

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**Calibración de una ecuación de transferencia a fatiga para capas de
mezcla asfáltica reforzadas con geomallas en Costa Rica**

Trabajo Final de Graduación

Que para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Jorshua Eduardo Rubio Escobar

B66363

Director de Trabajo de Graduación:

Ing. José Pablo Aguiar Moya

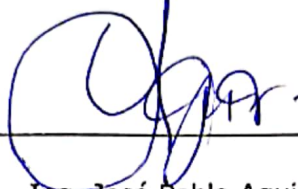
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José

Diciembre, 2021

Miembros del comité asesor

Director de proyecto:

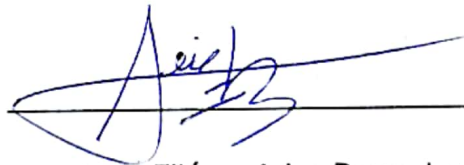


Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.

Asesores

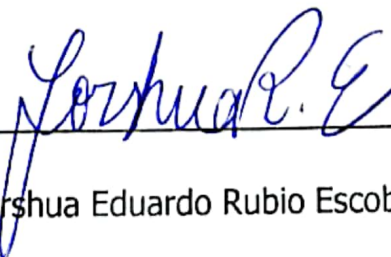


Ing. Paulina Leiva Padilla, PhD.



Ing. Eliécer Arias Barrantes, MSc.

Graduando:



Jorshua Eduardo Rubio Escobar

Derechos de autor

Fecha:

El suscrito, **Jorshua Eduardo Rubio Escobar**, cédula **1-1697-0836**, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carne **B66363**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación "**Calibración de una ecuación de transferencia a fatiga para capas de mezcla asfáltica reforzadas con geomallas en Costa Rica**", bajo la dirección del **Ing. José Pablo Aguiar Moya, MSc.,PhD.**, 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 No. 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 Dios por siempre darme siempre fuerzas, guiarme y permitirme convertirme en un profesional de la mano de múltiples enseñanzas en el camino.

A mis padres Luis Rubio y Consuelo Escobar, por siempre motivarme, apoyarme y ser el motor que impulsaba mis sueños. A mis hermanos, Adriana Rubio y Jeaustin Rubio, con quienes siempre tuve apoyo y cariño incondicional.

Por último, a Allison Pérez, a quien le guardo un gran amor y un profundo agradecimiento; desde el primer momento me brindó todo su cariño, me apoyó, motivó y me impulsó en cada paso que daba.

Agradecimientos

Agradezco mucho toda la disposición, tiempo y conocimiento que me brindaron los Ing. José Pablo Aguiar, Ing. Paulina Leiva e Ing. Eliecer Arias. A quienes admiro y guardo profundo respeto.

Al Ing. Álvaro Solís e Ing. Lisette Pérez quienes muy amablemente me guiaron y ayudaron con la donación de materiales y siempre compartieron todo su experiencia y conocimiento con mi persona.

A la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR quienes me ayudaron en mi formación profesional y me brindaron todo su apoyo y guía durante los últimos años de mi carrera universitaria. En especial a la Ing. Wendy Sequeira e Ing. Mauricio Picado por darme la oportunidad de formar parte del equipo de trabajo.

Al personal técnico y profesional del Laboratorio Área de Transportes y Pavimentos y Laboratorios del Área de Construcción del LanammeUCR quienes me brindaron su colaboración en toda la parte experimental. En especial a los técnicos del laboratorio de mezcla asfálticas y a las Ing. Mónica Jiménez, Ing. Andrea Ulloa, Ing. Ellen Rodríguez y el Ing. Francisco Villalobos.

A mis compañeros de la vida y de universidad; Steven, Richard, Juan Pablo, Pablo, Michelle, Jorge, Alejandro, Jennifer, Dani, Ricardo y Felipe, quienes siempre creyeron en mí y siempre me motivaron.

