a esto, el proceso de colocación de la emulsión podía tardar de uno a dos minutos, y este tiempo no se contabilizó como parte del tiempo de curado, pues el tiempo iniciaba una vez se lograba colocar la cantidad de gramos requeridos.

De forma similar la primera lectura realizada en cada ensayo, realmente no es inmediatamente después de colocada la totalidad de gramos de emulsión requeridos, ya que, entre el inicio del tiempo y la toma de la primera masa, transcurre un lapso de 20 a 40 segundos, mientras se deslizaba el rodillo y se coloca el bloque en la balanza para conocer la diferencia de masa, por lo que la primera lectura no se lograba realizar en el tiempo cero.

1.4. Metodología

La investigación se llevó a cabo mediante el uso de dos enfoques: cualitativo y cuantitativo; los cuales se utilizaron en conjunto con el fin de lograr analizar y explicar los resultados obtenidos de una mejor manera. Además, se utilizó el método inductivo, analítico y explicativo para poder generar argumentos y razonamientos que permitieron realizar las representaciones teóricas y el modelo, a partir de los resultados obtenidos.

El proceso de trabajo se planteó mediante cuatro etapas distintas, como se muestra en Figura 2, donde se enumeran en orden o prioridad de ejecución. Sin embargo, la etapa I y la etapa II

pueden iniciar simultáneamente sin tener una afectación significativa. La etapa III depende en su totalidad de la etapa II; y la etapa IV no se puede finalizar sin tener las etapas anteriores listas.

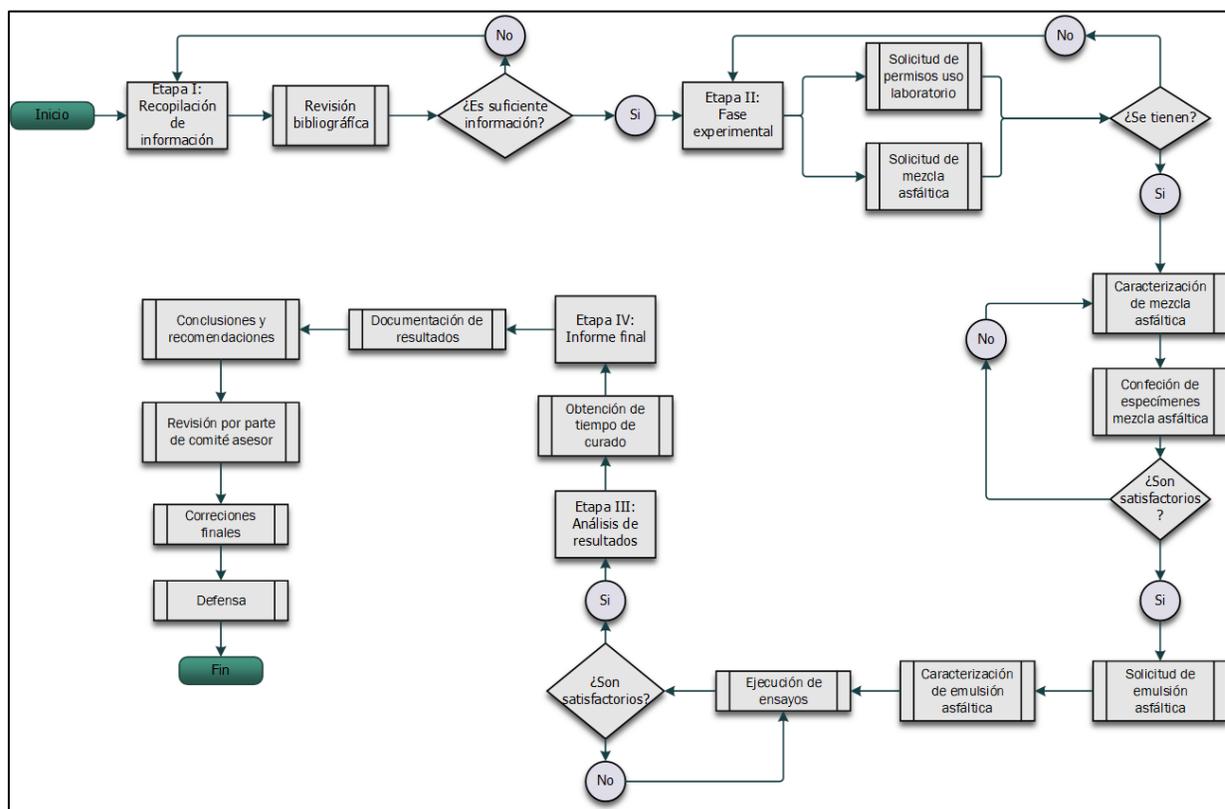


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto

1.4.1. Etapa I: Recopilación de información

En esta etapa se realizó una revisión bibliográfica, tanto nacional como internacional, sobre la información existente acerca de la emulsión asfáltica, el rompimiento y curado de la misma, el proceso constructivo e importancia del riego de liga y demás temas relacionados con la investigación como la norma ASTM D711. Se estudiaron los diferentes ensayos de caracterización de la emulsión asfáltica. Todo esto con el fin de conocer y ampliar la información sobre la influencia del riego de liga en el proceso de pavimentación de las sobrecapas asfálticas en el país; y con esto tener un insumo para poder llevar a cabo de la mejor manera las etapas posteriores.

1.4.2. Etapa II: Fase experimental

Una vez se tuvo mayor conocimiento de los temas relevantes para el desarrollo de la investigación, se procedió con la fase experimental, la cual se dividió en varias partes, las cuales se explican a continuación:

1.4.2.1. Solicitud de permisos

Se procedió con la solicitud de los permisos para el uso de los laboratorios del LanammeUCR y también la solicitud de la mezcla asfáltica y la emulsión asfáltica mediante convenio de donación. La mezcla asfáltica fue donada por Constructora Herrera, la cual es utilizada en proyectos de conservación vial de la Red Vial Nacional, y la emulsión asfáltica fue proporcionada por RECOPE.

1.4.2.2. Caracterización de los materiales

- Mezcla asfáltica:

Para esta investigación se utilizó una mezcla densa, con un tamaño nominal de 12,5 mm, la cual fue donada por la empresa constructora Herrera. Además, la empresa proporcionó el diseño y caracterización de la mezcla asfáltica, por lo que solo se realizó el ensayo de contenido de asfalto por ignición, ASTM D6307.

- Emulsión asfáltica:

Con los bloques listos, se procedió a solicitar a RECOPE la emulsión asfáltica de rompimiento rápido CRS-1, la cual es la más utilizada para el riego de liga en el país. Se realizó la caracterización de la misma, por medio de los ensayos mostrados en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Ensayos requeridos para caracterizar la mezcla asfáltica

Ensayo	Método de ensayo	
	AASHTO	ASTM
Asfalto residual por destilación	T 59	D 6997
Ductilidad a 25 °C	T 51	D 113
Penetración a 25 °C	T 49	D 5
Solubilidad en tricloroetileno	T 44	D 2042
Insolubilidad en tricloroetileno	T 44	D 2042
Viscosidad Saybol Furol a 50 °C	T 72	D 7496
Estabilidad al almacenamiento 24 h	T 59	D 6930

Demulsibilidad a 25 °C	T 59	D 6936
Tamaño de partícula (Prueba de malla 20)	T 59	D 6933
Asfalto residual por destilación	T 59	D 6697
Aceite destilado	T 59	D 6697
Densidad a 25 °C	-	D 6937

Fuente: (LanammeUCR, 2019)

1.4.2.3. *Confección de especímenes*

Los bloques para obtener los especímenes de mezcla asfáltica se fabricaron utilizando el equipo del LanammeUCR. Se compactaron tres bloques a 21 ciclos de carga y con 7 % de vacíos. A continuación, se resume en proceso constructivo, el cual se realizó con ayuda del técnico del LanammeUCR:

- Se calentó la mezcla en el horno a 100 °C, por aproximadamente 3 horas, para que la mezcla fuese más trabajable y poder realizar el cuarteo.
- Se realizó el cuarteo para separar la mezcla de manera uniforme, además se extrajeron 1500 g para realizar el ensayo de contenido de asfalto, como se muestra en la Figura 3.





Figura 3. Proceso de cuarteo de la mezcla asfáltica.

- Posteriormente se colocaron 24 kg de mezcla asfáltica en el compactador de bloques y se programó para 21 ciclos de carga (ver Figura 4).



Figura 4. Colocación de mezcla asfáltica en el compactador

- Una vez se cumplían los 21 ciclos, se retiraba y se dejaba enfriar el bloque (ver Figura 5).



Figura 5. Bloque de mezcla asfáltica compactado a 21 ciclos de carga y 7% de vacíos.

- Este proceso se repitió para cada uno de los tres bloques de mezcla asfáltica.
- Finalmente, cada bloque se cortó en cuatro bloques más pequeños que tuvieron las siguientes dimensiones: 15 cm de ancho, 22 cm de largo y 5 cm de espesor cada uno. Por lo tanto, se elaboraron 12 especímenes (bloques de mezcla asfáltica) para ser ensayados, los cuales se observan en la Figura 6.



Figura 6. Especímenes listos para aplicar el ensayo.

1.4.2.4. *Aplicación de ensayos*

Previo a la aplicación de los ensayos definitivos, se hicieron ensayos de prueba, con el fin de buscar y analizar cómo lograr condiciones idóneas que satisficieran la investigación. Con el criterio del Ing. Sergio Guerrero Aguilera se estudiaron los tiempos: 0, 2, 5, 10 y 15 minutos después de haber colocado la emulsión sobre el bloque de mezcla. Además de los tiempos de ensayo se evaluó la posibilidad de mantener el laboratorio bajo las especificaciones de temperatura y humedad, así como buscar la manera más adecuada para aplicar la emulsión asfáltica sobre el bloque de mezcla.

Una vez realizadas las pruebas previas, se escogieron los tiempos de medición en conjunto con expertos para analizar cuáles permitieran cubrir los objetivos de la investigación, se elige inmediatamente después de colocada la emulsión, ya que se ha visto en campo como algunos contratistas colocan la mezcla asfáltica justo después de colocar el riego de liga, sin dar ningún tiempo para que la emulsión rompa y provocando un arrastre mayor. Se eligieron tiempos intermedios a los 5, 10 y 20 minutos, y finalmente a los 30 minutos, cuyo fin consistió en intentar alcanzar una masa constante en el bloque, donde no se detectaran cambios o no se observara arrastre de emulsión en los hules del rodillo. Se eligen solo 5 tiempos de estudio debido a que por las dimensiones de los especímenes no se podían realizar más ensayos para el mismo bloque.

Posteriormente se elaboraron los especímenes y se caracterizó la emulsión, se procedió a aplicar el ensayo. El cual consistió en modificar la norma ASTM D711, "Método de ensayo para el tiempo de no levantamiento de una pintura para demarcación vial horizontal", donde se colocó emulsión asfáltica con una brocha sobre los bloques de mezcla asfáltica, esparciéndola de manera uniforme, y posteriormente se rodaba el cilindro especificado en la norma ASTM D711, el cual cuenta con dos anillos de caucho sintético y simulan el paso de una llanta.

A nivel nacional el CR-2010 especifica tasas de dosificación entre 0,15 y 0,70 L/m². La tasa de emulsión asfáltica utilizada para la investigación fue de 0,5 L/m², ya que es un valor que se encuentra en el rango de las tasas especificadas; además en las pruebas que se realizaron previamente, se utilizó una tasa de 0,30 L/m² y con esta no se lograba cubrir uniformemente el área total del bloque de mezcla asfáltica, por lo que se aumentó la cantidad de emulsión asfáltica a una tasa de 0,5 L/m². Esta tasa se pasó a gramos para ser aplicada con la brocha. Para calcular la cantidad de gramos de emulsión requerida se utilizó la densidad de la emulsión asfáltica obtenida de la caracterización, la tasa de aplicación y el área de aplicación del bloque, y con estos tres datos se procedió a calcular los gramos de emulsión requeridos para cada bloque.

Antes de comenzar con el ensayo se tomó la masa del bloque. Posteriormente se colocó la cantidad de emulsión requerida sobre el espécimen, se inició el tiempo, se rodó manualmente el rodillo, se tomó el peso del bloque, se anotó el dato y se procedió a limpiar los anillos del rodillo con queroseno. Una vez transcurrido los primeros cinco minutos se volvía a rodar el rodillo sobre parte de la superficie donde no se hubiese pasado el rodillo y se volvía a cuantificar

la diferencia de masa registrada en el bloque. Este procedimiento se repitió para los demás tiempos, deslizando el rodillo limpio. Se realizaron 12 repeticiones del ensayo y cinco tiempos para cada espécimen, por lo que se recolectaron un total de 60 datos de diferencia de masas para su posterior análisis.

1.4.3. Etapa III: Análisis de resultados

Con los resultados de los ensayos se elaboró un análisis cuantitativo y cualitativo, con el fin de explicar el fenómeno observado en el desarrollo de la investigación. El análisis cuantitativo tenía como fin poder establecer correlaciones entre las variables estudiadas y generar un modelo matemático que permitió estimar un valor de tiempo de curado de la emulsión asfáltica CRS-1. Por su parte el análisis cualitativo complementa la parte cuantitativa y ayuda a explicar los fenómenos que no se explican completamente del análisis estadístico.

Primeramente, se aplica la prueba de Grubbs para descartar datos atípicos. Luego se analizaron los resultados de cada espécimen por separado para conocer el comportamiento de cada uno y ver si se repetía en los demás. Posterior a esto se utilizaron las medias de cada tiempo evaluado y se graficaron, donde se siguió observando el mismo comportamiento, con esta se define un modelo que brinda un tiempo de curado de la emulsión asfáltica evaluada. Además de esto se realizaron pruebas de análisis varianza de un factor para conocer el comportamiento de las medias.

La parte cualitativa está representada por medio del análisis de fotografías tomadas durante la aplicación de los ensayos, las cuales ayudan a explicar algunos fenómenos observados en el transcurso de la investigación. Esta información sirve de respaldo para sustentar las conclusiones obtenidas en la investigación.

1.4.4. Etapa IV: Informe final

Con esta etapa finaliza la investigación, se realizó el presente documento donde se reúne toda la información obtenida y se describen los hallazgos encontrados con la ejecución del proyecto. Además, se redactan conclusiones y recomendaciones generadas a partir de las etapas anteriores y toda la demás documentación que sea pertinente para el respaldo de la investigación.

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Emulsión asfáltica

La emulsión asfáltica es una dispersión de cemento asfáltico y agua que contiene una pequeña cantidad de agente emulsionante que a la vez proporciona la unión necesaria para conservar la estabilidad del sistema hasta su uso. Es un sistema heterogéneo que normalmente contiene dos fases inmiscibles (asfalto y agua) en donde el agua forma la fase continua de la emulsión y pequeños glóbulos de asfalto forman la fase discontinua. La emulsión asfáltica puede ser de tipo aniónico (glóbulos cargados negativamente) o catiónica (glóbulos cargados positivamente), dependiendo del agente emulsionante (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010).

La emulsión asfáltica es la combinación de tres componentes principales: asfalto, agua y una cantidad específica de un agente emulsificante, que permite la mezcla de dos sustancias que por su naturaleza química no podrían mantenerse combinadas después de ser mezcladas. Esto se logra a través de un molino coloidal o equipo especializado para separar las partículas de asfalto en tamaños suficientemente pequeños que permita combinarse con el emulsificante. Este tercer componente, el emulsificante, evita o retrasa la separación del asfalto y el agua, manteniendo estable dicha combinación en un tiempo determinado. En algunas ocasiones las emulsiones asfálticas pueden contener otros aditivos como estabilizadores, mejoradores de recubrimiento, anti-desnudantes o agentes de control de rompimiento (Ulloa, 2012).

La Figura 7 muestra un esquema de producción de la emulsión asfáltica. El resultado es un producto líquido que puede utilizarse para la construcción y el mantenimiento de carreteras, a bajas temperaturas (NCHRP, 2018).

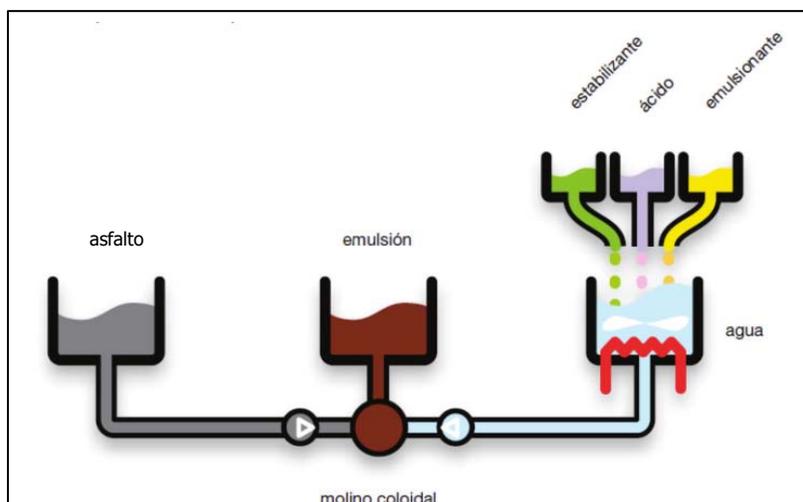


Figura 7. Esquema de producción de la emulsión asfáltica

Fuente: (AksoNobel, 2010)

Modificado por: (Granados, 2021)

2.1.1. Componentes de las emulsiones asfálticas

Conocer la importancia que tiene cada componente de la emulsión asfáltica permitirá tener una mayor comprensión de los diferentes tipos de clasificación que existen, los cuales se detallan posteriormente. A continuación, se describen los tres principales componentes de la emulsión asfáltica.

Asfalto

El asfalto es un producto que se obtiene de la destilación del petróleo, es el último residuo que queda después de extraer del crudo: aceites, diésel, bunker, gasolina y demás, y sirve para pegar fuertemente las partículas de agregado en la mezcla asfáltica (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019). Por su parte el asfalto residual es la cantidad de asfalto remanente en la superficie después que la emulsión ha roto y curado (Ulloa, 2012).

La emulsión asfáltica está compuesta entre un 40 % y un 75 % de asfalto, y aun siendo el elemento predominante en la emulsión, ninguna de sus propiedades afecta la estabilidad de la misma. Sin embargo, la caracterización del asfalto es necesaria para determinar su desempeño posterior a la colocación de la emulsión. Según el clima, condiciones de tránsito esperado y el tipo de aplicación escogida, la propiedad que requiere mayor atención es la dureza del asfalto (Ulloa, 2012).

Agua

Ciertos minerales y algunos químicos en el agua utilizada durante la elaboración de las emulsiones, pueden afectar la estabilidad y las condiciones de almacenamiento de la emulsión asfáltica. La presencia de iones de calcio y magnesio en el agua retrasan el rompimiento de los enlaces catiónicos en emulsiones con carga positiva, contrariamente, cuando se presentan carbonatos o partículas en suspensión, se produce una pérdida de estabilidad en la emulsión debido a un prematuro rompimiento (Ulloa, 2012).

Emulsificante

El emulsificante está conformado una parte por cadenas de hidrocarburos que son solubles en medios orgánicos, como el asfalto, y otra parte con carga eléctrica que es soluble en medios acuosos. Es por esta razón que a pesar de que el emulsificante es el componente en menor cantidad dentro de una emulsión, es quien provee las propiedades principales a la emulsión, le brinda estabilidad y determina finalmente qué tipo de emulsión asfáltica se obtendrá (Ulloa, 2012).

2.1.2. Tipos de emulsiones asfálticas

Existen diferentes tipos de emulsiones asfálticas, los cuales tienen distintas clasificaciones según el parámetro o propiedad mecánica del material, entre estos se puede mencionar los siguientes:

Tipos de emulsion según su polaridad o carga

Estas son categorizadas según la carga eléctrica que rodea la partícula de asfalto, por lo que según la polaridad de la carga se pueden clasificar como catiónicas, aniónicas o neutras (Ulloa, 2012).

- Catiónicas: son aquellas cuyo agente emulsificante confiere polaridad electropositiva alrededor de las partículas de asfalto.
- Aniónicas: son aquellas cuyo agente emulsificante proporciona polaridad electronegativa alrededor de las partículas de asfalto.

Las emulsiones aniónicas y catiónicas son usualmente las más utilizadas en la construcción y mantenimiento de carreteras; a diferencia de las neutras que aún son poco conocidas y que requieren mayores avances tecnológicos para ser usadas (Ulloa, 2012).

Una recomendación técnica indica que no se deben mezclar las emulsiones aniónicas con las catiónicas (Asphalt Institute, 2008).

Tipos de emulsion según su reactividad o tiempo de rompimiento

La carga eléctrica contenida en cada tipo de emulsificante rodea superficialmente a las partículas de asfalto, separadas por las partículas de agua, conduciendo a que se alejen entre ellas por un periodo de tiempo determinado. Ese tiempo en que las partículas de asfalto se mantienen separadas, conlleva a una segunda categorización y es de acuerdo a su reactividad (velocidad para que ocurra la coalescencia entre las partículas de asfalto), donde existe un rompimiento o pérdida de estabilidad de la emulsión (Ulloa, 2012).

En esta se clasifica la emulsión asfáltica según la tasa relativa en la cual las dos fases se separan al hacer contacto con agregado o suelo. Se establecen cuatro tipos de emulsiones asfálticas según el tiempo que tardan en romper (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).

- RS (Rapid Setting): emulsiones de rompimiento rápido.
- MS (Medium Setting): emulsiones de rompimiento medio.
- SS (Slow Setting): emulsiones de rompimiento lento.
- QS (Quick Setting): emulsiones de rompimiento controlado.

Otras clasificaciones

Además de las clasificaciones anteriores, las emulsiones asfálticas se pueden clasificar según las siguientes propiedades:

- Viscosidad de la emulsión: para esta se utilizan números, a las emulsiones de baja viscosidad se les coloca el sufijo "1", mientras que a las emulsiones de alta viscosidad se les coloca el sufijo "2" (Jiménez, Ulloa, & Múnera, 2016).
- Rigidez: para designar la rigidez o dureza del asfalto residual, para un asfalto residual de rigidez alta se utiliza la letra minúscula "h", por su nombre en inglés "hard", para asfaltos con rigidez muy alta, se utiliza la letra "H", cuando no se coloca ninguna letra, indica que la dureza es media, y por último para los asfaltos blandos se coloca la letra "s", por su inicial en inglés (soft) (Jiménez, Ulloa, & Múnera, 2016).
- Modificadas con polímero: la letra "P" indica que la emulsión fue elaborada a partir de asfalto modificado con polímero. La base asfáltica en estas emulsiones es más adhesiva

y elástica que los cementos asfálticos convencionales (Mercado, Bracho, & Avendaño, 2008).

- De alta flotación: estas emulsiones se designan con las letras "HF" y tienen una calidad específica que permite una densa película asfáltica que asegura un mejor cubrimiento del agregado, sin que exista escurrimiento, y baja susceptibilidad a la humedad. Esta película de asfalto ayuda a mantener alta rigidez en un clima caliente y menor rigidez en climas fríos (Mercado, Bracho, & Avendaño, 2008).
- Las emulsiones asfálticas también pueden ser diluidas o no. Se le llama emulsión diluida, a la que se le añade una cantidad de agua igual o menor que el volumen de emulsión original; y se conoce como emulsión asfáltica no diluida a la que no posee ningún tipo de modificación posterior al proceso de producción (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).

Nomenclatura

De acuerdo con Texas Department of Transportation (2010), para clasificar las emulsiones asfálticas según sus características, se utiliza un sistema que facilita su nomenclatura y toma en cuenta los siguientes aspectos:

- Lo primero que se coloca es el tipo de carga de la emulsión, el sistema de nomenclatura establece que a las emulsiones catiónicas se les coloca el prefijo "C", mientras que si no aparece esta letra la emulsión es aniónica.
- Posteriormente se indica la velocidad de rompimiento que puede ser RS (Rompimiento rápido), MS (Rompimiento medio), SS (Rompimiento lento) o QS (Rompimiento controlado).
- Después de nombrarlas por polaridad y reactividad, se coloca la viscosidad de la emulsión con un "1" para baja viscosidad y "2" para de alta viscosidad.
- Entre otros parámetros que se pueden utilizar están los sufijos "h" o "s" para designar la dureza, "P" o "L" para las emulsiones que contienen polímeros o látex; y "HF" para indicar si la emulsión es de alta flotación.

Así por ejemplo, la emulsión CSS-1h, es una emulsión catiónica de rompimiento lento, de baja viscosidad y alta rigidez. En el Cuadro 2 se muestra la nomenclatura para los diferentes tipos de emulsión asfáltica.

Cuadro 2. Nomenclatura de las emulsiones asfálticas

Aniónicas	Catiónicas
RS-1	CRS-1
RS-2	CRS-2
MS-1	CSS-1
HFMS-1	CSS-1h
HFMS-2h	CQS-1h
SS-1	CRS-2P
SS-1h	CRS-2L

Fuente: (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019)

2.1.3. *Rompimiento de la emulsión*

Las emulsiones asfálticas se componen de un medio disperso (fase jabonosa o acuosa) en la que se mantienen separadas las partículas de asfalto o la fase dispersante. En el proceso de producción, la fase jabonosa se encuentra dispersa en el asfalto, donde las partículas de asfalto se mantienen separadas debido a que éste es reducido a pequeñas gotas que son rodeadas por una superficie de emulsificante, la cual se encuentra cargada eléctricamente y evita que éstas se atraigan nuevamente entre sí.

El proceso de coalescencia o unión de las partículas de asfalto ocurre en un tiempo posterior, cuando el agua contenida en la emulsión empieza a evaporarse, tal como se muestra en la Figura 8. Este fenómeno se conoce como el rompimiento o pérdida de estabilidad de la emulsión (Ulloa, 2012).

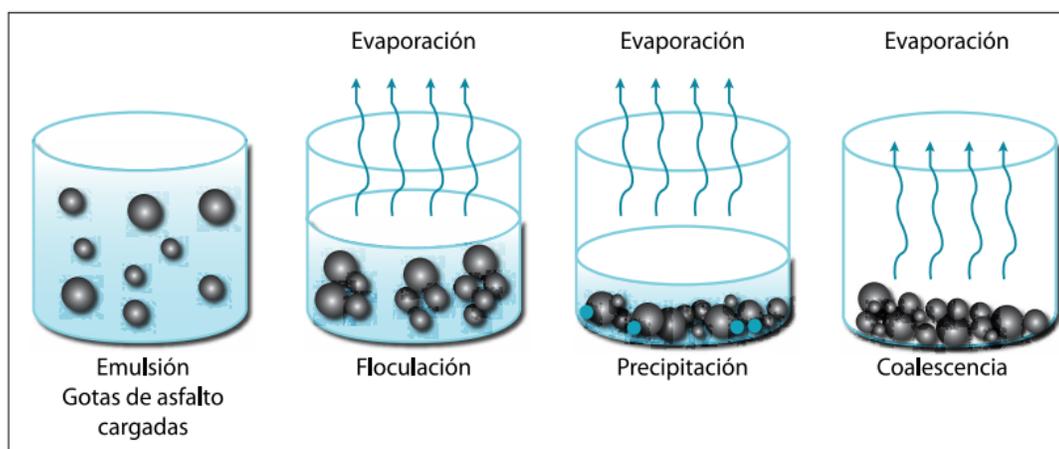


Figura 8. Fases del rompimiento de la emulsión asfáltica.

Fuente: (Ulloa, 2012)

Existen dos tiempos de rompimiento de la emulsión asfáltica, los cuales son importantes de diferenciar:

- *Tiempo de rompimiento:* este es el necesario para que las partículas de agua se separen de la emulsión. En esta etapa ocurre un cambio de coloración en la emulsión de café a negro, aunque todavía hay presencia de agua en la emulsión asfáltica (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).
- *Tiempo de curado o rompimiento total:* es el tiempo necesario para que el agua introducida en el proceso de producción de la emulsión se evapore completamente. Esta etapa involucra el desarrollo óptimo de las propiedades mecánicas de la emulsión asfáltica por lo que hay mayor habilidad de adherencia entre capas (Asphalt Institute, 2008).

Rompimiento de la emulsión asfáltica según el tipo de agregado.

El rompimiento comienza en el momento en que la emulsión se mezcla con el agregado y cuando se coloca sobre el pavimento, debido a la separación del agua en el asfalto. El tipo de agregado también tiene influencia con la reactividad de la emulsión (Ulloa, 2012).

- *Rompimiento rápido:* la reacción química para una emulsión RS ocurre rápidamente al mezclarse con cualquier agregado, por lo que son utilizadas en tratamientos de superficies, ya que producen películas resistentes y altas viscosidades (RS-2 y CRS-2), lo que ayuda a prevenir el escurrimiento. Estas propiedades la hacen ideal para aplicaciones de rociado tales como bacheos, sellos arenosos y tratamientos superficiales (Mercado, Bracho, & Avendaño, 2008).
- *Rompimiento medio:* una emulsión MS es afín para mezclarse con agregado grueso, pero no agregado fino (Ulloa, 2012). También pueden ser mezcladas con agregados en frío o caliente. Como estas emulsiones no rompen inmediatamente al entrar en contacto con el agregado, pueden ser elaboradas en una planta y la mezcla resultante transportada al sitio de pavimentación. Este tipo de emulsión se usa en mezclas de emulsiones de grado abierto, en reciclado de pavimentos y en mezclas en frío en plantas centrales (Mercado, Bracho, & Avendaño, 2008).
- *Rompimiento lento:* las emulsiones SS son creadas para un tiempo máximo de mezcla con los agregados y esto asegura un buen cubrimiento con agregados densos y

agregados con un alto contenido de finos. Estas emulsiones se utilizan para las bases de agregado denso y para estabilización de bases (Mercado, Bracho, & Avendaño, 2008).

- *Rompimiento controlado:* las emulsiones QS al igual que las SS poseen mayor afinidad para mezclarse con agregado fino, aunque la rotura en una QS se manifiesta más rápido que en una SS (Ulloa, 2012).

De acuerdo con las propiedades mineralógicas del agregado disponible en la mayor parte del territorio nacional, las emulsiones asfálticas catiónicas presentan mejor afinidad para su uso en las diferentes aplicaciones de proyectos viales (Ulloa, 2012).

Tiempo de rompimiento de la emulsión asfáltica

Según el reporte de la National Cooperative Highway Research Program publicado en 2012, define un tiempo de curado de una emulsión asfáltica entre un rango de 30 minutos a 2 horas, haciendo la salvedad que dependerá de la tasa de aplicación y condiciones ambientales como se explicó anteriormente.

Entre los factores que pueden afectar el tiempo de rompimiento y curado de la emulsión asfáltica, están: la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento, la temperatura de la superficie del pavimento donde se colocará el riego de liga, la temperatura de aplicación, la tasa de dosificación, el tipo de emulsión y la dilución de la misma (National Cooperative Highway Research Program, 2012).

2.1.4. Ensayos para la caracterización de las emulsiones asfálticas

A continuación, se resumen los ensayos de laboratorio necesarios para medir el desempeño y demás características de composición, consistencia y estabilidad de la emulsión asfáltica. Estos ensayos están normados internacionalmente por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y American Society for Testing and Materials (ASTM).

2.1.4.1. Asfalto residual por Destilación, ASTM D6997

Este ensayo se utiliza para separar las fases de la emulsión, el residuo asfáltico y agua, y se realiza para verificar la composición de la emulsión. Tiene como finalidad determinar si el porcentaje de residuo asfáltico de una emulsión coincide con el indicado por el fabricante en su ficha técnica.

El ensayo consiste en tomar una muestra de $200 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de emulsión asfáltica y calentarla a $260 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$, durante $60 \text{ min} \pm 15 \text{ min}$ desde la primera aplicación de calor. Posteriormente se estima la masa de asfalto residual y por gravimetría la composición porcentual, así como los volúmenes de destilado y agua obtenidos. El método también se utiliza para recuperar el asfalto residual y realizar ensayos adicionales como ductilidad, penetración y solubilidad (American Society for Testing and Materials, 2020).

2.1.4.2. Viscosidad Saybolt Furol, ASTM D244 y ASTM D7496

Esta prueba tiene la finalidad de determinar la viscosidad de la emulsión mediante un viscosímetro de Saybolt Furol, el cual cuenta con un orificio calibrado para este fin, con el propósito de conocer la consistencia. La presencia de glóbulos grandes puede obstruir el orificio calibrado, indicando que la emulsión está rompiendo (Salazar, 2011).

La viscosidad tiene importancia en el uso de las emulsiones pues es una propiedad que afecta la aplicabilidad de las mismas. La emulsión debe ser lo suficientemente fluida para poder ser aplicada uniformemente a través de la barra de rociado del distribuidor (American Society for Testing and Materials, 2019).

La prueba consiste en pasar la emulsión, que se ha calentado previamente a 25 °C o 50 °C dependiendo del tipo de emulsión, a través de un viscosímetro de Saybolt Furol. Se determina el tiempo que tarda la emulsión en llenar un matraz aforado de 60 cm^3 . Finalmente, el resultado se reporta en segundos Saybolt Furol (American Society for Testing and Materials, 2019).

2.1.4.3. Ensayo de sobretamaño de partículas en la malla N° 20, ASTM D244 y ASTM D6933

Es un ensayo que sirve para evaluar la calidad y estabilidad de la emulsión. Una muestra de emulsión se hace pasar a través de un tamiz de $850 \text{ }\mu\text{m}$ (N° 20) y mide gravimétricamente la cantidad de partículas de asfalto u otros materiales retenidos (Jiménez & Ulloa, 2010).

La retención de una cantidad excesiva de partículas en el tamiz indica que pueden ocurrir problemas en el manejo y aplicación del material, y puede suceder un rompimiento prematuro. Para evitar esto la norma establece que menos de un 0,1 % debe quedar retenido en el tamiz. Las partículas retenidas en el tamiz a menudo se deben a la aglomeración de la fase dispersa. El almacenamiento, el bombeo, la manipulación y la temperatura pueden contribuir a la formación de partículas. La contaminación del tanque, el transporte o la

manguera son otros factores que afectan la formación de partículas (American Society for Testing and Materials, 2019).

2.1.4.4. Estabilidad de almacenamiento ASTM D244 y ASTM D6930

El ensayo mide la propiedad de la emulsión para mantenerse como una dispersión uniforme durante el almacenaje. Se mide gravimétricamente la tendencia de los glóbulos a flocular y sedimentarse en un periodo de tiempo de 24 horas. Se coloca un volumen de 500 mL de emulsión en una probeta y se deja reposar, luego se toman muestras de la parte superior e inferior de la probeta. Se calcula el porcentaje de la diferencia del residuo de la parte superior e inferior (Jiménez & Ulloa, 2010).

Este ensayo es útil para determinar, en un tiempo corto, la estabilidad de almacenamiento de la emulsión. La prueba busca reproducir las condiciones de almacenaje de una emulsión en la planta de producción y responde a la necesidad de conocer la cantidad de asfalto que se sedimenta al almacenar una emulsión. La norma permite como máximo un 1 % de diferencia entre la fracción superior e inferior (American Society for Testing and Materials, 2019).

2.1.4.5. Penetración a 25 °C, ASTM D5

El ensayo de penetración es una medida de la consistencia, mediante la penetración de una aguja cargada, los asfaltos blandos permitirán penetraciones mayores que los más rígidos (Salazar, 2011).

El ensayo se realiza para clasificar el residuo asfáltico de una emulsión según su dureza. Consiste en colocar una pequeña muestra de asfalto en un recipiente. Posteriormente dicho espécimen se sumerge en un baño a 25 °C y se deja caer sobre él una aguja, con una carga de 100 g, durante cinco segundos. Finalmente, el resultado se reporta en décimas de milímetro que penetró la aguja en el asfalto. Se realizan tres repeticiones y se calcula el promedio (American Society for Testing and Materials, 2020).

2.1.4.6. Ductilidad del residuo obtenido por destilación, ASTM D113

El ensayo mide la capacidad del residuo asfáltico de una emulsión para ser estirado hasta formar un hilo muy delgado. Este ensayo proporciona una medida de las propiedades de tracción de los materiales asfálticos. Consiste en verter el residuo en una briqueta, la cual se sumerge en un baño de agua a 25 °C, posteriormente la muestra se elonga a razón de 5 cm/min hasta que rompa (American Society for Testing and Materials, 2017).

La presencia o ausencia de ductilidad es importante porque mide cuanto el asfalto se estira antes de romperse bajo condiciones controladas. Los asfaltos dúctiles tienen normalmente, mejores propiedades aglomerantes. Por otra parte, asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura y por lo tanto a la deformación (Salazar, 2011).

2.1.4.7. Solubilidad en tricloroetileno del residuo obtenido por destilación, ASTM D2042

El ensayo sirve para determinar la cantidad de partículas inorgánicas presentes en el asfalto, y con esto verificar si el asfalto es apropiado para su utilización en campo. Es un indicador de la calidad del asfalto, y de la importancia de que las partículas inorgánicas no afecten las propiedades cementantes del ligante asfáltico.

Consiste en diluir una pequeña cantidad de asfalto (aproximadamente 2 g) en 100 ml de tricloroetileno, la porción de asfalto soluble en tricloroetileno representa la parte cementante del asfalto y la porción insoluble corresponde a las partículas inorgánicas presentes en el asfalto (American Society for Testing and Materials, 2017).

Para determinar la cantidad de partículas insolubles en tricloroetileno, se hace pasar la mezcla diluida a través de un filtro de microfibra de vidrio y se registra el peso de las partículas retenidas, que corresponde al asfalto no disuelto (American Society for Testing and Materials, 2017).

2.1.4.8. Carga de partícula de las emulsiones asfálticas, ASTM D244

Con este ensayo se verifica la polaridad de las emulsiones asfálticas, por lo que sirve para identificar una emulsión catiónica o aniónica. Las emulsiones catiónicas se identifican por la migración de las partículas hacia un electrodo cargado negativamente (cátodo) (American Society for Testing and Materials, 2017).

Consiste en verter la emulsión en un beaker de 250 mL, a una altura que permita que los electrodos queden sumergidos aproximadamente 25 mm. Se conectan los electrodos a una fuente de corriente eléctrica durante 30 minutos. Finalmente se observa el depósito en los electrodos. Una emulsión catiónica depositará una cantidad considerable de asfalto en el cátodo (electrodo negativo), mientras que el ánodo (electrodo positivo) estará relativamente limpio (American Society for Testing and Materials, 2017).

2.1.4.9. Demulsibilidad, ASTM D244 y ASTM D6936

En método es aplicable tanto a emulsiones asfálticas aniónicas como catiónicas del tipo RS y MS, se utiliza para clasificar la emulsión asfáltica como de rompimiento rápido o lento (American Society for Testing and Materials, 2017).

El ensayo de demulsibilidad consiste en obtener el porcentaje de asfalto activo cuando la emulsión asfáltica es forzada a romper mediante un agente químico (Salazar, 2011).

El ensayo indica la tasa relativa a la cual los glóbulos coloidales de asfalto en la emulsión romperán cuando se esparce en una película delgada alrededor de los agregados o suelo. Así se determina si romperá rápido (RS, rapid setting) o de manera lenta (MS, médium setting). Esto se logra utilizando una disolución de dioctil sulfosucinato de sodio para emulsiones catiónicas o una disolución de cloruro de calcio para emulsiones aniónicas (Jiménez & Ulloa, 2010).

Especificaciones Nacionales para la emulsión asfáltica

Como se mencionó anteriormente según el tipo de agregado con el que se cuenta en la mayor parte del país, las emulsiones más utilizadas son las catiónicas, y para este tipo de emulsiones el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010), define una serie de requerimientos que debe cumplir la emulsión asfáltica para ser utilizada en construcción vial. En el Cuadro 3 se muestran los requisitos para las emulsiones de rompimiento rápido, la cual fue la utilizada para la investigación.

Cuadro 3. Especificaciones de aceptación para las emulsiones asfálticas catiónicas de rompimiento rápido

Grado	CRS-1		CRS-2	
	Min	Max	Min	Max
Ensayos en emulsiones				
Viscosidad, Saybolt Furol a 25 °C SFS	20	100	-	-
Estabilidad al almacenamiento, 24 h, %	-	1	-	1
Demulsibilidad, %	60	-	60	-
Recubrimiento y resistencia al agua				
Ensayo de malla N° 20, %	-	0,10	-	0,10
Destilación				
Residuo, %	55	-	63	-
Ensayos en el residuo por destilación				

Grado	CRS-1		CRS-2	
	Min	Max	Min	Max
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	100	200	100	200
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min, cm	40	-	40	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	97,5	-	97,5	-

Fuente: (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010)

Modificado por: (Granados, 2021)

2.1.5. Importancia y usos de las emulsiones asfálticas para la conservación y construcción de los pavimentos

En comparación con el asfalto, la emulsión asfáltica ofrece muchas ventajas constructivas, ya que es un producto menos viscoso que requiere de menores temperaturas para ser trabajable. Desde el punto de vista de seguridad ocupacional, lo anterior es un factor que reduce el riesgo de quemaduras severas (Herra, y otros, 2017).

Asimismo, la utilización de emulsiones como alternativa de las mezclas asfálticas brinda una solución viable, por su menor costo y porque son ventajosamente más amigables con el medio ambiente, puesto que durante el proceso de preparación y en su aplicación, la cantidad de emisiones, vapores y consumo de energía es menor en comparación con las mezclas asfálticas convencionales. A pesar de ello, aproximadamente solo entre un 10% y 20% del asfalto empleado en pavimentos es usado en forma de emulsiones asfálticas (Ulloa, 2012).

Las emulsiones asfálticas son utilizadas para diferentes aplicaciones que va desde el mantenimiento a las carreteras hasta el proceso constructivo de pavimentos. Entre otros posibles usos que tienen, el Manual de Emulsiones Asfáltica MS-19 (Asphalt Institute, 2008) destaca los siguientes:

- *Tratamientos superficiales:* lechadas asfálticas, sellos de arena, cape seal, micropavimentos.
- *Reciclado de asfaltos:* En frío-en sitio, full-Depth, caliente en sitio, en planta central.
- *Otras aplicaciones:* estabilización de suelos y bases granulares, riegos de liga e imprimación, control de polvo, sello de grietas y recubrimientos de protección.

2.2. Riego de liga y su importancia

El riego de liga se define como la aplicación de una capa delgada de emulsión asfáltica por medio de riego a presión sobre una superficie ya sea bituminosa, losa de concreto, base granular o estabilizada previo a la colocación de una capa asfáltica. El objetivo del riego de liga es proporcionar una adecuada adherencia para asegurar que la capa asfáltica colocada sobre la estructura existente y la nueva, actúen en conjunto como un solo sistema en la transmisión de las cargas de tránsito a la estructura del pavimento (Guerrero, 2015).

Guerrero en el boletín informativo *Buenas prácticas constructivas en la aplicación de riego de liga para la colocación de sobrecapas asfálticas*, afirma que la literatura a nivel internacional indica la utilización del riego de liga como material adherente para la colocación de sobrecapas. La interfaz de adherencia entre la capa existente y la nueva capa colocada influye considerablemente en la distribución de los esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento. Estudios realizados sobre la interfaz de adherencia del pavimento han indicado que el riego de liga proporciona una adecuada unión entre las capas del pavimento, la cual es crítica para transferir los esfuerzos cortantes y radiales de tensión a la estructura de pavimento, los cuales se muestran en la Figura 9 (Guerrero, 2015).

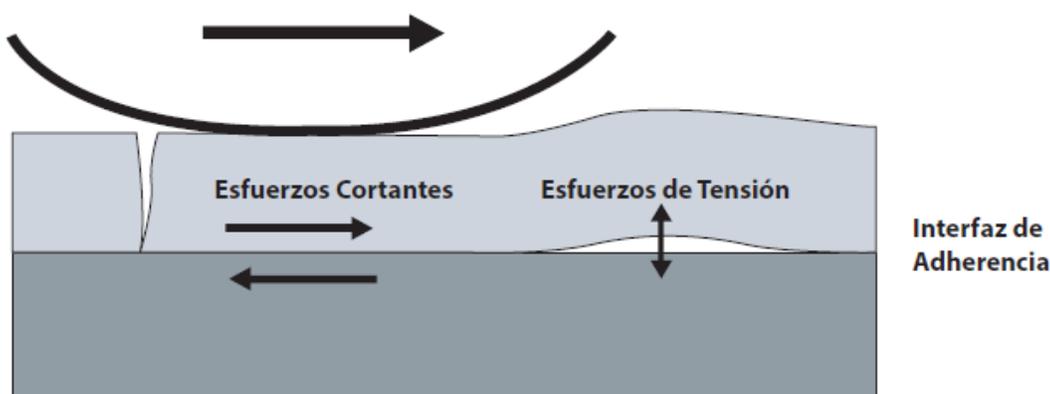


Figura 9. Estado de esfuerzo en la interfaz del pavimento bajo cargas de servicio
(National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Si la interfaz de adherencia entre la capa nueva y la existente no puede proveer la suficiente resistencia para soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de tránsito, puede ocurrir una falla por cortante.

Además, la insuficiencia de adherencia entre la capa existente y la nueva capa, puede causar que los esfuerzos de tensión se concentren en la fibra inferior de la nueva capa de rodadura.

Esta concentración de esfuerzos acelera la aparición del agrietamiento por fatiga en la superficie y el deterioro del resto de la estructura del pavimento (National Cooperative Highway Research Program, 2012).

Esto es explicado por nuevos modelos que contemplan el efecto de una pobre adherencia entre capas (Khweir y Fordyce, 2003). El modelo tradicional de agrietamiento por fatiga considera la concentración de esfuerzos de tensión, así como el inicio y propagación de grietas a la superficie en la última fibra de las capas asfálticas que constituyen la estructura del pavimento, al suponer que las capas se encuentran debidamente adheridas y que el pavimento funciona como un sistema monolítico. Sin embargo, los nuevos modelos sugieren que, en capas asfálticas con pobre adherencia, la concentración de esfuerzos se presentará tanto en la última fibra de la capa existente, como en la última fibra de la nueva capa asfáltica colocada al encontrarse estas dos desligadas, como se observa en la Figura 10. Esto se traduce en un deterioro acelerado de la estructura del pavimento (Guerrero, 2015).

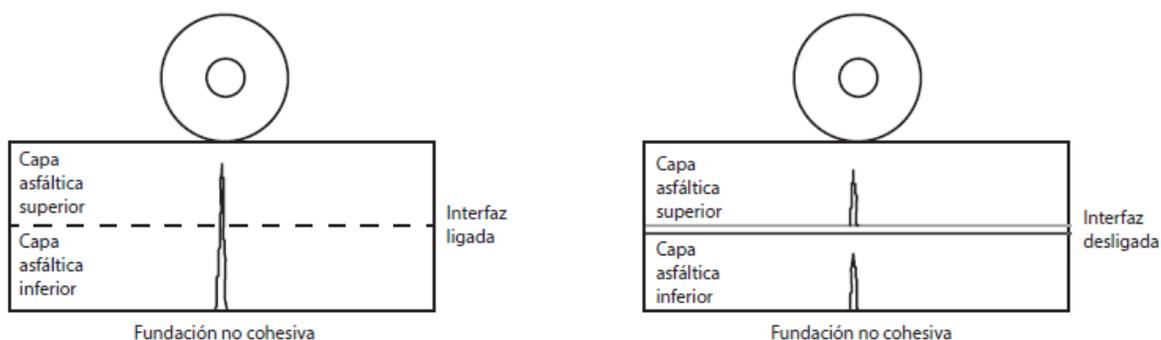


Figura 10. Efecto de desligue de capas asfálticas en el inicio y propagación de grietas, modelo de fatiga tradicional

Fuente: (Khweir y Fordyce, 2013)

Los nuevos modelos también toman en cuenta que el agrietamiento inicia sobre la superficie hacia la interfaz de adherencia, el agrietamiento no se propagará hacia abajo de las capas de la estructura existente sino más bien generará un posible plano de deslizamiento en la interfaz de adherencia (ver Figura 11) (Guerrero, 2015).

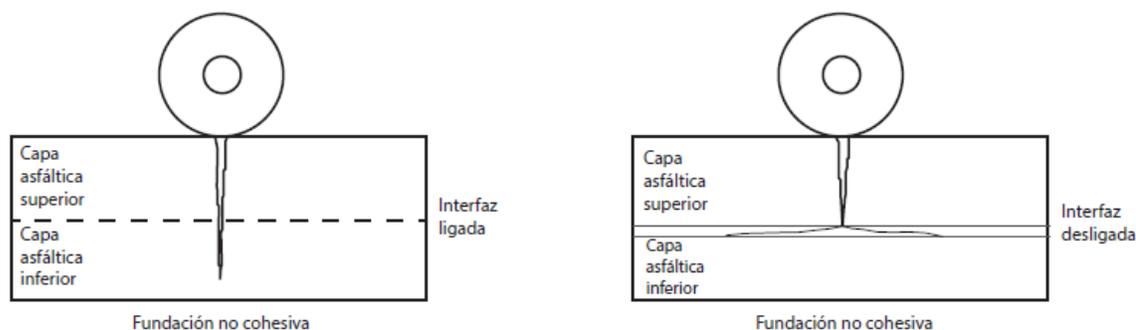


Figura 11. Efecto de desligue de capas asfálticas en el inicio y propagación de grietas desde la superficie del pavimento

Fuente: (Khweir y Fordyce, 2013)

2.2.1. Proceso constructivo del riego de liga

De acuerdo con la Guía para inspectores, "Aplicación de riego de liga" del Programa de Infraestructura del Transporte del LanammeUCR (2019), el proceso constructivo del riego de liga se compone de las siguientes actividades:

2.2.1.1. Preparación de la superficie

Para la aplicación del riego de liga es aconsejable que la superficie donde se va a aplicar esté seca y limpia, con el fin de optimizar la adherencia entre capas y disminuir el riesgo de fallas por deslizamiento o delaminación entre capas de mezcla asfáltica. La aplicación de emulsión asfáltica sobre una superficie con polvo o sucia podría generar que el material del riego de liga se adhiera al polvo y no a la superficie sobre la que se coloca el riego de manera que la misma se vuelve susceptible a deterioros prematuros. La emulsión asfáltica al adherirse al polvo es más propensa a que se puedan presentar pérdidas de cobertura en la superficie por arrastre de emulsión asfáltica en los neumáticos de las vagonetas (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).

La humedad de la superficie es un factor que también puede comprometer la adecuada adherencia entre las capas, por lo que previo a la aplicación debe prestarse especial atención a cúmulos de agua o humedad sobre la superficie, los cuales deberán ser eliminados previo a la aplicación del riego de liga (National Cooperate Highway Research Program, 2012).

2.2.1.2. Calibración del equipo

Previo a la aplicación del riego de liga se debe revisar y calibrar el equipo a utilizar, en este punto se deben controlar aspectos como:

- *La presión del camión dosificador en la aplicación del riego de liga:* Este debe tener la capacidad de desarrollar presión para que el material asfáltico salga expulsado a presión constante y uniforme por cada una de las boquillas de la barra rociadora en forma de abanico hacia la superficie. Una presión demasiado baja dará como resultado un riego discontinuo por la descarga desigual del material en las boquillas individuales. Mientras que una presión demasiado alta deformará el abanico de riego, generando patrones de riegos no uniformes.
- *Temperatura de aplicación:* Los camiones dosificadores de emulsión asfáltica deben tener la capacidad de mantener la temperatura de la emulsión para asegurar una adecuada viscosidad y flujo del material a través de las boquillas de la barra rociadora. En el país la emulsión CRS-1 se aplica en rangos de 50 °C y 70 °C.
- *Altura de la barra de dosificación:* La elevación de la barra rociadora debe ajustarse a una altura que permita un correcto rocío del material bituminoso. Un rocío adecuado provee el traslape del ligante asfáltico necesario para alcanzar una aplicación uniforme y una cobertura apropiada de la superficie. La altura de la barra dependerá de la velocidad de operación del camión, configuración de boquillas y la presión del riego. Como referencia, la barra dosificadora se suele colocar a 30 cm de la superficie.
- *Boquillas:* Las boquillas deben estar siempre limpias y en buen estado. Se debe revisar el ángulo con respecto al eje longitudinal de la barra, pues este propicia la orientación de salida del abanico. Para asegurar una cobertura uniforme del material, las boquillas deben mostrar el mismo patrón de rocío, para esto deben tener el mismo tamaño, estar abiertas, libres de obstrucciones y alineadas al mismo ángulo (se recomienda entre 15° y 30°). El tamaño y mantenimiento de las boquillas son puntos que también se deben revisar; el tamaño varía de acuerdo a la tasa que se desea aplicar. Además, el mantenimiento diario del equipo es importante para evitar que la emulsión se atasque en las boquillas y afecte la salida de la emulsión.

También, es recomendable que antes de que se inicie el proceso se realice un tramo de prueba, para verificar que existen condiciones climáticas adecuadas y que el camión dosificador cumple con los requisitos anteriormente mencionados para la aplicación del riego de liga.

2.2.1.3. Aplicación y cobertura

En cuanto a la aplicación, la cobertura y uniformidad del riego de liga juegan un papel primordial para garantizar una adecuada adherencia. Una adecuada aplicación de riego de liga es aquella que muestra una cobertura y dosificación uniforme a lo largo de toda la capa que se desea intervenir tanto en el plano horizontal como en juntas y cortes verticales (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).

Para la aplicación del riego de liga es necesario conocer la tasa de dosificación especificada en el diseño; a nivel nacional el CR-2010 especifica tasas de dosificación entre 0,15 y 0,70 L/m². Se debe tener especial cuidado con los excesos de emulsión en secciones como juntas o bordes donde se colocarán capas asfálticas y traslapes entre un riego de liga y el próximo, ya que se podrían generar problemas de exudación de la capa asfáltica. En las juntas transversales, es recomendable antes de iniciar un nuevo riego, colocar tiras de papel u otro material similar para proteger el riego existente, de manera que se genere una distancia suficiente para que cuando la barra de riego comience a dosificar la emulsión asfáltica, a la potencia exigida, el nuevo riego inicie con el patrón de rocío adecuado al término del papel de construcción colocado y la emulsión asfáltica previa sea retirada al levantarse el papel, evitando el traslape o exceso del material asfáltico (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).

2.2.1.4. Tiempo de rompimiento y curado

Finalmente, para que el riego de liga aporte adherencia entre las capas, es necesario que este tenga un tiempo de rompimiento y curado adecuado. Este además ayuda a disminuir el efecto de arrastre de la emulsión asfáltica en las llantas de las vagonetas (National Cooperative Highway Research Program, 2012).

Riego de liga y condiciones para iniciar el proceso de colocación la mezcla asfáltica

A nivel internacional The National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) en el 2018, realizó una encuesta a diferentes agencias del transporte de Estados Unidos y Canadá, donde se plantearon 45 preguntas relacionadas con el riego de liga. En cuanto a la condición en la que las agencias encuestadas permiten la circulación de vehículos sobre el riego de liga, más del 40 % indicaron que no permiten el tráfico sobre la superficie con el riego de liga fresco y la colocación de mezcla asfáltica, más del 15 % indicaron que se permite después de que la emulsión rompe, poco más del 10 % después de que la emulsión ha curado y más del 30 % no especificaron, la Figura 12 se muestra los resultados.

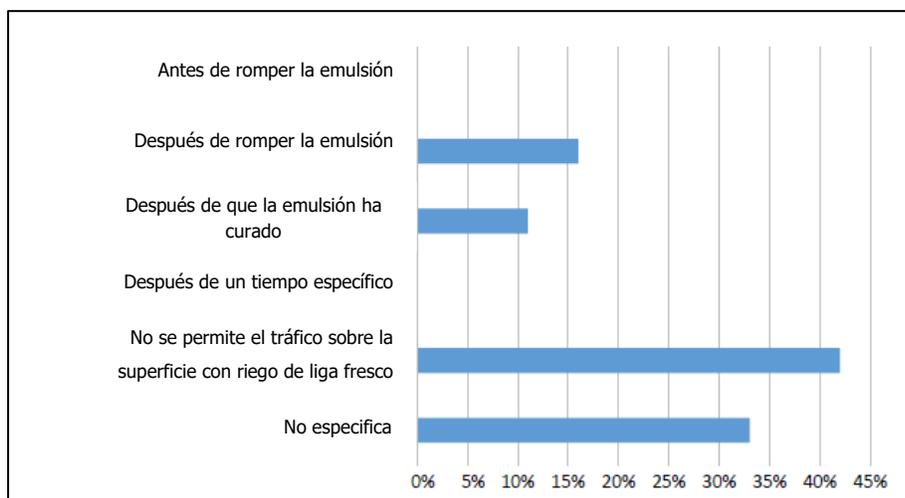


Figura 12. ¿Cuándo se permite el tráfico sobre el riego de liga?

Fuente: (NCHRP, 2018)

Modificado por: (Granados, 2021)

En la Figura 13 se resumen los resultados de preguntar por la condición en la que se permite que la pavimentadora coloque el asfalto después de aplicada la emulsión asfáltica, en esta más del 50% de las agencias indicaron que pavimentan una vez la emulsión rompe, poco más del 10 % indicó que esperan a que la emulsión cure, mientras que más del 30 % no especifica cuando la pavimentadora puede iniciar la colocación de la mezcla asfáltica.

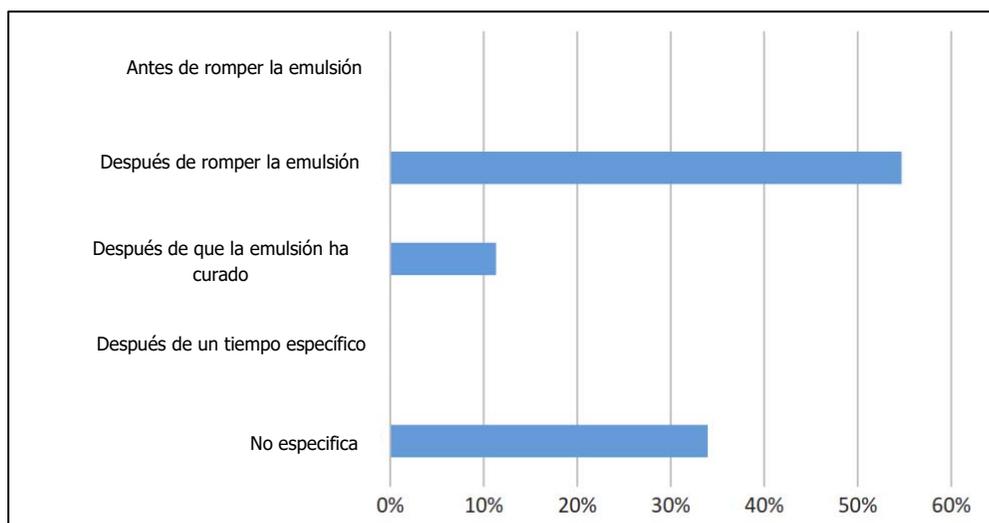


Figura 13. ¿Cuándo se permite a la pavimentadora colocar mezcla asfáltica después de colocar el riego de liga?

Fuente: (NCHRP, 2018)

Modificado por: (Granados, 2021)

En cuanto al tiempo máximo que se le da a la emulsión asfáltica para que rompa y se coloque la mezcla asfáltica, en la encuesta se define un rango de 30 minutos a 2 horas. En la cual 3 de las agencias encuestadas (alrededor del 5 %) indicaron que se da un tiempo de dos horas o menos, entre las cuales una agencia indicó que da un tiempo máximo de 30 minutos. Cerca del 20 % respondió que se debe cubrir el riego de liga en la misma jornada de trabajo. El 10 % indicó que debe cubrirse dentro de las 24 horas y una indicó que debe darse medio día. El resto respondió que no había un límite específico en cuanto al tiempo en el que la emulsión asfáltica puede quedar expuesta. Sin embargo, la mayoría de las agencias resaltan la importancia de mantener la superficie limpia para mantener la capacidad de unión entre las capas. Además, indican que, si se deja más de un día expuesta la emulsión, se debe aplicar otra capa ligera de riego de liga antes de colocar la mezcla asfáltica (NCHRP, 2018).

2.2.2. Construcción de sobrecapas asfálticas y problemas asociados a la mala aplicación del riego de liga

La construcción de sobrecapas asfálticas es una técnica muy utilizada en el país para reforzar el pavimento y dar mantenimiento a las carreteras de la Red Nacional Vial. Estas consisten en la colocación de una capa de mezcla asfáltica en caliente, sobre una capa de rodamiento existente para mejorar las condiciones superficiales del pavimento. Pueden sustituir total o parcialmente el espesor de una capa existente (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).

Como ya se mencionó, es esencial que exista una correcta adherencia entre las capas asfálticas para su buen funcionamiento, y esto se logra en gran parte por medio del riego de liga. Es por esto que la aplicación adecuada del riego de liga es un elemento fundamental en el proceso constructivo de sobrecapas de mezcla asfáltica. Tener buenas prácticas constructivas que garanticen un riego de liga uniforme, con cobertura total del área de intervención son actividades indispensables para garantizar un correcto desempeño del pavimento (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).

A nivel constructivo una pobre resistencia en la interfaz de adherencia, producto de una incorrecta aplicación del ligante asfáltico sobre la superficie existente, se verá reflejada en la posible aparición de deterioros como desplazamiento de la mezcla por deslizamiento (ver Figura 14), delaminación (pérdida de superficie del pavimento, ver Figura 15) y agrietamientos por fatiga (ver Figura 16) (National Cooperative Highway Research Program, 2012).



Figura 14. Desplazamiento de mezcla asfáltica, Ruta 712, Costa Rica.
Fuente: (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2016)



Figura 15. Delaminación por desplazamiento de la mezcla asfáltica, Ruta 712, Costa Rica.
Fuente: (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2016)



Figura 16. Agrietamientos por fatiga.

Fuente: (Sequeira, 2020)

Durante la aplicación de un riego de liga se pueden presentar diversos problemas constructivos, sin embargo, los que más se observan son la pérdida de uniformidad y cobertura en la aplicación del riego de liga sobre la superficie a intervenir, la escasez de tiempo para el rompimiento y estabilización de la emulsión, y el arrastre del ligante asfáltico en los neumáticos de las vagonetas. Estos problemas producen riegos de liga inadecuados que comprometen la adecuada adherencia entre capas que se desean ligar, según las prácticas internacionales (Guerrero, 2015).

Los riegos de liga no uniformes como los rayados (ver Figura 17), en forma de telaraña o riegos con excesos de material (ver Figura 18) y la falta de cobertura en el área complementaria de la sección de intervención, son ejemplos de cómo se puede dar una mala adherencia en entre las capas asfálticas. La presencia o ausencia del riego de liga sobre la superficie de intervención dependerá de diversos factores, como el estado y limpieza de la superficie, la uniformidad de la aplicación del riego de liga, la exposición de la superficie al tránsito, entre otros aspectos (Guerrero, 2015).



Figura 17. Riego de liga no uniforme en la totalidad de superficie a intervenir.

Fuente: (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2015)



Figura 18. Exceso de emulsión asfáltica en junta transversal con carpeta recién colocada.

Fuente: (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2015)

En Costa Rica es frecuente observar procesos constructivos de sobrecapas de mezcla asfáltica con aplicación de riegos de liga no uniformes, con coberturas parciales de la superficie por adherir, excesos de riego de ligante asfáltico en juntas, arrastre del ligante asfáltico en las llantas de vagonetas, escasez de tiempo en el rompimiento de la emulsión, entre otros problemas constructivos que inciden directamente en las propiedades de adherencia del riego de liga sobre las capas que se desean ligar (Guerrero, 2015).

2.2.2.1. *Deficiencia en la cobertura y uniformidad del riego de liga*

Diversos informes publicados por la Unidad de Auditoría Técnica (UAT) del LanammeUCR reiteran que la falta de uniformidad sobre la superficie de un riego de liga contribuye a la pérdida de resistencia por adherencia entre la capa existente y la nueva capa colocada, afectando directamente en la transmisión y disipación de los esfuerzos al pavimento, lo que se traduce en una reducción de la vida del pavimento por fatiga de la estructura y la aparición de deterioros prematuros (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2016).

Dichos informes indican que la aplicación de riegos de liga con problemas de uniformidad y cobertura se relacionan con la calibración y mantenimiento del equipo dosificador de emulsión. Se ha comprobado en el ámbito internacional que aspectos como el ajuste de altura de la barra dosificadora, tamaño ángulo y abertura de boquillas, presión de bombeo y velocidad de aplicación del camión dosificador influyen en la cobertura y uniformidad del riego aplicado (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2015).

National Cooperate Highway Research concluyó en su informe en el 2012 que una cobertura menor al 90 % de la superficie a intervenir se categoriza como una práctica constructiva inadecuada. Asimismo, indicó que:

"Una aplicación con cobertura del 50% de la superficie reduce por un factor de entre un 50 % y 70 % la interfaz de la resistencia al cortante de la estructura. Además, una cobertura del 50% en la aplicación del riego de liga resulta en un comportamiento inconsistente y no uniforme de la interfaz de adherencia entre las capas ligadas".

De acuerdo con el criterio técnico del Pitra-LanammeUCR y a las buenas prácticas de ingeniería a nivel mundial, al existir áreas sin recubrimiento de riego de liga, existe el riesgo que esos puntos queden vulnerables a deterioros prematuros, por actuar desligadas la capa asfáltica nueva del resto de la estructura (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2015).

2.2.2.2. *Excesos de riego de liga*

En la publicación del Pitra-LanemmeUCR "*Buenas prácticas constructivas en la aplicación de riego de liga para la colocación de sobrecapas asfálticas*", Guerrero indica que los derrames o concentraciones excesivas de emulsión, pueden producir alteraciones del contenido de asfalto en la mezcla lo que podría repercutir en la aparición de deterioros puntuales de la superficie de ruedo como deformaciones y exudación.

Un exceso de riego de liga puede provocar una ineficiente adherencia entre capas, y podría modificar las características de la mezcla asfáltica, por ejemplo, el contenido de asfalto, provocando problemas de exudación en la superficie (ver Figura 19) y consecuentes problemas de estabilidad de la capa colocada (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2015).



Figura 19. Exudación en superficie de rodamiento

Fuente: (Sequeira, 2020)

Acumulaciones puntuales de emulsión asfáltica, concentraciones de emulsión en franjas o incluso riego homogéneo, pero con exceso, pueden provocar problemas en el desempeño de la capa asfáltica colocada, muchas veces casi inmediatos, que pueden afectar la durabilidad esperada (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2015).

2.2.2.3. *Arrastre del riego de liga y uso de traba*

En especialmente relación con el problema de arrastre del riego de liga (ver Figura 20), el LanammeUCR en su publicación "*Aplicación de riego de liga, Guía para Inspectores*" indica que este es ocasionado en el área de trabajo por el tránsito de las llantas de las vagonetas para descargar la mezcla asfáltica a la pavimentadora o por el tránsito de vehículos, generando la pérdida del asfalto residual en la superficie donde fue aplicado el riego y comprometiendo la adherencia en la sección sin cobertura del material asfáltico. Este es un problema constructivo es común en los frentes de colocación de sobrecapas asfálticas cuando no se cuenta con dispositivos de transferencia de mezcla asfáltica hacia la pavimentadora o cuando no se cuenta con un adecuado control de tránsito en obra (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).



Figura 20. Arrastre de riego de liga debido al tránsito de vehículos sobre la emulsión

Fuente: (Asphalt Institute, 2014)

El arrastre del riego de liga se puede dar por factores como: el tipo de emulsión asfáltica, suciedad y humedad en el área de intervención, falta de tiempo para que se dé un rompimiento adecuado, maniobras excesivas de vagonetas en el área e intervención, entrada de vagonetas sucias al riego de liga (Guerrero, Herra, Salas, Sequeira, & Loría, 2019).

La importancia de mitigar este problema constructivo radica en que el arrastre del ligante asfáltico se genera usualmente en las huellas de las vagonetas, el cual corresponde al sitio crítico donde se necesita la mayor adherencia para la transmisión de las cargas de tránsito y la disipación de esfuerzos a la estructura del pavimento (Guerrero, 2015).

Las áreas donde se haya presentado este problema en forma excesiva deben ser corregidas aplicando nuevamente el riego de liga en las zonas donde se haya perdido. Se debe tener el cuidado de no adicionar más emulsión a las áreas contiguas al problema ya que podrían generar variaciones en el contenido de asfalto de la mezcla asfáltica a colocar (Guerrero, 2015).

Ligado al problema de arrastre de riego de liga, otra de las malas prácticas constructivas que pueden afectar la adherencia de las capas de mezcla asfáltica, es el uso de traba. La cual se define como una porción de mezcla asfáltica extendida manualmente en espesores pequeños antes de la colocación con pavimentadora. Esta es utilizada por los encargados en sitio para evitar que la emulsión asfáltica se despreque de la superficie sobre la que se colocará la mezcla asfáltica en caliente una vez que la vagoneta de suministro de mezcla asfáltica rueda sobre ella (Salas M. , Guerrero, Rodríguez, Sequeira, & Loría, 2015).

Sin embargo, la UAT del LanammeUCR ha indicado en diversos informes (LM-PI-AT-109-16, LM-PI-AT-140-15 y LM-PI-AT-64-15) lo siguiente con respecto al uso de traba:

- En colocación de capas de MAC con pavimentadora, no se comprende la necesidad de lanzar y extender mezcla (traba) en toda la superficie a pavimentar a pesar de que la emulsión asfáltica solo se despegaría bajo la huella de la vagoneta.
- Una amplia lista de informes de la Unidad de Auditoría Técnica ha evidenciado que, a pesar del uso de traba, hay sectores de la emulsión que se despegan, es decir se eliminan de la superficie, debido a otras razones como superficies que no fueron barridas adecuadamente.
- La colocación de traba es inadecuada ya que esta consiste en una primera capa delgada de Mezcla asfáltica que será imposible compactar eficientemente debido a su espesor y a la segregación térmica que se produce al extenderla, obteniendo una baja en la temperatura de forma acelerada. A pesar de esto, es una cantidad de mezcla asfáltica considerable que se paga como parte del volumen total de material colocado y compactado para bacheo o para capa superficial, siendo una práctica que podría excluirse, mejorando la calidad de la obra construida.
- Asimismo, cuando la mezcla asfáltica no puede compactarse adecuadamente, se convierte en un plano de falla entre la mezcla asfáltica que se coloca encima (espesor 2) y la capa inferior (la base o la capa subyacente) (ver Figura 21), lo que pone en riesgo la durabilidad de la intervención realizada.



Figura 21. Esquema acerca de la colocación de mezcla asfáltica como "traba" (espesor 1)

Fuente: (Unidad de Auditoría Técnica, Pitra-LanammeUCR, 2015)

- La colocación de traba no es en sí una actividad aceptada y practicada a nivel internacional en el mantenimiento de carreteras. Tampoco constituye parte de

procedimientos de trabajos con mezcla asfáltica de la forma en que se ha extendido en Costa Rica.

- Es por lo antes mencionado que el uso de traba no es adecuado, ni favorece la calidad de los trabajos de colocación de mezcla asfáltica en la actividad de conservación vial.

Con el objetivo de reducir el arrastre de riego de liga y a su vez el uso de traba, se recomienda brindar el tiempo suficiente para que la emulsión rompa totalmente. Esto ayudará a que la adherencia del material a las ruedas de la vagoneta sea potencialmente menor, debido a la pérdida de agua en la emulsión. También en el mercado internacional se utilizan emulsiones especiales para eliminar la adherencia del ligante a las llantas de las vagonetas denominadas trackless tack coat, las cuales tienen tiempos de rompimiento total de entre 5 y 15 minutos lo que agiliza el proceso de colocación de las mezclas asfálticas. Otra alternativa que es utilizada en Europa y en algunos estados de Estados Unidos es el empleo de pavimentadoras con barras dosificadoras de emulsión incorporadas. Este equipo permite realizar el riego de liga sin la necesidad que las vagonetas tengan que transitar sobre el área de intervención, eliminando el problema de arrastre del riego de liga (Guerrero, 2015).

En la encuesta realizada por la NCHRP (2018), en cuanto al arrastre de riego de liga, el 60 % de las agencias encuestadas indicaron que el arrastre de emulsión sigue siendo un problema importante. Entre los métodos para minimizar dicho problema, las agencias indicaron en sus respuestas: dejar que la emulsión rompa, la utilización de materiales que reduzcan el arrastre, en "otros métodos" incluyeron: no permitir el tráfico en el área con emulsión, usar pavimentadoras por aspersión y volver a colocar el riego de liga de ser necesario. Las demás respuestas dadas por las agencias de Estados Unidos y Canadá, se muestran en la Figura 22 y la Figura 23 respectivamente.

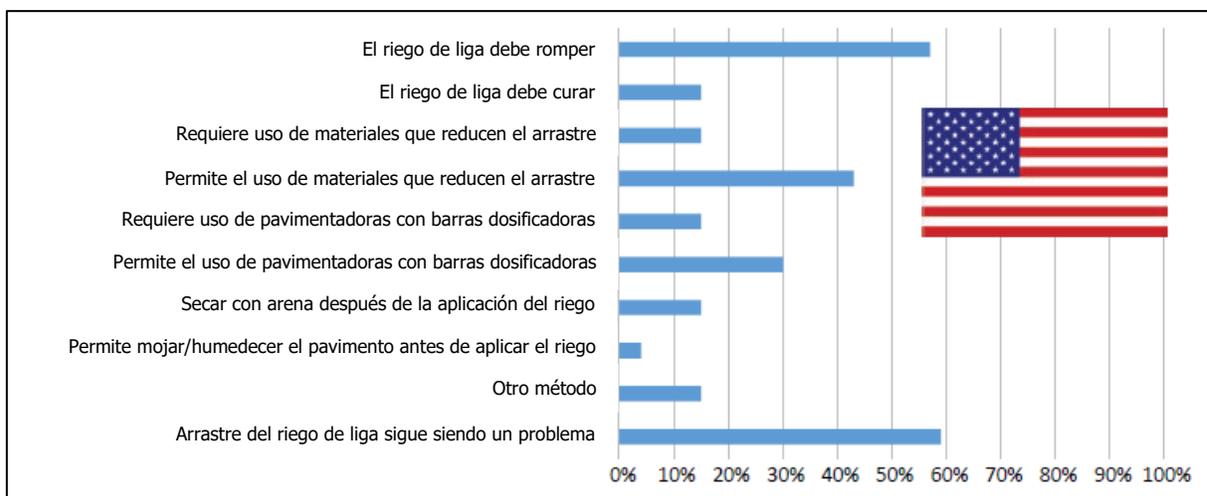


Figura 22. Respuestas de Estados Unidos: métodos para minimizar el arrastre de riego de liga

Fuente: (NCHRP, 2018)

Modificado por: (Granados, 2021)

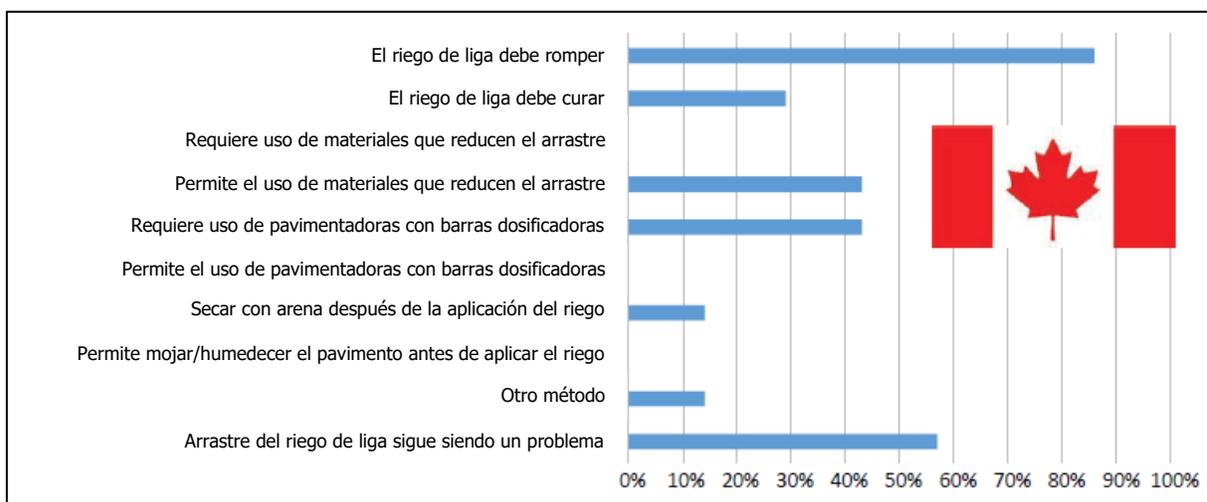


Figura 23. Respuestas de Canadá: métodos para minimizar el arrastre de riego de liga

Fuente: (NCHRP, 2018)

Modificado por: (Granados, 2021)

2.3. Norma "ASTM D711, Método de ensayo para el tiempo de no levantamiento de una pintura para demarcación vial horizontal"

Como ya se mencionó anteriormente se utilizó como base la norma ASTM D711 y se modificó para adaptarla a la realización de la investigación. A continuación, se detalla el propósito y los requerimientos del método sin alteraciones.

Este método cubre el procedimiento de laboratorio para determinar el tiempo de no-levantamiento de una pintura de tráfico. Se usa un cilindro metálico con anillos de hule de diámetro transversal de 9,5 mm (3/8 in). El cilindro se dejar rodar en una rampa de dimensiones especificadas, sobre una película de pintura de tráfico recientemente aplicada, realizando repeticiones del mismo procedimiento a intervalos de tiempo regulares, hasta que no haya más transferencia de la pintura a los anillos de hule. El tiempo transcurrido para que ya no se de transferencia de pintura, a partir del momento en que se aplica la capa de pintura, es el tiempo de no-levantamiento (American Society for Testing and Materials, 2015).

En la Figura 24 se muestra el equipo utilizado para el ensayo, el cual consiste en un cilindro metálico con anillos de hule reemplazables, cuyo peso total incluyendo los anillos, es de 5386 g \pm 28 g (11 lb 14 oz \pm 1 oz), lo que equivale a una presión de los neumáticos de 100 libras por pulgada cuadrada en el pavimento. Los anillos deben ser de hule sintético o de un material similar, las dimensiones de los anillos son: 104 mm (4 1/8 in) de diámetro externo y 85 mm (3 3/8 in) de diámetro interno, además los anillos deberán mantener su flexibilidad indefinidamente. La rampa rodante está hecha de aluminio con una pendiente de 1:6 y mide 6 in de largo, 3 1/2 in de ancho y 1 in de alto en el extremo superior ranurado (American Society for Testing and Materials, 2015).

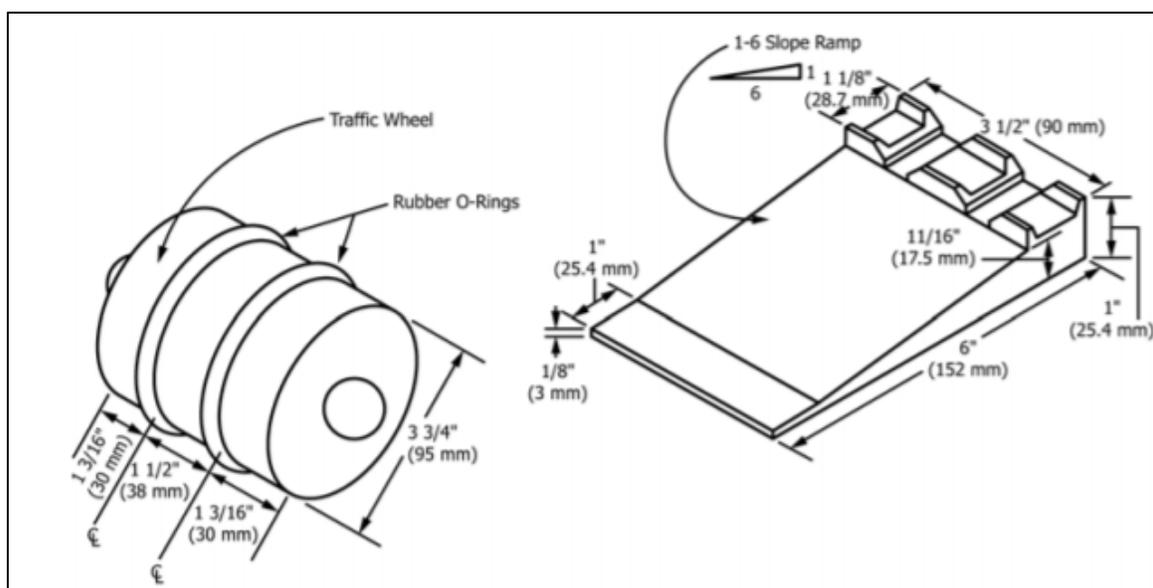


Figura 24. Equipo utilizado en el ensayo ASTM D711.

Fuente: (American Society for Testing and Materials, 2015)

El ensayo se realiza en un laboratorio, donde las variables claves a ser controladas durante el procedimiento son: el espesor de la película de pintura, la temperatura, la humedad y el flujo de aire. Si no son controlados con cuidado, estos factores pueden tener un efecto importante sobre el tiempo de secado. Cuando la película es muy delgada, la temperatura es alta o la humedad relativa es baja, los tiempos de no levantamiento disminuyen. Además, aunque el flujo de aire no se especifique, también tiene un efecto significativo en el tiempo de secado, por lo que, con el fin de minimizar sus efectos, se debe seleccionar adecuadamente la ubicación dentro del laboratorio donde se va a realizar la prueba, para que esté libre de corrientes de aire (American Society for Testing and Materials, 2015).

En cuanto a las especificaciones del ensayo, se requiere una película húmeda de $0,38 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ($15 \pm 0,5 \text{ mils}$), temperatura de $23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ ($73,5 \pm 3,5 \text{ °F}$) y humedad relativa de $50 \% \pm 5 \%$. Si el espesor de la película húmeda, la temperatura y la humedad son controlados dentro de las tolerancias especificadas, el ensayo se puede utilizar para la prueba relativa de pinturas de tráfico para aplicaciones en campo (American Society for Testing and Materials, 2015).

Aunque es difícil obtener una correlación directa entre los resultados del ensayo y la aplicación en campo, debido a la cantidad de variables que no se pueden controlar en campo como: la temperatura, el espesor de la película, la humedad la velocidad del viento, el tipo y características del pavimento y la presencia o ausencia de luz solar, el desempeño relativo en campo puede ser pronosticado si se aplica el protocolo de este ensayo (American Society for Testing and Materials, 2015).

2.4. Test de Grubbs para determinar valores atípicos

Un dato atípico (outliers) es observación extrema en cualquier dirección, que parece desviarse marcadamente en valor de otros miembros de la muestra en la que aparece (American Society for Testing and Materials, 2016).

Según la ASTM E178 (2016) al tratar con un valor atípico, se debe considerar lo siguiente:

- Los outliers puede ser el resultado de una gran desviación del procedimiento experimental prescrito o un error al calcular o registrar el valor numérico. Cuando el experimentador es claramente consciente de que se ha producido una desviación del procedimiento experimental prescrito, la observación resultante debe descartarse, esté

de acuerdo o no con el resto de los datos y sin recurrir a pruebas estadísticas para valores atípicos. Si se dispone de un procedimiento de corrección confiable, la observación a veces puede corregirse y retenerse.

- Un valor atípico podría ser simplemente una manifestación extrema de la variabilidad aleatoria inherente a los datos. Si esto es cierto, el valor debe retenerse y procesarse de la misma manera que las otras observaciones de la muestra. La transformación de datos o el uso de métodos de análisis de datos diseñados para una distribución no normal pueden ser apropiados.
- En muchos casos, la evidencia de la desviación del procedimiento prescrito consistirá principalmente en el valor discordante en sí. En tales casos, es aconsejable adoptar una actitud cautelosa. Existen criterios que permitirán ayudar a tomar una decisión clara.
- Cuando el experimentador no puede identificar condiciones anormales, debe indicar los valores discordantes y en qué medida se han utilizado en el análisis de los datos.

La determinación de valores atípicos se puede basar en dos razones (American Society for Testing and Materials, 2016):

Razón física conocida o descubierta de la ocurrencia de los valores atípicos

- La norma indica que se deben rechazar la o las observaciones y realizar observaciones adicionales de ser posible.
- Pueden también encontrarse observaciones correctas por motivos físicos

Razón física desconocida, utilizar una prueba estadística

- Rechazar la o las observaciones y realizar nuevas observaciones adicionales.
- Corregir el valor atípico para mejorar el ajuste a una distribución normal.
- Utilizar una estimación adecuada para distribuciones no normales.
- Separar los outliers para su posterior estudio.

2.4.1. Criterios estadísticos para determinar valores atípicos

Al probar valores atípicos, se calcula el valor numérico de la prueba estadística para la observación dudosa, el cual posteriormente se compara con un valor crítico para determinar si la observación dudosa debe retenerse o debe ser rechazada. El valor crítico es el valor del criterio que sería excedido por casualidad con alguna probabilidad (pequeña) por alguna observación. La pequeña probabilidad especificada se denomina "nivel de significancia" y se

puede considerar como el riesgo de rechazar erróneamente una buena observación. Si un cambio real en el valor de una observación surge de causas no aleatorias (error humano, pérdida de calibración del instrumento, cambio de instrumento de medición o incluso cambio de tiempo de las mediciones, etc.), entonces el valor observado excederá el "valor crítico". Las tablas de valores críticos generalmente se dan para varios niveles de significancia diferentes. En particular se utilizan niveles de significancia 10, 5 y 1%. Las tablas de valores críticos generalmente se dan para varios niveles de significancia (American Society for Testing and Materials, 2016).

2.4.2. Test de Grubbs

Según la norma ASTM E178 (2016), el test de Grubbs utiliza una estadística de prueba, T , que es la diferencia entre el valor dudoso y el promedio de la muestra, dividida por la desviación estándar de la muestra. La prueba indica que, ordenando los datos en orden de magnitud creciente, el posible valor dudoso será el valor más grande X_n o/y el valor más pequeño X_1 , por ser los valores que más se alejan. Por medio de la Ecuación 1 y la Ecuación 2, se prueba el criterio, los cuales posteriormente se comparan con los valores críticos de Grubbs, los cuales se muestran en el Cuadro A. 1, de los anexos.

$$\text{Para el valor mayor:} \quad T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Para el valor menor:} \quad T_n = \frac{\bar{x} - x_1}{s} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

T_n : es el valor para la observación dudosa

\bar{x} : es el promedio de todos los datos en estudio

x_n y x_1 : son las observaciones dudosas

s : es la desviación estándar del conjunto de observaciones

Por lo tanto, el test indica que una observación es atípica cuando el valor calculado T_n es mayor que el valor crítico según la cantidad de datos de la muestra.

3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.1. Mezcla asfáltica

3.1.1. Información general

- Tamaño máximo nominal de 12,5 mm.
- Mezcla hecha en la planta de mezcla asfáltica ubicada en plantel de Constructora Herrera en Muelle, San Carlos.
- Tipo de mezcla: Mezcla asfáltica en caliente fabricada en planta, Tipo MAC.
- Cuartilla TNM 19,1 mm.
- Quinta TMN 12,5 mm.
- Polvo de piedra TMN 4,75 mm.
- Asfalto AC 30.

3.1.2. Agregados

Los agregados provienen de Tiburcia, Javillos, Quebrador Muelle de San Carlos. En el Cuadro 4 y Figura 25 se muestra la granulometría de diseño con los porcentajes pasando en cada malla para la mezcla de agregados; y en el Cuadro 5 se muestra la graduación promedio de cada apilamiento de agregados.

Cuadro 4. Granulometría de diseño

Muestreo	Resultado	Especificación diseño	Especificación MN 01-2001
Proporción	100%		
25,4 mm (1")	100	100	100
19,1 mm (3/4")	100	100-100	100-100 (±)
12,7 mm (1/2")	94	90-99	90-100 (±5)
9,5 mm (3/8")	81	76-86	70-90 (±5)
4,75 mm (N°4)	47	45-51	45-65 (±4)
2,36 mm (N°8)	34	30-38	28-39 (±4)
1,18 mm (N°16)	25	21-26	16-26 (±4)
0,600 mm (N°30)	18	14-19	9-19 (±4)
0,300 mm (N°50)	13	9-16	5-16 (±4)
0,75 mm (N°200)	5,7	3,7-7,7	2-8 (±2)

Fuente: (OJM Consultores de Calidad y Laboratorios, 2018)

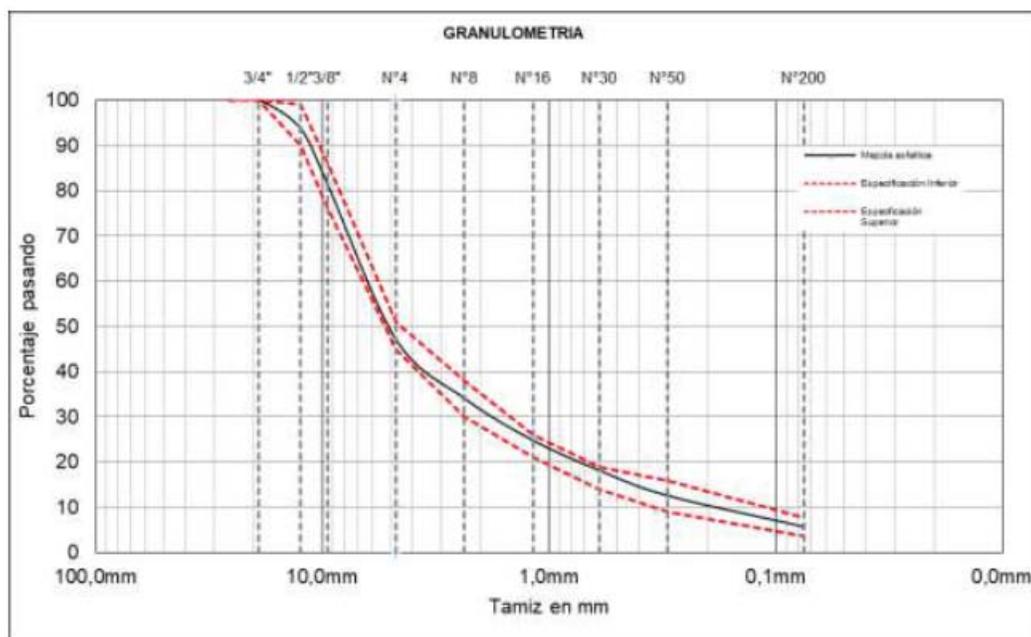


Figura 25. Granulometría de diseño

Fuente: (OJM Consultores de Calidad y Laboratorios, 2018)

Cuadro 5. Graduación promedio de cada apilamiento de agregados

-	Cuarta	Quinta gruesa	Polvo	Resultado
Proporción	3%	46%	51%	100%
25,4 mm (1")	100	100	100	100
19,1 mm (3/4")	100	100	100	100
12,7 mm (1/2")	19	92	100	94
9,5 mm (3/8")	4	66	100	81
4,75 mm (N°4)	1	6	87	47
2,36 mm (N°8)	1	2	65	34
1,18 mm (N°16)	1	2	47	25
0,600 mm (N°30)	1	2	34	18
0,300 mm (N°50)	1	2	23	13
0,75 mm (N°200)	0,5	0,9	10,4	5,7

Fuente: (OJM Consultores de Calidad y Laboratorios, 2018)

3.1.2.1. *Propiedades físico-mecánicas de los agregados*

Cuadro 6. Fracción grueso

Ensayo	Designación	Especificación	Resultado
Sanidad (Solución Sulfato de sodio)	AASHTO T-104	15 % máx	2,7 %
Índice de durabilidad	AASHTO T-210	35% mín	81 %
Abrasión de gruesos	AASHTO T-96	40% máx	31,8 %
Caras fracturadas	ASTM D 5821	95/90 % mín	100/98%
Residuos insolubles	ASTM D 3042	25% mín	99,5 %
Partículas planas y elongadas	ASTM D 4791	10% máx	0,0 %
Contenido de arcilla (partículas friables)	AASHTO T-112	2% máx	0,02 %

Fuente: (OJM Consultores de Calidad y Laboratorios, 2018)

Cuadro 7. Fracción fino

Ensayo	Designación AASHTO	Especificación	Resultado
Índice de plasticidad	T-90	-	NP
Abrasión de finos "Tipo D"	T-96	40% máx	28,6 %
Equivalente de arena	T-178	50% mín	68,1 %
Sanidad luego de 5 ciclos (sulfato de sodio)	T-104	15% máx	6,6 %
Índice de durabilidad	T-210	35% mín	74 %

Fuente: (OJM Consultores de Calidad y Laboratorios, 2018)

Cuadro 8. Resultados de los ensayos de gravedad específica y porcentaje de absorción de cada agregado utilizado en el diseño

-	Cuartilla	Intermedio	Polvo	Combinada
GBS Grueso	2,687	2,675	2,631	2,653
ABS	1,72	1,84	2,23	2,03

Fuente: (OJM Consultores de Calidad y Laboratorios, 2018)

3.1.3. *Ligante*

Con base en el estudio de los valores obtenidos, curvas Marshall y criterios de diseño establecidos a nivel nacional, se definió un valor óptimo de ligante sobre el agregado de 6,04 % (5,70 sobre la mezcla), aplicando el criterio de cumplimiento de las propiedades

volumétricas. Con este porcentaje óptimo se tienen las características de la fórmula de trabajo de la mezcla, la cual cumple con las especificaciones propuestas (OJM Consultores de Calidad y Laboratorios, 2018).

Cuadro 9. Parámetros de la mezcla con el óptimo de asfalto

Parámetro	Especificación	Rango de trabajo		
Contenido de asfalto sobre mezcla	%	5,20	5,70	6,20
GBS Pastillas	-	2,384	2,392	2,395
GEMT	-	2,512	2,491	2,470
Vacíos de aire	3,0 % - 5,0 %	5,1	4,0	3,0
VMA	14 % mínimo	14,82	14,99	15,31
VFA (ESALs < 0,3X10 ⁶)	70 % - 80 %	65,5	73,2	80,1
VFA (0,3X10 ⁶ < ESALs < 3X10 ⁶)	65 % - 78 %			
VFA (0,3X10 ⁶ < ESALs)	65 % - 75 %			
Razón polvo / asfalto	0,6 - 1,3	1,36	1,20	1,07
Estabilidad	800 kg mínimo	1064	1027	984
Flujo	20-35 cm/100	32	34	35
% Asfalto efectivo	%	4,22	4,78	5,35

Fuente: (OJM Consultores de Calidad y Laboratorios, 2018)

3.2. Emulsión asfáltica

Para la investigación se utilizó una emulsión asfáltica del tipo CRS-1, catiónica de rompimiento rápido de baja viscosidad, la cual fue donada por RECOPE. El muestreo fue realizado por personal del LanammeUCR en las instalaciones de RECOPE, el día 19 de febrero del 2021, siguiendo la Norma INTE C323 y C12. En el Cuadro 10 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados para la caracterización de la emulsión asfáltica, elaborados en los laboratorios del LanammeUCR, con referencia M-0209-2021. De dichos ensayos se tuvo especial interés en el ensayo de contenido de asfalto residual, el cual es necesario para cuantificar la cantidad de asfalto presente en la emulsión evaluada y de esta manera también poder utilizar este dato para el análisis de datos generados en la investigación.

Cuadro 10. Resultados de los ensayos para caracterizar la emulsión asfáltica

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades	Especific.
	AASHTO	ASTM			
Viscosidad Saybol Furol a 50 °C	T 72	D 88	40,66 ± 1,10	sFs	20 - 100
Prueba de malla No20	T 59	D 244	0,01 ± 0,01	%	max 0,1
Estabilidad al almacenamiento a 24 h	T 59	D 244	0,55 ± 0,08	%	max 1
Asfalto residual	T 59	D 6997	62,00 ± 0,77	%	mín 60
Destilado	T 59	D 6997	37,63 ± 0,77	%	max 3,0
Fase acuosa	T 59	D 6997	37,38 ± 0,76	%	
Fase orgánica	T 59	D 6997	0,25 ± 0,76	%	
Penetración (asfalto residual) a 25 °C	T 49	D 5	175,42 ± 0,42	1/10mm	100 - 250
Ductilidad (asfalto residual) a 25 °C	T 51	D 113	73,77 ± 2,02	cm	min 40
Solubilidad en tricloroetileno (asfalto residual)	T 44	D 2042	99,89 ± 0,01	%	mín 97,5
Insolubilidad en tricloroetileno (asfalto residual)	T 44	D 2042	0,11 ± 0,01	%	mín 97,5
Carga de partícula de emulsiones asfálticas	T 59	D 244	Catiónica	Tipo de carga	Catiónica
Demulsibilidad a 25 °C	-	D 6936	62,74 ± 0,95	%	mín 40
Densidad 25 °C	-	D 6937	1009,21 ± 0,05	g/L	

Fuente: (LanammeUCR, 2021)

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Aplicación del ensayo sobre mezcla asfáltica

4.1.1. *Proceso realizado para la ejecución del ensayo*

A continuación, se detalla el procedimiento realizado para la aplicación del ensayo:

- Se inicia cada ensayo calculando el área en metros, del espécimen, sobre la cual se aplica emulsión asfáltica, por medio de la siguiente ecuación:

$$A = b * a \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

A: área de aplicación de la emulsión

b: base

a: ancho

- Con el área, la tasa de aplicación de emulsión (0,5 L/m²) y la densidad de la emulsión asfáltica (1,009 kg/L), se obtiene la masa en gramos de emulsión asfáltica que se debe colocar a cada bloque.

$$\text{Gramos de emulsión asfáltica} = 0,5 * 1009 * A \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

A: área de aplicación de la emulsión

Es importante recalcar que la emulsión asfáltica utilizada en la etapa experimental, se ajusta a los parámetros de calidad establecidos para el material.

- Seguidamente, se toma la masa de cada espécimen y se anota en la bitácora.
- Posteriormente se procede a aplicar la emulsión de forma uniforme con una brocha, como se muestra en la Figura 26.

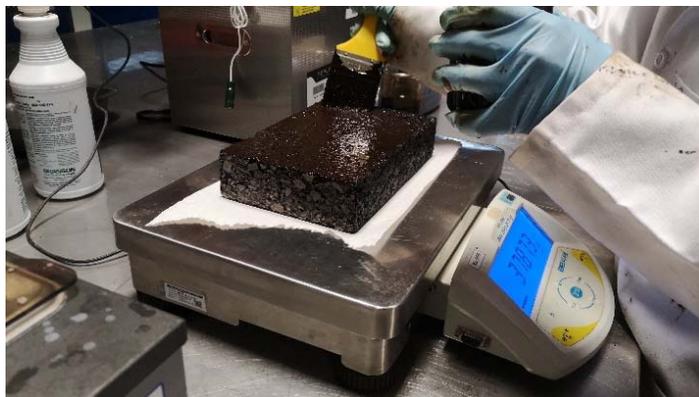


Figura 26. Aplicación de la emulsión asfáltica sobre el bloque de mezcla

- Una vez cubierta el área de aplicación, se da inicio al cronómetro, se hace rodar inmediatamente el rodillo sobre dicha superficie y se toma la masa del bloque.
- Se procede a limpiar los anillos del rodillo con mecha y queroseno.
- Una vez transcurridos cinco minutos se vuelve a deslizar el rodillo sobre una parte distinta del bloque, donde no se haya existido contacto entre la emulsión asfáltica y los anillos del rodillo, se toma la masa del bloque, se fotografía el proceso y se procede a limpiar los anillos nuevamente.
- Dicho procedimiento se repite para los demás tiempos (10, 20 y 30 minutos) y para cada bloque de mezcla asfáltica.
- Finalmente se registran todos los datos en una hoja de cálculo para el análisis cuantitativo y cualitativo.

4.2. Resultados cualitativos de la aplicación del ensayo

El siguiente apartado contiene un registro fotográfico de la aplicación del ensayo, el mismo tiene como fin evidenciar, respaldar y exponer fenómenos que no pudieron explicarse de manera cuantitativa, tal como se detalló en la metodología; además este brinda un mejor panorama que permite conocer y entender más fácilmente los resultados de la investigación.

En las siguientes fotografías se muestra el proceso del rompimiento de la emulsión asfáltica y el arrastre de la misma sobre los anillos del rodillo al ir transcurriendo el tiempo de estudio (30 minutos). A continuación, se evidencia el proceso para los especímenes 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11 y 12.

Registro del proceso de ensayo del espécimen 3, para los cinco tiempos evaluados.



Figura 27. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 al minuto 0

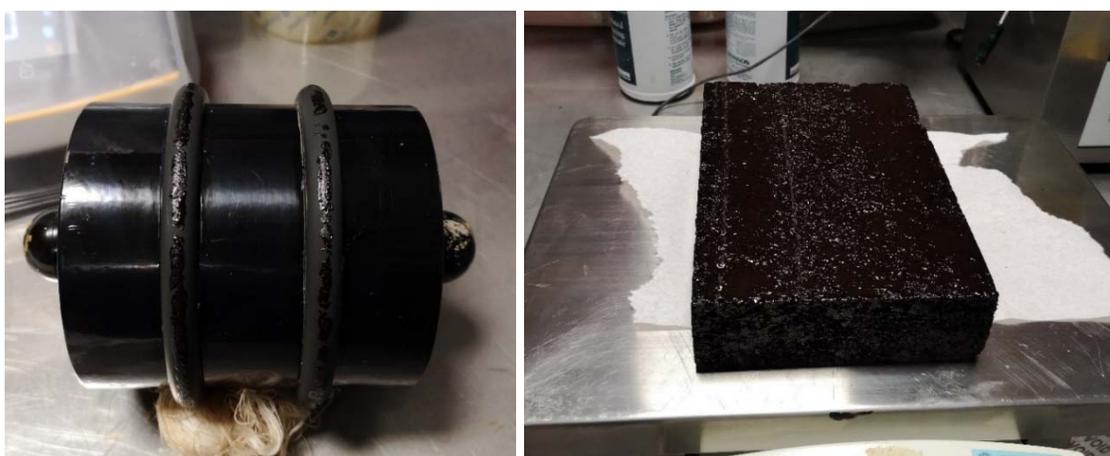


Figura 28. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 a los 5 minutos



Figura 29. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 a los 10 minutos



Figura 30. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 a los 20 minutos



Figura 31. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 3 a los 30 minutos

Registro del proceso de ensayo del espécimen 4, para los cinco tiempos evaluados.



Figura 32. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 al minuto 0

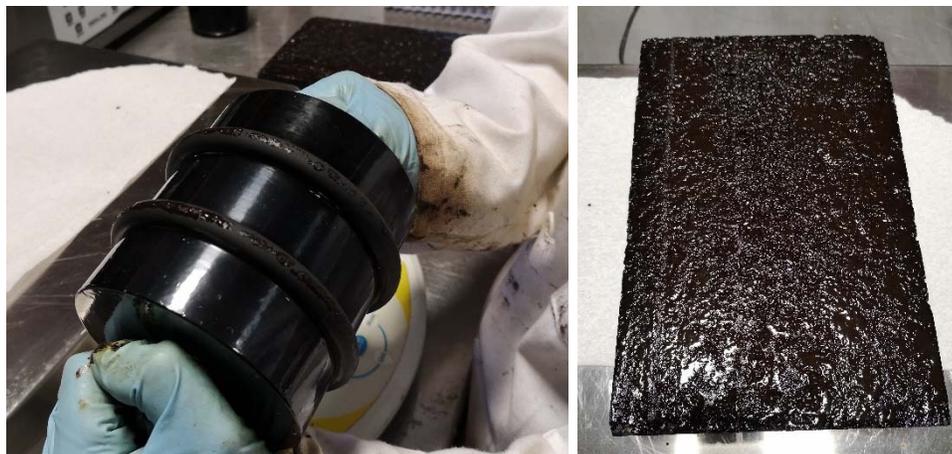


Figura 33. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 a los 5 minutos



Figura 34. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 a los 10 minutos



Figura 35. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 a los 20 minutos



Figura 36. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 4 a los 30 minutos

Registro del proceso de ensayo del espécimen 6, para los cinco tiempos evaluados.



Figura 37. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 al minuto 0

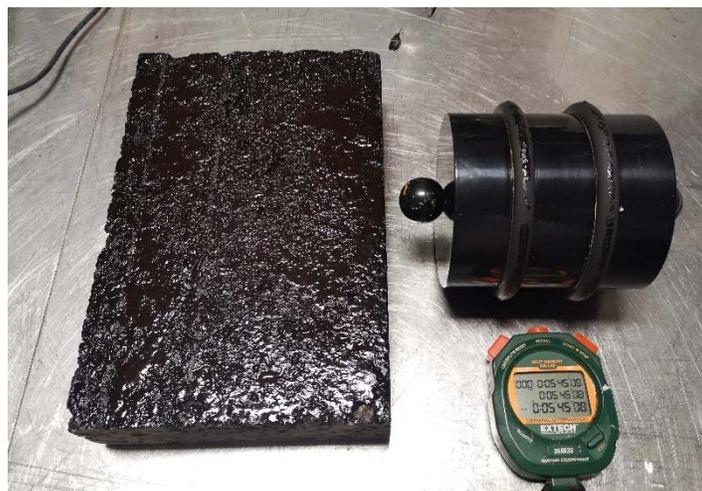


Figura 38. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 a los 5 minutos



Figura 39. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 a los 10 minutos



Figura 40. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 a los 20 minutos

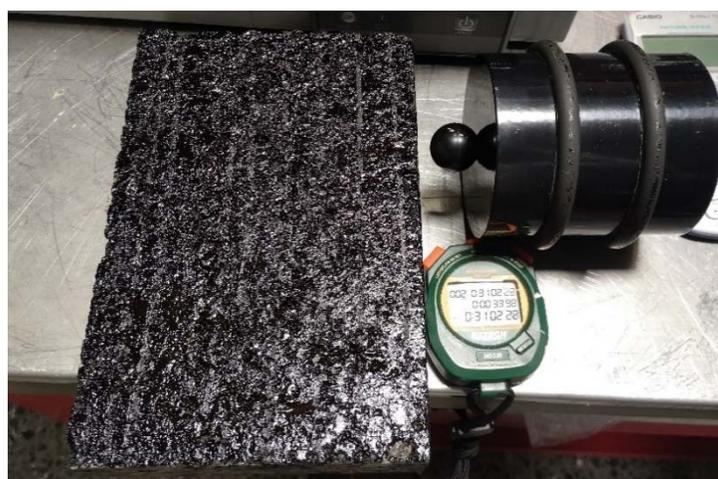


Figura 41. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 6 a los 30 minutos

Registro del proceso de ensayo del espécimen 7, para los cinco tiempos evaluados.



Figura 42. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 al minuto 0



Figura 43. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 a los 5 minutos

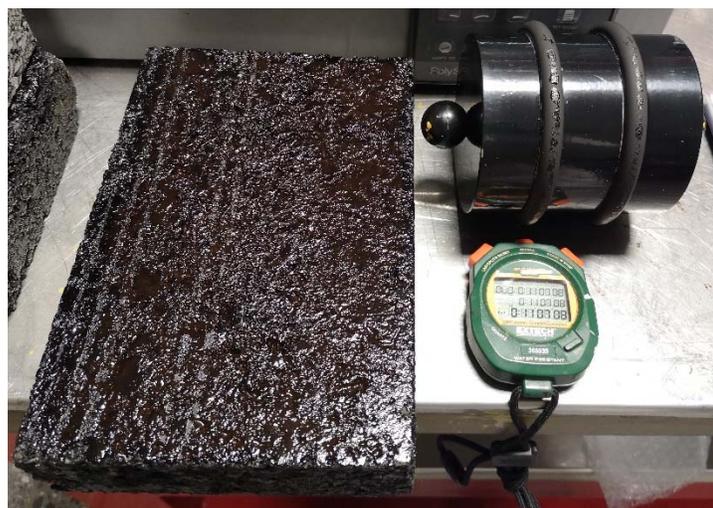


Figura 44. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 a los 10 minutos

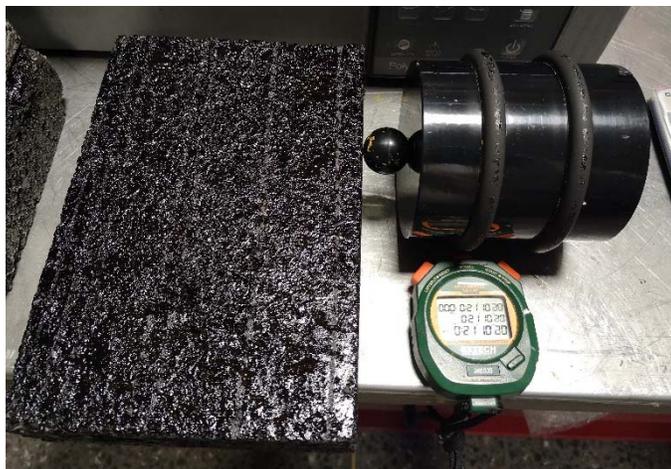


Figura 45. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 a los 20 minutos

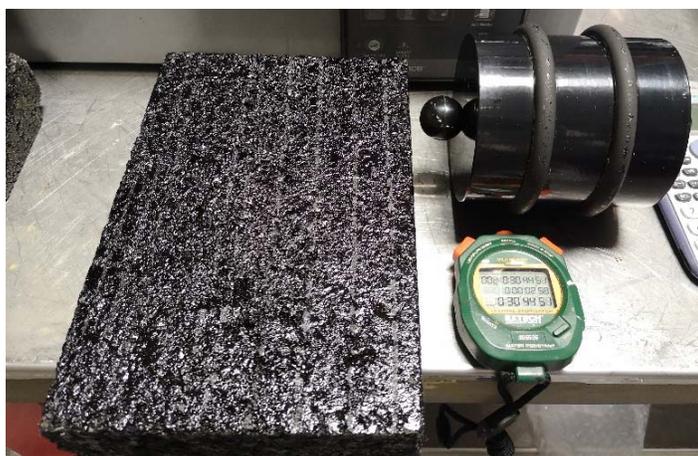


Figura 46. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 7 a los 30 minutos

Registro del proceso de ensayo del espécimen 8, para los cinco tiempos evaluados.



Figura 47. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 al minuto 0

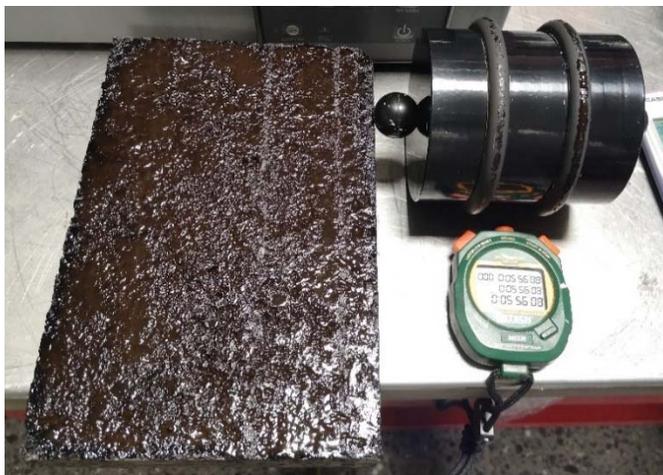


Figura 48. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 a los 5 minutos



Figura 49. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 a los 10 minutos



Figura 50. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 a los 20 minutos

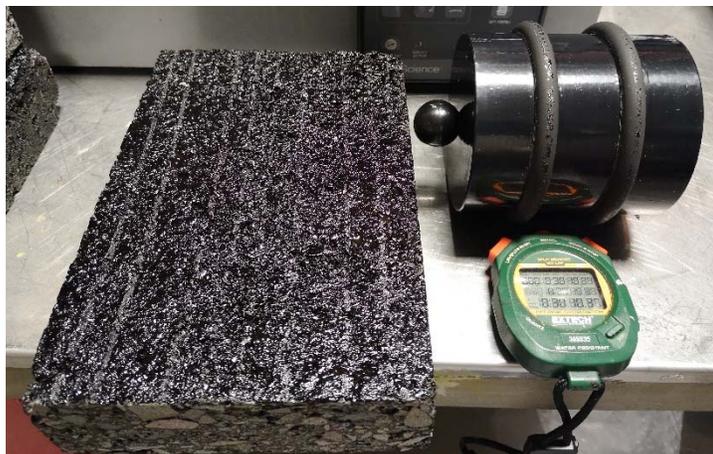


Figura 51. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 8 a los 30 minutos

Registro del proceso de ensayo del espécimen 10, para los cinco tiempos evaluados.



Figura 52. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 al minuto 0



Figura 53. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 a los 5 minutos



Figura 54. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 a los 10 minutos



Figura 55. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 a los 20 minutos



Figura 56. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 10 a los 30 minutos

Registro del proceso de ensayo del espécimen 11, para los cinco tiempos evaluados.

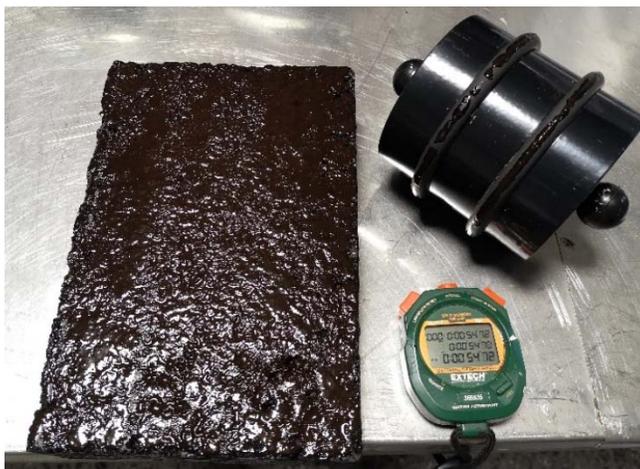


Figura 57. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 al minuto 0



Figura 58. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 a los 5 minutos



Figura 59. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 a los 10 minutos

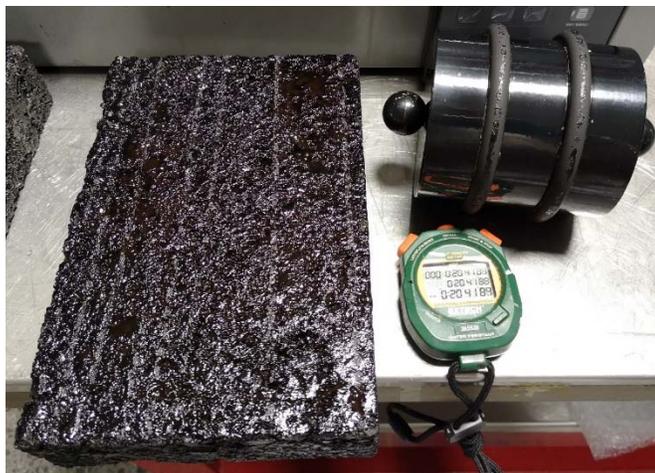


Figura 60. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 a los 20 minutos



Figura 61. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 11 a los 30 minutos

Registro del proceso de ensayo del espécimen 12, para los cinco tiempos evaluados.



Figura 62. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 al minuto 0

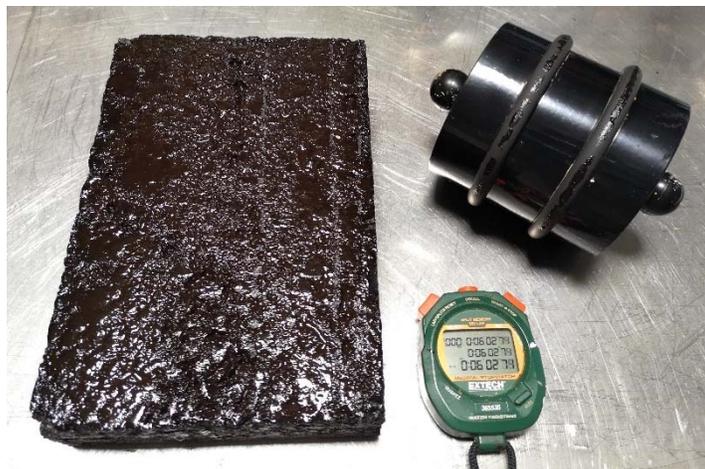


Figura 63. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 a los 5 minutos



Figura 64. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 a los 10 minutos

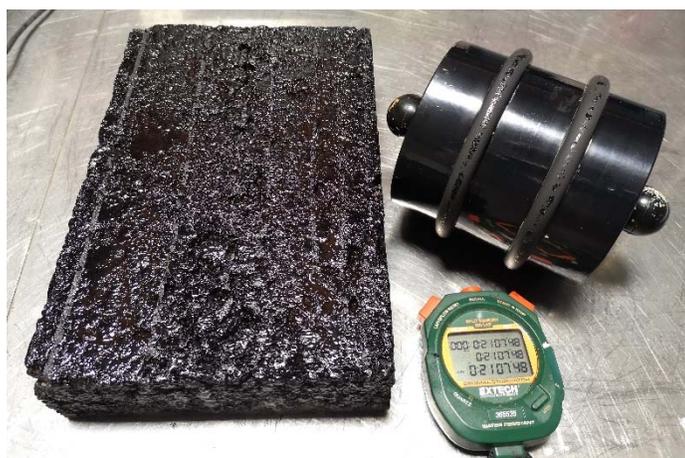


Figura 65. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 a los 20 minutos

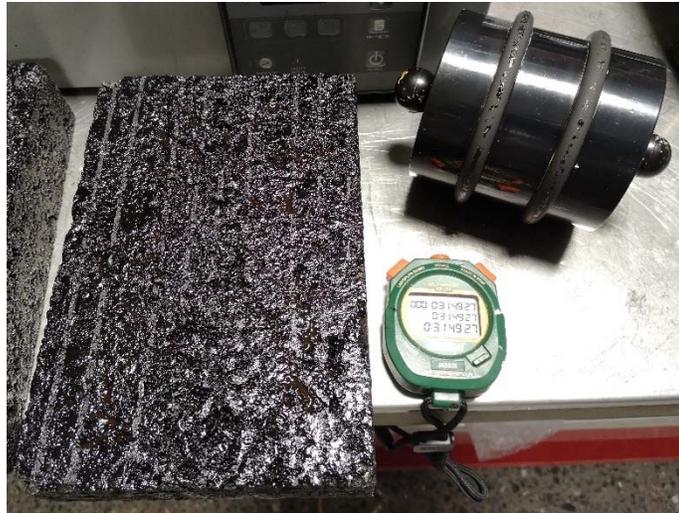


Figura 66. Rompimiento y arrastre de la emulsión del bloque número 12 a los 30 minutos

4.3. Resultados cuantitativos de la aplicación del ensayo

A continuación, se muestran los datos obtenidos en la aplicación del ensayo a diferentes tiempos.

Cuadro 11. Resultados obtenidos de la aplicación del ensayo para cada espécimen

	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12
Masa del bloque (g)	3716,3	3718,4	3694,1	3728,4	3809,3	3812,6	3810,6	3756,8	3770,7	3771,3	3767,4	3857,7
Masa de emulsión teórica (g)	16,6	16,8	17,1	16,9	16,7	16,7	16,5	16,6	16,6	16,7	16,8	16,6
Masa de emulsión colocada (g)	16,5	16,8	16,8	17,4	16,6	16,6	16,5	16,4	16,4	16,8	16,7	16,6
Bloque + Emulsión (g) (colocado)	3732,8	3735,2	3710,9	3745,8	3825,9	3829,2	3827,1	3773,2	3787,1	3788,1	3784,1	3874,3
Área de contacto (m²)	0,0330	0,0334	0,0338	0,0335	0,0331	0,0330	0,0327	0,0329	0,0329	0,0330	0,0332	0,0329
Masa Bloque (g) a los 0 min	3732,4	3734,7	3710,5	3745,5	3825,7	3828,9	3826,8	3772,9	3786,9	3787,8	3783,7	3874,0
Masa Bloque (g) a los 5 min	3732,0	3734,5	3710,3	3745,4	3825,4	3828,6	3826,4	3772,6	3786,3	3787,4	3783,4	3873,6
Masa Bloque (g) a los 10 min	3731,9	3734,2	3709,9	3745,0	3825,1	3828,3	3825,9	3772,2	3786,1	3787,0	3783,0	3873,2
Masa Bloque (g) a los 20 min	3731,6	3733,8	3709,4	3744,6	3824,5	3827,9	3825,4	3771,7	3785,4	3786,5	3782,5	3872,7
Masa Bloque (g) a los 30 min	3731,2	3733,2	3709,0	3744,3	3824,1	3827,6	3825,1	3771,2	3785,1	3786,1	3781,9	3872,2
Asfalto inicial (g)	10,2	10,4	10,4	10,8	10,3	10,3	10,2	10,2	10,2	10,4	10,4	10,3
Agua + emulsificante inicial (g)	6,3	6,4	6,4	6,6	6,3	6,3	6,3	6,2	6,2	6,4	6,3	6,3
Pérdida total de masa (asfalto + agua + emulsificante)	1,6	2,0	1,9	1,5	1,8	1,6	2,0	2,0	2,0	2,0	2,2	2,1

Cuadro 12. Diferencias de masa para cada bloque, para los distintos tiempos evaluados

Diferencia de masa Bloque (g)	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12
0 minutos	0,4	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3
5 minutos	0,4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,4	0,3	0,6	0,4	0,3	0,4
10 minutos	0,1	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4
20 minutos	0,3	0,4	0,5	0,4	0,6	0,4	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5
30 minutos	0,4	0,6	0,4	0,3	0,4	0,3	0,8	0,5	0,3	0,4	0,6	0,5

Cuadro 13. Diferencias de masa para cada bloque, para los distintos tiempos evaluados, después del análisis de datos atípicos

Diferencia de masa Bloque (g)	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12	Promedio	Desviación
0 minutos	0,4	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,1
5 minutos	0,4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,4	0,3	0,6	0,4	0,3	0,4	0,3	0,1
10 minutos	-	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1
20 minutos	0,3	0,4	0,5	0,4	0,6	0,4	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1
30 minutos	0,4	0,6	0,4	0,3	0,4	0,3	0,8	0,5	0,3	0,4	0,6	0,5	0,5	0,2

Nota: el guion mostrado en el cuadro indica el dato atípico que se eliminó después de la aplicación del Test de Grubbs.

Cuadro 14. Registro de temperaturas y humedades obtenidas en los ensayos

	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12	Promedio	Desviación
Temperatura inicial (°C)	22,8	22,9	22,8	23,9	22,9	22,8	22,9	22,8	22,8	22,9	22,9	22,9	22,9	0,3
Temperatura final (°C)	23,1	23,1	22,9	23,1	22,9	22,9	22,9	22,7	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	0,1
Temperatura Promedio (°C)	23,0	23,0	22,9	23,5	22,9	22,9	22,9	22,8	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	0,2
Humedad inicial (%)	51,0	52,0	53,0	53,0	48,0	49,0	49,0	46,0	45,0	45,0	46,0	46,0	48,6	3,1
Humedad final (%)	51,0	52,0	54,0	55,0	49,0	51,0	47,0	46,0	45,0	46,0	47,0	46,0	49,1	3,4
Humedad promedio (%)	51,0	52,0	53,5	54,0	48,5	50,0	48,0	46,0	45,0	45,5	46,5	46,0	48,8	3,2

4.3.1. Análisis de varianza de un factor

Cuadro 15. Resumen del análisis de varianza de todos los datos.

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Fila 1	12	3,9	0,3250	0,0075
Fila 2	12	3,9	0,3250	0,0166
Fila 3	11	3,9	0,3545	0,0047
Fila 4	12	5,8	0,4833	0,0106
Fila 5	12	5,5	0,4583	0,0227

Cuadro 16. Análisis de varianza tomando todos los datos.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,2758	4	0,0689	5,4906	0,0009	2,5429
Dentro de los grupos	0,6781	54	0,0126			
Total	0,9539	58				

Cuadro 17. Resumen del análisis de varianza tomando los datos de los 0 a los 10 minutos

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Fila 1	12	3,9	0,3250	0,0075
Fila 2	12	3,9	0,3250	0,0166
Fila 3	11	3,9	0,3545	0,0047

Cuadro 18. Análisis de varianza tomando los datos de los 0 a los 10 minutos

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,0066	2	0,0033	0,3374	0,7162	3,2945
Dentro de los grupos	0,3123	32	0,0098			
Total	0,3189	34				

Cuadro 19. Resumen del análisis de varianza tomando los datos de los 10 a los 30 minutos

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Fila 1	11	3,9	0,3545	0,0047
Fila 2	12	5,8	0,4833	0,0106
Fila 3	12	5,5	0,4583	0,0227

Cuadro 20. Análisis de varianza tomando los datos de los 10 a los 30 minutos

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,1058	2	0,0529	4,0958	0,0261	3,2945
Dentro de los grupos	0,4131	32	0,0129			
Total	0,5189	34				

4.3.2. Gráficos cambio en la masa versus tiempo para cada bloque

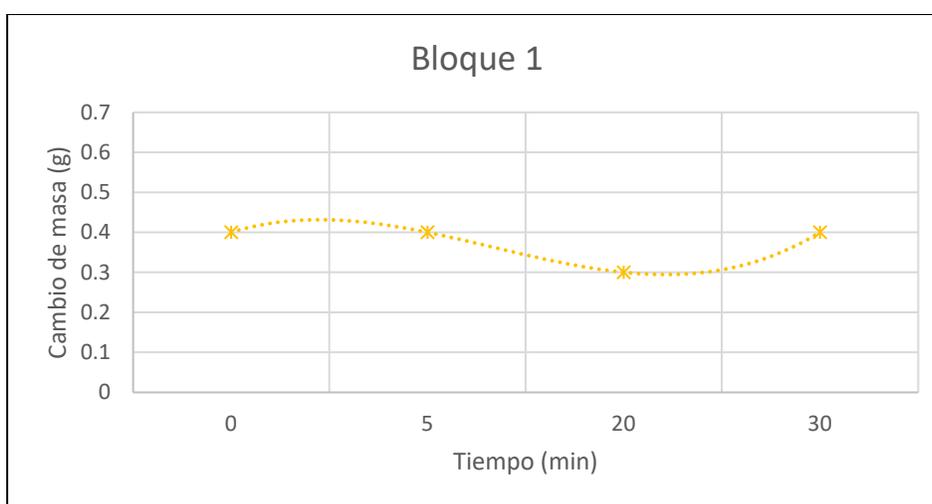


Figura 67. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 1.

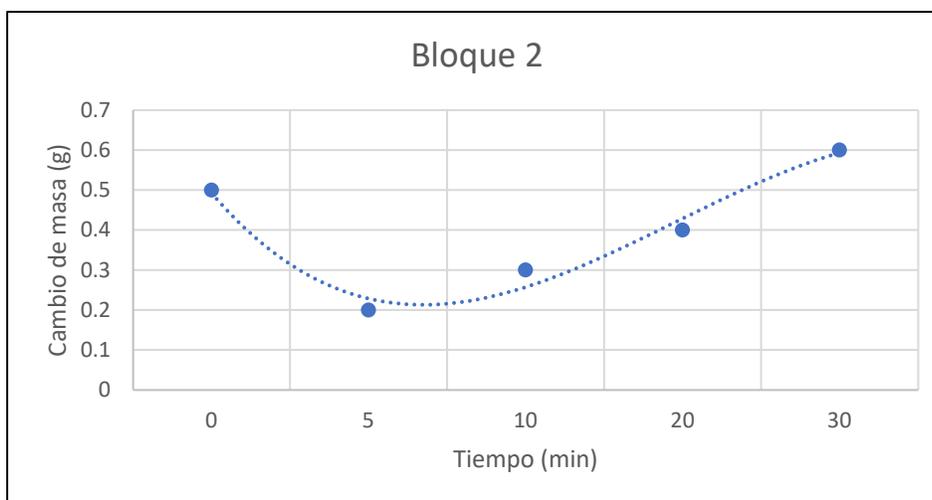


Figura 68. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 2.

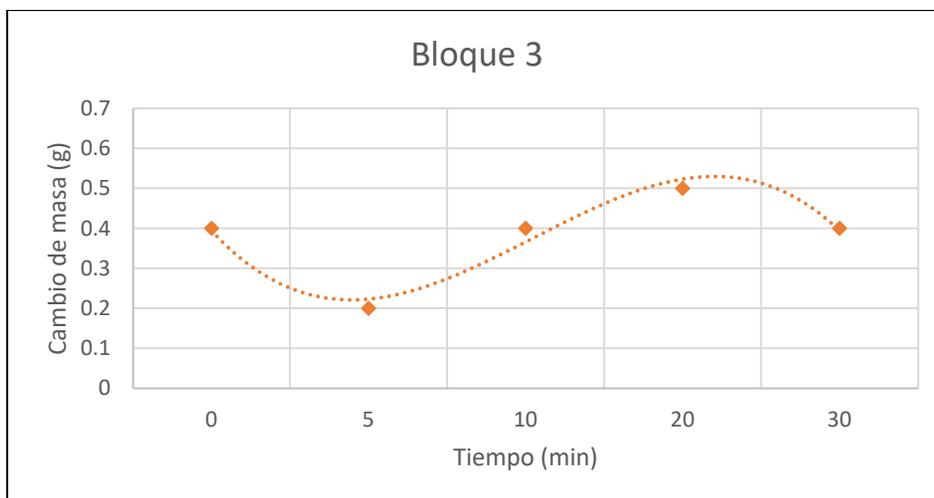


Figura 69. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 3.

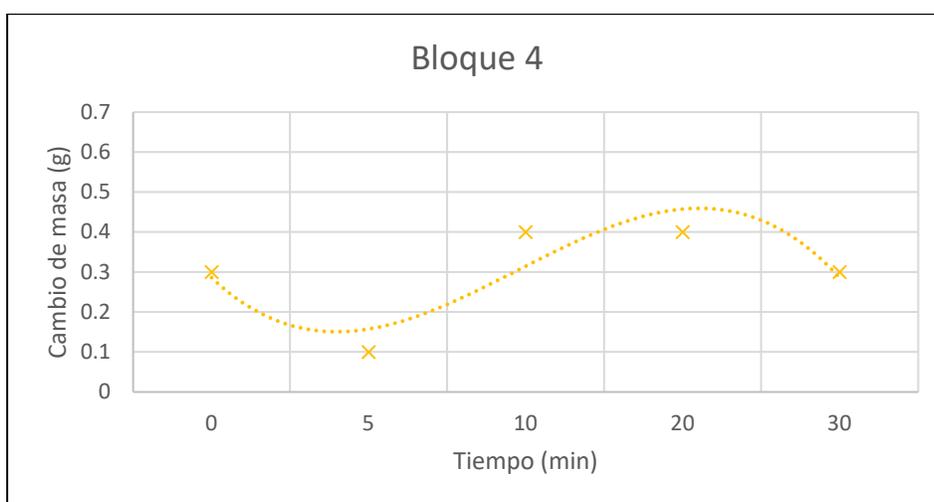


Figura 70. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 4.

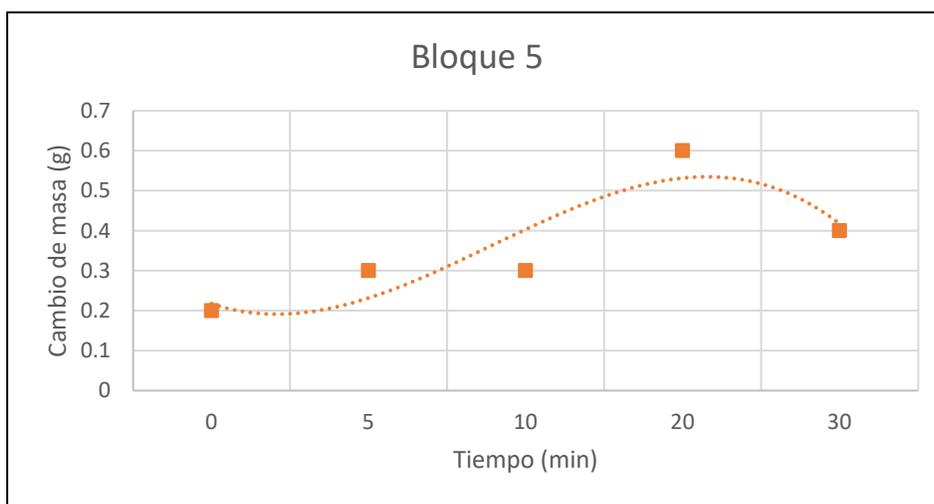


Figura 71. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 5.

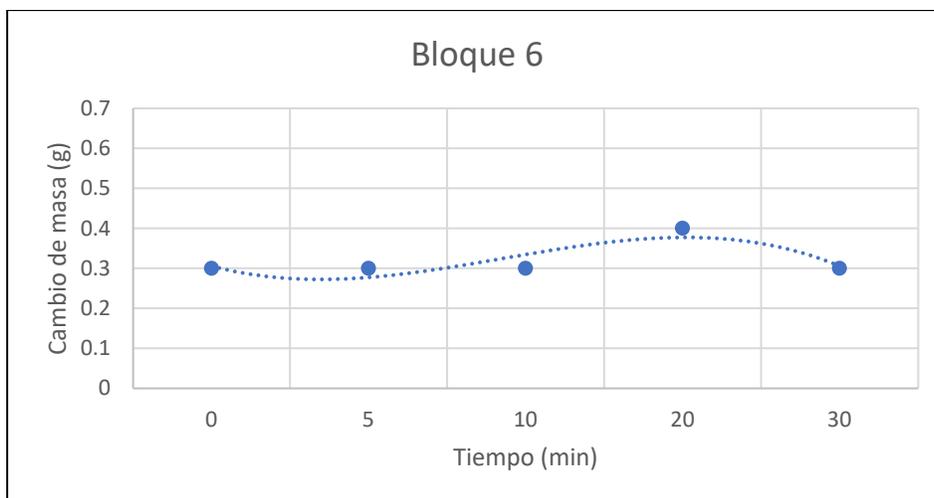


Figura 72. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 6.

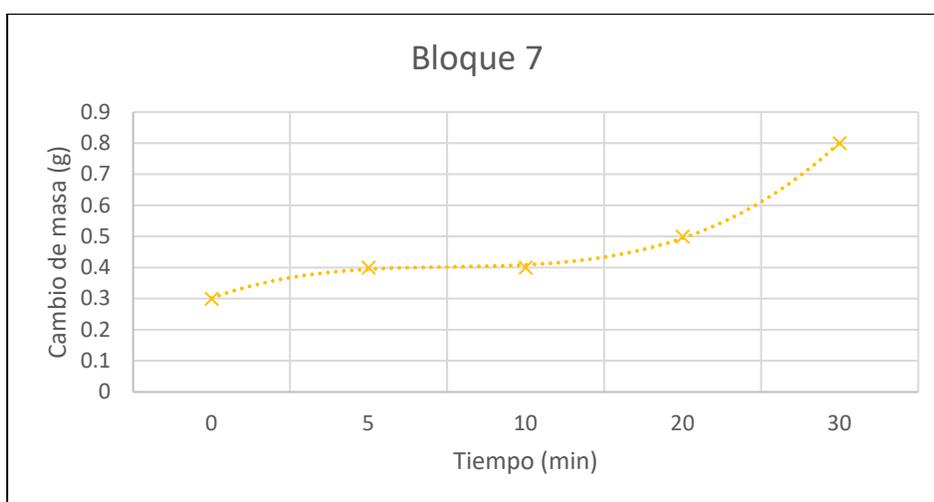


Figura 73. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 7.

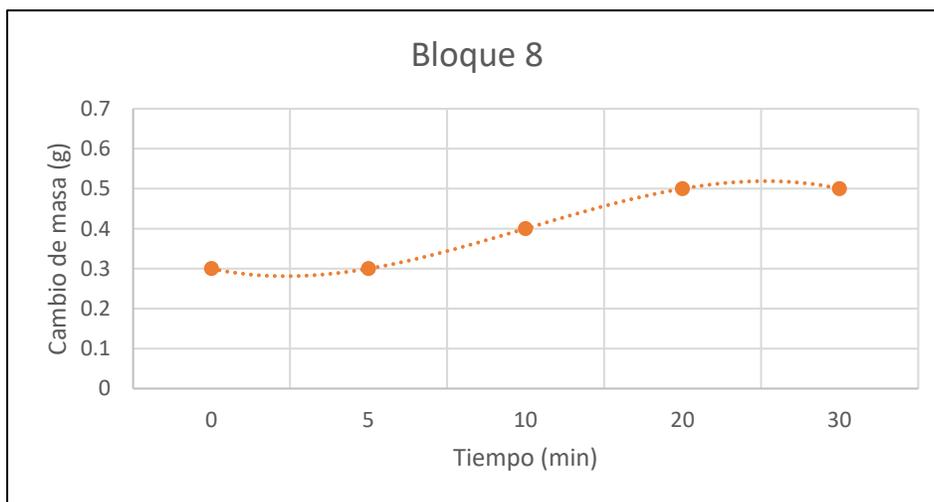


Figura 74. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 8.

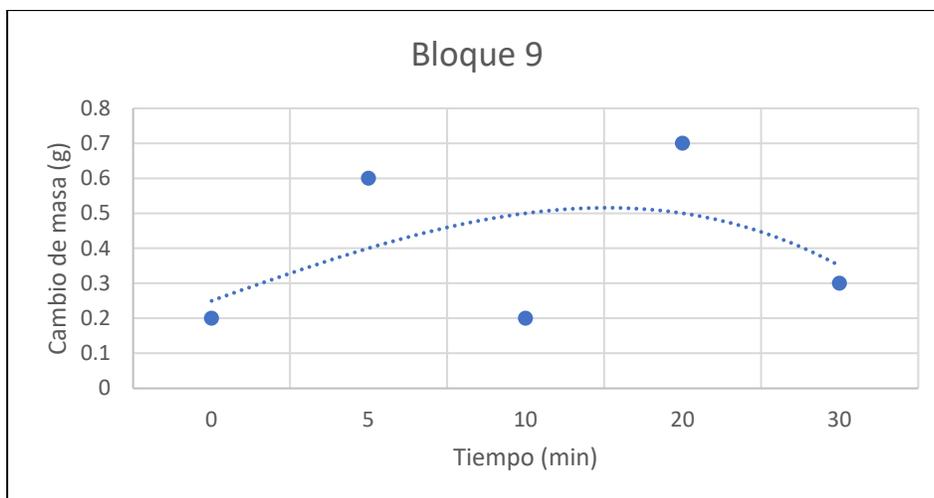


Figura 75. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 9.

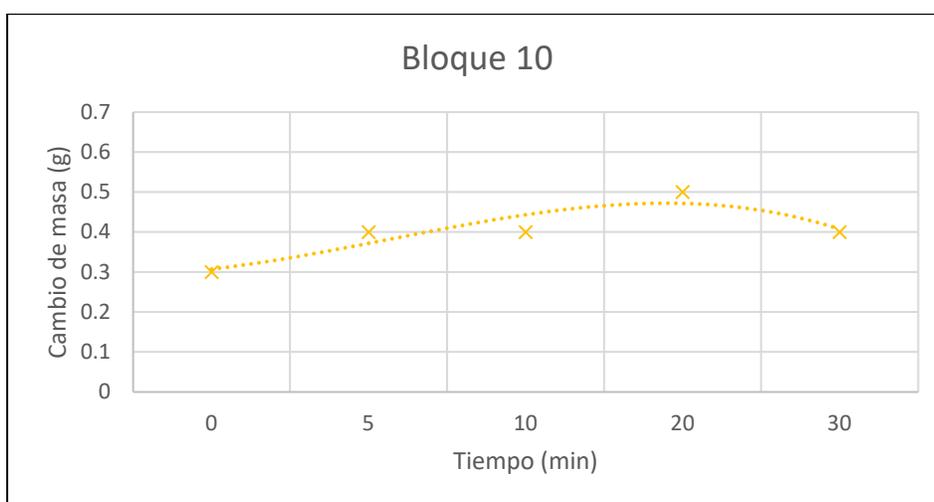


Figura 76 Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 10.

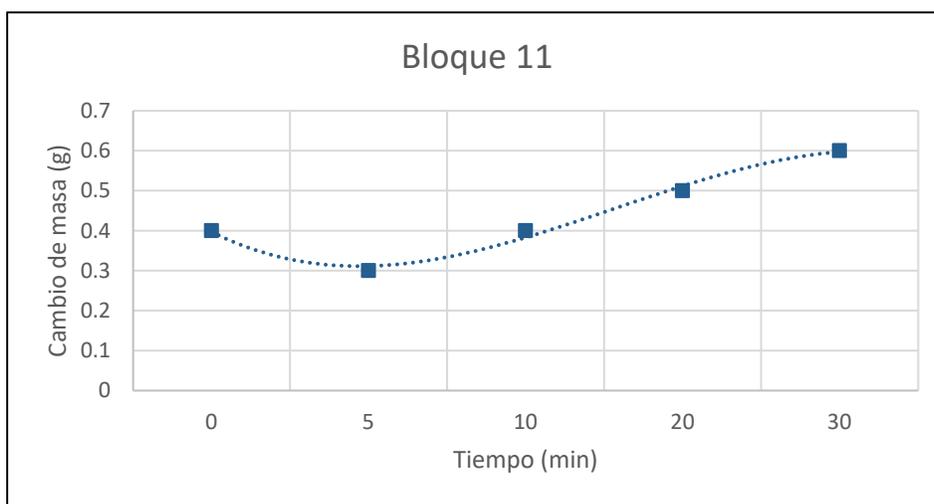


Figura 77. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 11.

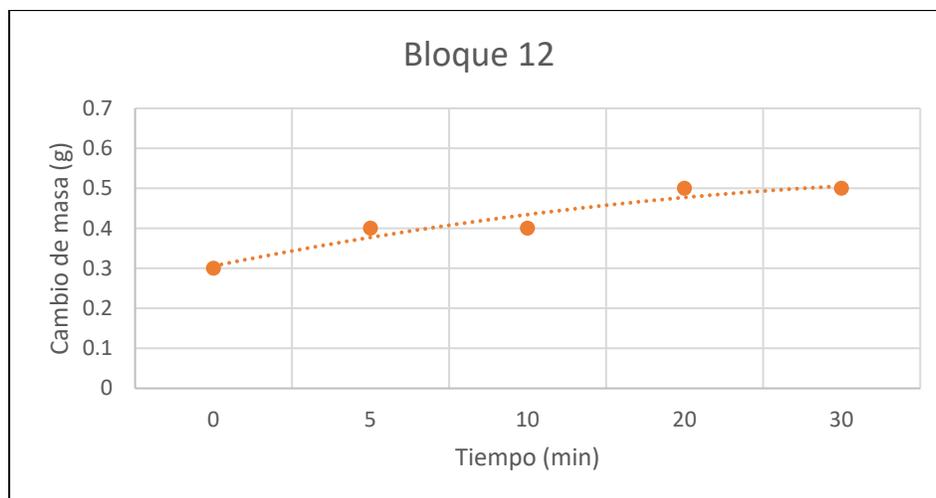


Figura 78. Diferencia de masa en función del tiempo, bloque 12.

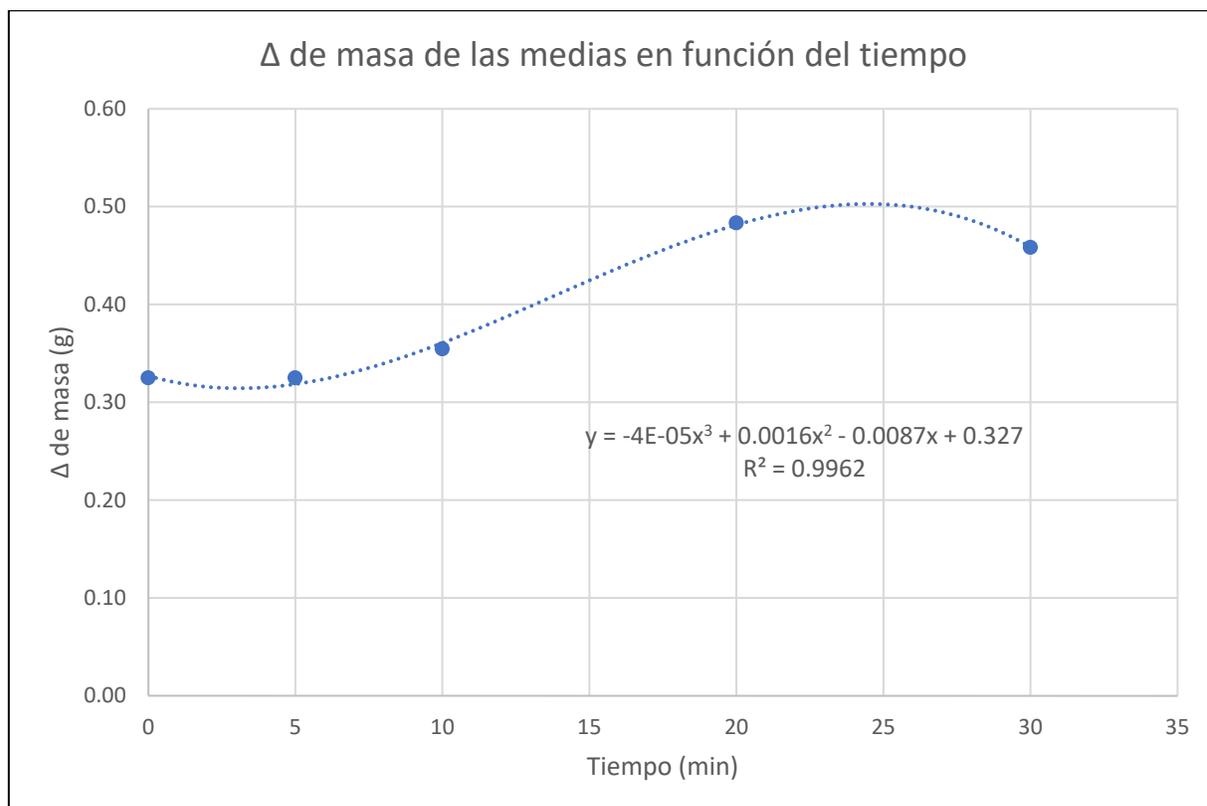


Figura 79. Diferencia de masa en función del tiempo para los promedios de los 5 tiempos de estudio.

4.3.3. Modelo matemático generado

Con los promedios del cambio en la masa de la emulsión asfáltica para cada tiempo de estudio se obtiene la siguiente ecuación polinómica de grado 3:

$$Y = -4 \times 10^{-5} * X^3 + 0,0016X^2 - 0,0087X + 0,327 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

Y: cambio de masa de la emulsión asfáltica

X: tiempo

Al evaluar para $Y = 0$ g, se tiene que $X = 39,71$ min, al convertir esta medida en minutos y segundos se tiene que $X = 40$ min con 11 s.

Derivando la Ecuación 5, se tiene:

$$Y = -12 \times 10^{-5} * X^2 + 0,0032X - 0,0087 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

Y: cambio de masa de la emulsión asfáltica

X: tiempo

Resolviendo la Ecuación 6, se tienen 2 soluciones, que corresponden al pico y valle de la curva generada:

$$X1 = 23,59 \text{ min}$$

$$X2 = 3,07 \text{ min}$$

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de esta investigación se obtuvieron de ensayos realizados bajo condiciones controladas de laboratorio, los parámetros controlados fueron la temperatura ($23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la humedad relativa ($50\% \pm 5\%$), por lo tanto, el análisis realizado se basa en las condiciones dadas para esta investigación.

5.1. Análisis cualitativo

El análisis cualitativo se realiza por medio de fotografías, estas ayudan a evidenciar el proceso de rompimiento y arrastre de la emulsión asfáltica durante la aplicación del ensayo. Dichas fotografías se muestran de la Figura 27 a la Figura 66. Se utilizaron ocho de los 12 especímenes, no se muestra la totalidad de los ensayos debido a que los demás especímenes se utilizaron para tomar videos.

Las figuras muestran el arrastre de emulsión en los anillos del rodillo para los distintos tiempos de análisis. En la Figura 27, Figura 32, Figura 37, Figura 42, Figura 47, Figura 52, Figura 57 y Figura 62 se observa el arrastre en el minuto cero para los especímenes muestreados. En estas se evidencia como el arrastre es considerable y significativamente notorio; se puede observar el color café de la emulsión asfáltica tanto en los bloques como en los hules del rodillo, el cual indica que la emulsión tiene gran cantidad de agua y por ende no ha alcanzado su rompimiento.

Es importante mencionar que para estas mediciones "al minuto cero", ya existe una pérdida de masa debido al tiempo que transcurre entre la colocación de la emulsión con la brocha, rodar el cilindro y tomar la masa, sin embargo, cada tiempo se empezaba a cuantificar una vez estuviera colocada la cantidad de gramos de emulsión requerido para cada bloque.

En la Figura 28, Figura 33, Figura 38, Figura 43, Figura 48, Figura 53, Figura 58 y Figura 63 se muestra el comportamiento del arrastre de la emulsión, transcurridos los primeros cinco minutos, donde se sigue observando una cantidad importante de emulsión en los anillos del rodillo, así como el color café de la emulsión colocada en los bloques de mezcla asfáltica, lo cual indica que la emulsión asfáltica sigue sin alcanzar el rompimiento. En comparación con el arrastre del tiempo cero, aunque al minuto cero es mayor, a los 5 minutos se seguía arrastrando suficiente emulsión que permitía cubrir casi la totalidad de los anillos del rodillo.

La Figura 29, Figura 34, Figura 39, Figura 44, Figura 49, Figura 54, Figura 59 y Figura 64 muestran los bloques de mezcla asfáltica y los anillos después de haber rodado el rodillo a los 10 minutos. Si bien el arrastre disminuye en comparación con los tiempos anteriores, se sigue arrastrando suficiente emulsión, la cual se percibe fácilmente en los anillos del rodillo, además ciertas zonas de los especímenes se observaban aún color café.

Los resultados del ensayo para el minuto 20 de los especímenes se muestra en la Figura 30, Figura 35, Figura 40, Figura 45, Figura 50, Figura 55, Figura 60 y Figura 65. Para este tiempo de estudio ya se observaba menor cantidad de arrastre, sin embargo, en comparación con el tiempo de análisis anterior, existieron ensayos donde la cantidad de arrastre en los anillos era similar a la arrastrada a los 10 minutos, también en este punto es importante mencionar que el color café en la emulsión disminuye considerablemente, al punto que no es fácil percibirlo en las fotografías, por lo que se puede afirmar que la cantidad de agua evaporada a los 20 minutos, comienza a ser importante en el cambio de masa.

Finalmente, en la Figura 31, Figura 36, Figura 41, Figura 46, Figura 51, Figura 56, Figura 61 y Figura 66 se puede observar el ensayo en su etapa final. Las figuras muestran como a los 30 minutos, en todos los ensayos, se sigue arrastrando emulsión asfáltica en los hules del rodillo, en menor cantidad, este es mínimo en comparación con el minuto cero. Sin embargo, el arrastre aún es apreciable a simple vista, por lo que iniciar el proceso de pavimentación antes de los 30 minutos posteriores a la colocación del riego de liga podría generar problemas de arrastre y/o adherencia entre las capas asfálticas.

Una de las limitaciones importantes de la investigación fue que no se pudo determinar cuánto porcentaje de la disminución de la masa de la emulsión asfáltica correspondía a la evaporación del agua y cuanto al arrastre, esto porque como ya se mencionó en el apartado de limitaciones, no se contó con una balanza que tuviera la capacidad de cuantificar diferencia en la masa del rodillo después de pasar por el bloque de mezcla asfáltica y arrastrar emulsión en los anillos del rodillo, es por esta razón que nace el análisis cualitativo, donde se demuestra y evidencia el comportamiento del arrastre en el rodillo según transcurre el tiempo.

5.2. Análisis cuantitativo

En el Cuadro 11 se muestran los datos obtenidos a la hora de aplicar el ensayo, estos representan las distintas masas de los bloques de mezcla asfáltica junto con la emulsión, las

cuales posteriormente se utilizan para calcular las diferencias de masa de la emulsión asfáltica entre cada tiempo y para cada bloque. Los bloques de mezcla asfáltica contaban con aproximadamente las mismas dimensiones (15 cm de ancho, 22 cm de largo y 5 cm de espesor), el área sobre la cual se aplicó la emulsión asfáltica varió entre $0,0329 \text{ m}^2$ y los $0,03382 \text{ m}^2$ y la masa inicial antes de la aplicación se mantuvo entre los 3694,1 g y los 3857,7 g.

De los ensayos de caracterización de la emulsión asfáltica realizados en el LanammeUCR, se obtuvo que el asfalto residual es de 62% (ver Cuadro 10). Con este se calculó el asfalto residual para la cantidad de emulsión aplicada en cada ensayo y por diferencia la cantidad del conjunto agua más emulsificante, los cuales se muestran también en el Cuadro 11.

En el Cuadro 12 se indican las diferencias de masa de la emulsión asfáltica para cada espécimen, según los distintos tiempos evaluados. Estos valores se tomaron una vez se deslizaba el rodillo sobre el bloque, por lo que es importante mencionar que, al ser las diferencias registradas en el cambio de masa del bloque de mezcla asfáltica junto con la emulsión asfáltica, el valor registrado incluye la disminución de todos los componentes de la emulsión: agua, asfalto y emulsificante. Como se puede apreciar en el Cuadro 12, los valores para el tiempo cero minutos varía entre 0,2 g y 0,5 g, para los cinco minutos la diferencia va de 0,1 g a 0,6 g, a los 10 min de 0,1 g a 0,4 g, a los 20 min de 0,3 g a 0,7 g y finalmente a los 30 min las diferencias varían de 0,3 g a 0,8 g.

Con el fin de evaluar la representatividad de los datos para cada tiempo, se aplicó el Test de Grubbs, para identificar valores atípicos. De esta prueba se identificó un dato atípico únicamente, el cual corresponde al valor de los 10 min para el bloque 1; por lo que se omitió este valor para el análisis estadístico. Los datos de las diferencias de masa con la corrección se muestran en el Cuadro 13 y son los que se utilizaron para el análisis estadístico.

En el Cuadro 14 se muestran los valores obtenidos para la temperatura y la humedad de los especímenes. La toma de ambos parámetros (temperatura y humedad) se realizó al inicio y final de cada prueba.

Es importante recalcar nuevamente que para el análisis estadístico se utilizaron los datos de la pérdida de masa de la emulsión asfáltica, esta incluye el agua evaporada, el asfalto arrastrado en el rodillo y los demás componentes de la emulsión asfáltica.

Parte del análisis estadístico consistió en realizar distintos análisis de varianza (ANOVA), donde se examinaron las diferencias entre las medias de los grupos de datos. Se evaluó la hipótesis nula (H_0), que consiste en probar si los promedios de los grupos son iguales, frente a la hipótesis alternativa (H_1) que indica que al menos una de las medias es diferente. La hipótesis para la investigación evalúa si el tiempo de curado afecta en la pérdida de masa de la emulsión asfáltica.

La hipótesis se puede probar de dos maneras: utilizando la distribución F, la cual compara el estadístico de prueba con el F crítico de la distribución para un nivel de significancia dado; o el valor p que es el nivel de significancia más pequeño que conduce al rechazo de la hipótesis nula.

Para realizar un ANOVA se necesitan dos o más muestras, en la presente investigación se consideraron los datos de la siguiente manera: un primer análisis utilizando todos los datos, el segundo utilizando solo los datos de 0 a los 10 minutos y el tercero utilizando los datos de 10 a los 30 minutos. Se utilizaron grupos de tres muestras o más para tener mayor cantidad de datos para el análisis, sin embargo, durante la escogencia de estos grupos se analizaron también grupos de dos muestras (de cero a cinco minutos, por ejemplo) y no se encontró diferencia en las medias, por lo que no se incluyen en el presente documento, pues no aportan información significativa para la investigación.

En el Cuadro 15 y Cuadro 16, se muestran los resultados del ANOVA para todo el conjunto de los datos. Con un nivel de significancia de 0,05 se obtuvo que la razón F es mayor que $F_{\text{crítico}}$ ($5,57 > 2,54$), así como el valor p es menor a 0,05, por lo que se rechaza H_0 en favor de H_1 y se concluye que, con un nivel de significancia de 0,05, las medias de los tiempos de curado no son iguales, o sea, que el tiempo de curado afecta en la diferencia de masa de la emulsión asfáltica.

Los resultados del ANOVA donde se utilizaron los primeros tres tiempos de estudio, se muestran en el Cuadro 17 y Cuadro 18, con un nivel de significancia de 5 %, se tiene que la razón F es menor que $F_{\text{crítico}}$ ($0,34 < 3,29$), además el valor p es mayor a 0,05, por lo que no se rechaza H_0 , afirmando que las medias son iguales, lo cual para la investigación indica que de cero a diez minutos el tiempo no es una variable representativa para predecir el arrastre pues no se observa un cambio en las medias. También se puede afirmar que, al no existir diferencias entre las medias, para el ensayo aplicado no es relevante evaluar estos tres tiempos seguidos, se

podría hacer, por ejemplo, la medición a los 0 y a los 10 minutos, omitiendo la medición a los 5 minutos.

Para el caso del ANOVA donde se utilizaron los últimos tres tiempos de estudio (10, 20 y 30 min), los resultados se exponen en el Cuadro 19 y Cuadro 20, para un 5 % de significancia se tiene que la razón F es mayor que $F_{\text{crítico}} (4,10 > 3,29)$, además el valor p es menor a 0,05, por lo que se rechaza H_0 , en favor de H_1 , concluyendo que para un nivel de significancia de 0,05, al menos una de las medias es diferente al resto, lo cual indica que para estos tiempos de estudio utilizados en el ensayo, existen cambios en la masa de la emulsión asfáltica con el paso del tiempo. También se puede concluir que para el ensayo aplicado estos tres tiempos si son una medición representativa.

Posteriormente se graficó para cada uno de los 12 ensayos, el cambio en la masa de la emulsión asfáltica en función del tiempo, con el fin de observar la relación y el comportamiento de los especímenes por separado, los gráficos se muestran de la Figura 67 a la Figura 78. La tendencia general observada mantiene una pérdida constante de los 0 a los 10 minutos, lo cual refuerza lo indicado en el ANOVA del segundo análisis, donde no se muestran diferencias en las medias. Luego se observa un aumento mayor en la pérdida de masa a los 20 min, debido al aumento en la pérdida de agua de la emulsión asfáltica y finalmente esta pérdida tiende a disminuir nuevamente con el paso del tiempo, afirmando que el arrastre de emulsión asfáltica es menor cuando la emulsión rompe y el agua tiende a evaporarse mayormente de los 10 a los 20 minutos. Para todos estos gráficos se utilizó una curva de tendencia polinómica de grado 3, esta fue la que mejor se ajustó al comportamiento de los datos.

En la Figura 79 se observa el gráfico de los promedios del cambio de masa de la emulsión asfáltica en función del tiempo. En este se aprecia fácilmente el comportamiento antes descrito, donde se tiene para los primeros 10 minutos una pérdida de masa constante, la cual se puede asociar según lo visto en el análisis cualitativo, a un mayor arrastre de emulsión asfáltica en los hules del rodillo, luego se observa una tendencia al incremento de la pérdida de masa a los 20 min, la cual se asocia a la evaporación de agua de la emulsión y no tanto al arrastre como tal, situación observada en el análisis cualitativo; y finalmente una disminución a los 30 min, debido a que la emulsión asfáltica alcanza un pico donde se tiene la mayor pérdida de agua y posteriormente disminuye al curar la emulsión.

Con los datos de la Figura 79 se obtuvo un modelo matemático generado a partir de una ecuación polinómica de grado 3, la cual se muestra en la Ecuación 5, esta permite evaluar el tiempo para el cual tanto el arrastre como la pérdida de agua, pierden significancia en la disminución de la masa de la emulsión asfáltica. Al evaluar la ecuación para cuando no existe un cambio en la masa, o sea, un cambio de 0 g, se tiene que el tiempo es curado es de 40 minutos y 11 segundos. También al derivar la Ecuación 5, se obtiene el tiempo donde se obtuvo menor pérdida de masa, el cual sucede poco después de los 3 minutos, y el punto donde se tiene mayor pérdida de masa, debido a la evaporación de agua de la emulsión, ocurre a los 24 minutos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

De acuerdo con la recopilación bibliográfica realizada, se puede concluir que a nivel nacional existe muy poca normativa que regule el proceso de aplicación del riego de liga, solo se cuenta con lo que se dicta en el CR-2010. Sin embargo, el procedimiento es empírico y no se especifica un tiempo mínimo para iniciar el proceso de pavimentación, de manera que se asegure que la emulsión asfáltica haya curado y se disminuya el problema del arrastre del riego en las llantas de las vagonetas.

A nivel internacional existen más estudios, donde se ha evaluado el tiempo de curado de las emulsiones asfálticas, el cual ronda entre los 30 minutos y las 2 horas. Además, en algunos países como Estados Unidos y Canadá, distintas agencias del transporte han invertido en investigación que ha permitido probar la importancia que tiene el riego de liga en la unión de las capas asfálticas. Sin embargo, a nivel internacional tampoco se cuenta con regulación rigurosa del tema, pues se deja a criterio de cada contratista.

Por medio de la aplicación de los ensayos requeridos a nivel nacional se logró caracterizar la emulsión asfáltica y la mezcla asfáltica utilizadas en la investigación; tanto la emulsión asfáltica como la mezcla asfáltica cumplen con los parámetros especificados. En el caso de la emulsión asfáltica se verificó el uso de la emulsión asfáltica catiónica de rompimiento rápido de baja viscosidad CRS-1, la cual es la más utilizada en el país para la colocación de riego de liga para la construcción de sobrecapas asfálticas, y es la que se planteó en los objetivos de la presente investigación. La emulsión utilizada para la investigación cumplió con los requerimientos exigidos y presentó un 62 % de asfalto residual. La mezcla asfáltica también cumplió con los parámetros exigidos para ser utilizada como sobrecapa asfáltica.

A pesar de las limitaciones de la investigación, el ensayo de la norma "*ASTM D711, Método de ensayo para el tiempo de no levantamiento de una pintura para demarcación vial horizontal*", funcionó para determinar el tiempo de curado de la emulsión asfáltica CRS-1, sobre una superficie de mezcla asfáltica. Aunque no se utilizó todo el equipo descrito en la norma, por ejemplo, la rampa y la placa, el cilindro metálico con anillos de hule, permitió simular el paso de las llantas de las vagonetas sobre el riego de liga, y con esto poder observar el

comportamiento de la emulsión asfáltica para un lapso de 30 minutos, por lo que este ensayo se considera representativo para los fines de la investigación.

Con los resultados obtenidos en los ensayos aplicados bajo condiciones controladas de laboratorio (temperatura de $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ y humedad relativa de $50\% \pm 5\%$), se elaboró un análisis cualitativo y cuantitativo que permitió analizar el comportamiento de la pérdida de masa de la emulsión asfáltica en los primeros 30 minutos después de colocada sobre una superficie de mezcla asfáltica. Los resultados obtenidos son propios de las condiciones dadas para esta investigación, sin embargo, como se mencionó en el presente documento existen múltiples factores que pueden modificar los tiempos de rompimiento y curado de la emulsión.

Con la aplicación de la emulsión sobre el bloque de mezcla asfáltica se inicia la evaporación del agua, esto implica una pérdida de masa antes de contabilizar el tiempo de ensayo, la cual no pudo ser estimada en el laboratorio, ya que el dato tomado una vez rodaba en rodillo sobre el bloque de mezcla asfáltica, contemplaba asfalto, agua y agente emulsificante, esto no se pudo explicar de manera cuantitativa, sin embargo, del análisis cualitativo se puede comprobar que existe arrastre de emulsión en los hules del cilindro en los 30 minutos de estudio.

El análisis cualitativo también permitió evidenciar visualmente que existe una disminución importante en el arrastre de emulsión asfáltica conforme avanza el tiempo.

De los ensayos aplicados y del análisis cuantitativo se puede observar que la diferencia de masa de la emulsión asfáltica es similar, en la mayoría de los casos, para el minuto cero y cinco, por lo que se puede concluir que en este lapso de tiempo es cuando hay más susceptibilidad a que se arrastre mayor cantidad de emulsión y que esta diferencia en la masa no sea por pérdida de agua. Situación que también se respalda de manera visual en el análisis cualitativo, donde se comprueba que existe mayor arrastre en los primeros minutos de colocada la emulsión, lo cual se puede extrapolar a lo que ocurre en campo y se puede afirmar que introducir vagonetas en el riego de liga en los primeros minutos, influye notoriamente en el arrastre de riego de liga previo a iniciar el proceso de pavimentación.

Del análisis cuantitativo se puede concluir que la pérdida de masa de la emulsión asfáltica aumenta con el paso del tiempo. Después de los 10 minutos se observa, en la mayoría de los casos, un aumento en la pérdida de masa asociada a la salida del agua de la emulsión que se evapora al estar en contacto con la mezcla asfáltica y el aire. Del mismo análisis se tiene que esta pérdida de masa producto de la evaporación llega a su punto máximo aproximadamente

a los 24 minutos y luego disminuye, indicando que el agua se ha evaporado y la emulsión a curado.

Finalmente, por medio de la generación de la ecuación polinómica de grado tres, se pudo ajustar la curva que muestra el comportamiento de la disminución de masa con el tiempo y se obtuvo un valor de tiempo de curado de 40 minutos con 11 segundos, el cual puede servir como referencia o tiempo mínimo para iniciar el proceso de pavimentación de sobrecapas asfálticas en Costa Rica una vez aplicado el riego de liga.

6.2. Recomendaciones

6.2.1. Aplicación del ensayo

A nivel de la aplicación del ensayo y basado en la experiencia obtenida en la presente investigación se proponen los siguientes puntos de mejora:

- Una de las limitaciones más importantes de la investigación a la hora de aplicar los ensayos fue el tipo de balanza que se utilizó, pues esta solo permitió conocer un decimal, y al ser tan pequeña la cantidad de emulsión asfáltica que se arrastraba en los hules del cilindro, no fue posible tomar la diferencia de peso en el mismo. Por lo tanto, se recomienda aplicar el ensayo con una balanza que mínimo de la lectura de dos decimales, lo cual permitiría tener más datos para diferenciar entre la pérdida por arrastre de asfalto y evaporación del agua.
- Si bien el bloque de mezcla asfáltica representa una condición más real, una modificación al ensayo realizado sería utilizar láminas de asfalto como base para colocar la emulsión asfáltica, esto permitirá disminuir la variabilidad que puede aportar el bloque de mezcla asfáltica en cuanto a porosidad y rugosidad, de esta manera también se eliminan los espacios donde se acumulaban pequeñas cantidades de emulsión asfáltica, se reduce la absorción de emulsión al entrar en contacto con el agregado del bloque de mezcla asfáltica y se disminuye la masa de la base donde se coloca la emulsión, esto a su vez permitiría utilizar balanzas más pequeñas que aporten más cifras significativas.
- Colocar la emulsión asfáltica con un dispositivo que permita tener una capa más uniforme, de un mismo espesor en toda el área de estudio y en un lapso más corto,

por ejemplo, un aspersor manual o aplicadores de pinturas (en caso de tener una superficie lisa).

- Se comprobó que en los primeros minutos existe gran susceptibilidad al arrastre, por lo que se recomienda eliminar uno o dos de los tiempos de medición inicial (0 y 5 minutos), e incluir un tiempo de estudio a los 40 minutos.
- Unido al punto anterior, según la National Cooperative Highway Research Program, el tiempo de curado ronda entre los 30 minutos y las dos horas, esto también sirve como respaldo para evidenciar que a los 30 minutos aún no ha curado la emulsión, por lo que se recomienda que para una futura investigación o evaluación del método se aumenten los tiempos de estudio, inclusive hasta evaluar una hora después de la aplicación. Además, estudiar el comportamiento de la emulsión asfáltica por un tiempo mayor permitirá que la curva obtenida en esta investigación se empiece a aplanar hasta llegar a ser constante, y que de forma que se pueda estimar un porcentaje de pérdida de masa necesario para que el agua se evapore totalmente de la emulsión asfáltica, y que este se pueda indicar como el porcentaje de pérdida de masa necesario para que la emulsión asfáltica rompa.
- Se recomienda aplicar este ensayo en campo, en distintas zonas del país, si bien las condiciones climáticas son difíciles de controlar en campo, permitirá realizar comparaciones y análisis para conocer que tan cercano es el comportamiento en laboratorio con el de campo, y de esta manera poder brindar un tiempo de curado según la zona del país donde se requiera colocar las sobrecapas asfálticas.
- Como se ha expuesto en los puntos anteriores, se pueden realizar modificaciones al ensayo, para estudiar más alternativas y obtener resultados aún más representativos, entre algunas otras se tiene: cambiar la tasa de emulsión asfáltica a aplicar, estudiar otros tipos de emulsión asfáltica, aplicar el ensayo en campo, y en caso de querer evaluar el ensayo nuevamente sobre mezcla asfáltica, se puede implementar otro diseño de mezcla.

6.2.2. Aplicación de riego de liga en proceso constructivo de sobrecapas asfálticas.

En cuanto a la aplicación del riego de liga en campo, de lo investigado se resaltan los siguientes puntos:

- Si bien el tiempo de rompimiento de la emulsión asfáltica depende de factores como el tipo de emulsión y las condiciones del clima, al ser la emulsión asfáltica de rompimiento rápido CRS-1 la más utilizada para la colocación del riego de liga en la construcción de las sobrecapas asfálticas, se recomienda que las entidades públicas encargadas de los procesos de licitación de obra vial (MOPT y CONAVI), implementen en los carteles un tiempo mínimo para el ingreso de las vagonetas y la colocación de mezcla asfáltica, el cual minimice el problema de arrastre, asegure que la emulsión cure y reduzca los problemas en la estructura del pavimento asociados a la mala adherencia de las capas asfálticas.
- Otro aspecto importante a controlar es el proceso constructivo del riego de liga, por lo que se recomienda tomar en cuenta las investigaciones y guías que ha publicado el LanammeUCR para implementar medidas que regulen aspectos como: la presión del camión dosificador, la temperatura de aplicación, la altura de la barra de dosificación y la condición de las boquillas.
- En cuanto al problema de arrastre del riego de liga, se sugiere incluir normativa que prohíba el tránsito de vehículos sobre el riego de liga fresco; y para iniciar el proceso de colocación de la mezcla asfáltica se recomienda que este se realice una vez la emulsión haya curado.
- Se recomienda evaluar e implementar alternativas para minimizar el arrastre del riego de liga, entre estas se tienen: dar el adecuado tiempo de curado a la emulsión asfáltica, utilizar vehículos de transferencia que lleven el material a la tolva de la pavimentadora evitando el arrastre de emulsión en las llantas de las vagonetas, utilizar pavimentadoras con barras dosificadoras de emulsión incorporadas e incluir el uso de emulsiones asfálticas anti arrastre (trackless tack coat) o de rompimiento instantáneo.

- Se recomienda evaluar el efecto que tiene el uso de traba en el tiempo de curado de la emulsión asfáltica y como este puede afectar en el desempeño de la emulsión asfáltica y la adherencia de las capas.
- Finalmente se recomienda evitar el uso de traba sobre el riego de liga, ya que esta además de no ser una práctica internacionalmente aceptada, puede interferir en la calidad y durabilidad de la sobrecapa colocada.

7. REFERENCIAS

- AksoNobel. (2010). *Emulsiones Asfálticas*. Ámsterdam.
- American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM D711, Método de ensayo para el tiempo de no levantamiento de una pintura para demarcación vial horizontal*. West Conshohocken, USA: ASTM D-10.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM E178, Standard Practice for Dealing With Outlying Observations*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *(ASTM D6936) Método de prueba estándar para determinar la demulsibilidad de la emulsión asfáltica*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D2042 Método de prueba estándar para la solubilidad en tricloroetileno del residuo asfáltico*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *D113 Método de prueba estándar para la ductilidad de materiales asfálticos*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *D7402 Práctica estándar para identificar la carga eléctrica de las emulsiones asfálticas*.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *D6930 Método de prueba estándar para la estabilidad de almacenamiento*.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *D7496 Método de prueba estándar para la viscosidad del asfalto emulsionado por el viscosímetro Saybolt Furol*.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *Método de prueba estándar de sobretamaño de partículas en la malla N°20*.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *D5 Método de prueba estándar para la penetración a 25 °C*.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *D6997 Método de prueba estándar para destilación de asfalto emulsificado*.
- Asphalt Institute. (2008). *Basic Asphalt Emulsion Manual MS-19*. Fourth Edition, USA. Asphalt Institute (2015). *Tack Coat Best Practices*. USA.

- ASTM. (2015). *Standart Test Method for No-Pick-Up Time of Traffic Paint*. West Conshohocken, USA: ASTM D-10.
- Destrée, A., & De Visscher, J. (2016). *Investigation of the Impact of Conditions of Application of Tack Coats on the Interlayer Bond Strength*.
- Federal Highway Administration. (2016). Tack Coat Best Practices. *U.S. Department of Transportation*.
- Flexible Pavements of Ohio. (2012). Technical Bulletin: Proper Tack Coat Application.
- Guerrero, S. (2015). *Buenas Prácticas Constructivas en la aplicación del riego de liga para la colocación de sobrecapas asfálticas*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Unidad de Auditoría Técnica, LanammeUCR.
- Guerrero, S., Herra, L., Salas, M., Sequeira, W., & Loría, L. G. (2019). *Aplicación de riego de liga, Guía para Inspectores*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica: PITRA, LanammeUCR.
- Herra, L. D., Guerrero, S., Rodríguez, J. D., Salas, M., Sequeira, W., & Loría, L. G. (abril de 2017). *Tratamientos Superficiales como alternativa en rutas de lastre*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- INECO y MOPT. (2011). *Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035*. Costa Rica.
- Jiménez, M., & Ulloa, A. (2010). *Implementación del diseño y procedimiento de ensayo de laboratorio para mezclas en frío para la reparación de baches en Costa Rica*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- Jiménez, M., Ulloa, A., & Múnera, J. C. (2016). *Guía de diseño de mezcla de laboratorio para los sellos de lechada asfáltica (Slurry seals)*. Programa de Infraestructura del Transporte, LanammeUCR.
- Lan, N., Dong, V., Lan, M., & Huu, D. (2016). *Investigation of Bond Between Asphalt Layers in Flexible Pavement*.
- LanammeUCR. (2021). *M-0209-2021 Ensayos a la emulsión asfáltica*. San José, Costa Rica.
- Mercado, R., Bracho, C., & Avendaño, J. (2008). *Emulsiones asfálticas usos - rompimiento*. Venezuela: Universidad de los Andes, Laboratorio de formulación, interfases reología y procesos.

- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010*. San José, Costa Rica.
- National Cooperative Highway Research Program. (2012). *NCHRP Report 712, Optimization of Tack Coat for HMA Placement*. Mohammad, et. al. Transportation Research Board Washington, D.C.
- NCHRP. (2018). *Tack Coat Specifications, Materials and Construction Practices*.
- OJM Consultores de Calidad y Laboratorios. (2018). *Diseño de Mezcla Asfáltica*. Alajuela, Costa Rica.
- Salas, M., Guerrero, S., Rodríguez, J. D., Sequeira, W., & Loría, L. G. (2015). *LM-PI-AT-109-16, Prácticas constructivas en obras de conservación vial de la red vial nacional pavimentada. Contratación directa 2014CD-000140-0CV00*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura en Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Salas, M., Guerrero, S., Rodríguez, J. D., Sequeira, W., & Loría, L. G. (2015). *LM-PI-AT-64-15, Prácticas constructivas en obras de conservación vial de la red vial nacional pavimentada. Contratación directa 2014CD-000140-0CV00*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura en Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Salas, M., Guerrero, S., Rodríguez, J., Sequeira, W., & Loría, L. (2016). *LM-PI-AT-140-15, Desempeño y condición de algunas obras de conservación vial*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Salazar, J. (2011). *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano*. LanammeUCR.
- Sequeira, W. (2020). *Material de curso: Introducción al Diseño de Pavimentos*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Texas Department of Transportation (TxDOT). (2010). *Seal Coat and Surface Treatment Manual*. Texas, Estados Unidos: TxDOT.
- Ulloa, A. (2012). *Preparación de emulsiones asfálticas en laboratorio*. San Pedro, Costa Rica: Métodos y Materiales, Volumen 2, LanammeUCR, Universidad de Costa Rica.

8. ANEXOS

Cuadro A. 1. Valores críticos para la prueba T, Grubbs

Number of Observations, n	Upper 10 % Significance Level	Upper 5 % Significance Level	Upper 1 % Significance Level
3	1.1484	1.1531	1.1546
4	1.4250	1.4625	1.4925
5	1.602	1.672	1.749
6	1.729	1.822	1.944
7	1.828	1.938	2.097
8	1.909	2.032	2.221
9	1.977	2.110	2.323
10	2.036	2.176	2.410
11	2.088	2.234	2.485
12	2.134	2.285	2.550
13	2.175	2.331	2.607
14	2.213	2.371	2.659
15	2.247	2.409	2.705
16	2.279	2.443	2.747
17	2.309	2.475	2.785
18	2.335	2.504	2.821
19	2.361	2.532	2.854
20	2.385	2.557	2.884
21	2.408	2.580	2.912
22	2.429	2.603	2.939
23	2.448	2.624	2.963
24	2.467	2.644	2.987
25	2.486	2.663	3.009
26	2.502	2.681	3.029
27	2.519	2.698	3.049
28	2.534	2.714	3.068
29	2.549	2.730	3.085
30	2.563	2.745	3.103
35	2.628	2.811	3.178
40	2.682	2.866	3.240
45	2.727	2.914	3.292
50	2.768	2.956	3.336

Fuente: (American Society for Testing and Materials, 2016)

9. APÉNDICES

En el Cuadro A. 2, se muestran los resultados de la aplicación del test de Grubbs para datos atípicos.

Cuadro A. 2. Resultados de la aplicación del Test de Grubbs

Tiempo: 0 min			
Datos	G calculado	G tabla	Conclusión
0,4	0,87	2,285	Valor normal
0,5	2,02	2,285	Valor normal
0,4	0,87	2,285	Valor normal
0,3	0,29	2,285	Valor normal
0,2	1,44	2,285	Valor normal
0,3	0,29	2,285	Valor normal
0,3	0,29	2,285	Valor normal
0,3	0,29	2,285	Valor normal
0,2	1,44	2,285	Valor normal
0,3	0,29	2,285	Valor normal
0,4	0,87	2,285	Valor normal
0,3	0,29	2,285	Valor normal
Tiempo: 5 min			
Datos	G calculado	G tabla	Conclusión
0,4	0,58	2,285	Valor normal
0,2	0,97	2,285	Valor normal
0,2	0,97	2,285	Valor normal
0,1	1,75	2,285	Valor normal
0,3	0,19	2,285	Valor normal
0,3	0,19	2,285	Valor normal
0,4	0,58	2,285	Valor normal
0,3	0,19	2,285	Valor normal
0,6	2,13	2,285	Valor normal
0,4	0,58	2,285	Valor normal
0,3	0,19	2,285	Valor normal
0,4	0,58	2,285	Valor normal
Tiempo: 10 min			
Datos	G calculado	G tabla	Conclusión
0,1	2,37	2,285	Valor atípico
0,3	0,19	2,285	Valor normal
0,4	0,58	2,285	Valor normal
0,4	0,58	2,285	Valor normal
0,3	0,19	2,285	Valor normal
0,3	0,19	2,285	Valor normal

0,4	0,58	2,285	Valor normal
0,4	0,58	2,285	Valor normal
0,2	0,97	2,285	Valor normal
0,4	0,58	2,285	Valor normal
0,4	0,58	2,285	Valor normal
0,4	0,58	2,285	Valor normal
Tiempo: 20 min			
Datos	G calculado	G tabla	Conclusión
0,3	1,78	2,285	Valor normal
0,4	0,81	2,285	Valor normal
0,5	0,16	2,285	Valor normal
0,4	0,81	2,285	Valor normal
0,6	1,13	2,285	Valor normal
0,4	0,81	2,285	Valor normal
0,5	0,16	2,285	Valor normal
0,5	0,16	2,285	Valor normal
0,7	2,10	2,285	Valor normal
0,5	0,16	2,285	Valor normal
0,5	0,16	2,285	Valor normal
0,5	0,16	2,285	Valor normal
Tiempo: 30 min			
Datos	G calculado	G tabla	Conclusión
0,4	0,39	2,285	Valor normal
0,6	0,94	2,285	Valor normal
0,4	0,39	2,285	Valor normal
0,3	1,05	2,285	Valor normal
0,4	0,39	2,285	Valor normal
0,3	1,05	2,285	Valor normal
0,8	2,27	2,285	Valor normal
0,5	0,28	2,285	Valor normal
0,3	1,05	2,285	Valor normal
0,4	0,39	2,285	Valor normal
0,6	0,94	2,285	Valor normal
0,5	0,28	2,285	Valor normal