Índice general

Capítulo I: Introducción	2
1.1. Justificación.....	2
1.1.1. Problema específico.....	2
1.1.2. Importancia	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Antecedentes.....	4
1.4. Metodología	9
1.4.1. Fase de investigación y recolección de antecedentes	11
1.4.2. Fase de experimentación	11
1.4.3. Fase de modelación y análisis.....	14
1.4.4. Fase de elaboración del informe final	14
Capítulo II: Marco teórico e hipótesis.....	15
2.1. Geosintéticos en pavimentación	16
2.1.1. Tipos de geosintéticos en rehabilitación de pavimentos flexibles.....	19
2.1.2. Mecanismos de los geosintéticos en pavimentación y repavimentación.....	23
2.1.3. Normativa de geosintéticos en pavimentación y repavimentación	24
2.1.4. Dosificación de ligante asfáltico es pavimentación y repavimentación con geosintéticos.....	26
2.1.5. Ensayos en geosintéticos	27
2.2. Reflejo de grietas en pavimentos flexibles.....	30
2.3. Análisis de leyes a fatiga.....	34
2.4. Proceso constructivo de sobrecapas asfálticas reforzadas con geosintéticos	37
2.5. Metodología de diseño de sobrecapas asfálticas reforzadas con geosintéticos.....	46

2.6.	Ensayos de fatiga a flexotracción en mezcla asfáltica	50
2.7.	Funciones de transferencia a fatiga en carpetas asfálticas	52
2.8.	Elementos que afectan la vida a fatiga en mezcla asfáltica	55
2.9.	Estado del arte en el uso de geosintéticos como sistema intercapa en pavimentos flexibles	56
Capítulo III: Resultados experimentales		66
3.1.	Materiales utilizados en el proyecto de investigación	66
3.1.1.	Mezcla asfáltica	66
3.1.2.	Emulsión asfáltica.....	70
3.1.3.	Geomalla	71
3.2.	Metodología de riego de liga	72
3.3.	Compactación del bloque de mezcla asfáltica	73
3.4.	Ensayo a flexotracción.....	75
3.4.1.	Resultados ensayo a flexotracción.....	80
3.5.	Propuesta de ecuación de transferencia a fatiga	87
3.6.	Análisis de sensibilidad	91
Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones.....		93
4.1.	Conclusiones	93
4.2.	Recomendaciones	96
Bibliografía		97
Anexos.....		103

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de actividades Fase I y Fase II	9
Figura 2. Diagrama de actividades Fase III y Fase IV	10
Figura 3. Elaboración de bloque de mezcla asfáltica (a) y corte en capas de 5 cm (b y c).....	12
Figura 4. Envejecimiento de capas asfálticas (a), riego de liga (b) y colocación de geomalla (c).	12
Figura 5. Colocación LVDT (a), montaje de ensayo (b) y falla del espécimen (c).....	14
Figura 6. Estructura de pavimento típica	15
Figura 7. Geotextil tejido	20
Figura 8. Geotextil tejido	20
Figura 9. Geomalla uniaxial	21
Figura 10. Geomalla biaxial	22
Figura 11. Uso de geomalla de vidrio en recarpeteo de pavimentos flexible.....	22
Figura 12. Geomalla triaxial.....	23
Figura 13. Cuero de lagarto según su grado de severidad.....	31
Figura 14. Mecanismos de propagación de grietas	32
Figura 15. Relación entre razón de energía disipada y ciclos de carga.....	36
Figura 16. Curva Ley de Paris.....	37
Figura 17. Aplicación de sellos asfálticos	38
Figura 18. Limpieza de superficie mediante barredora mecánica.....	39
Figura 19. Aplicación uniforme del riego de liga	40
Figura 20. Rompimiento de emulsión asfáltica	40
Figura 21 . Anclaje de la geomalla	41
Figura 22. Traslapes mínimos del geosintético a colocar	42
Figura 23. Acumulación y exceso de riego de liga	42
Figura 24. Colocación de la sobrecapa asfáltica.....	45
Figura 25. Compactación de sobrecapa asfáltica mediante compactador de tambor	45
Figura 26. Efecto de la posición de la geomalla en la carpeta asfáltica sobre la resistencia a fatiga	63
Figura 27. Efecto de la posición de la geomalla en la carpeta asfáltica sobre el ahuellamiento .	63

Figura 28. Efecto de la posición de la geomalla en la carpeta asfáltica sobre el agrietamiento reflectivo.....	64
Figura 29. Ajuste de datos a gráfico Blanck Space y Cole-Cole, mezcla convencional.....	68
Figura 30. Curva maestra mezcla asfáltica convencional	68
Figura 31. Ajuste de datos a gráfico Blanck Space y Cole-Cole, mezcla modificada.....	70
Figura 32. Curva maestra mezcla asfáltica modificada con butonal	70
Figura 33. Geomalla biaxial	71
Figura 34. Sección transversal especímenes realizados en el laboratorio	73
Figura 35. Porcentaje de masa vs vacíos, mezcla asfáltica convencional de la primera capa.....	74
Figura 36. Porcentaje de masa vs vacíos, sobrecapa de mezcla asfáltica convencional	74
Figura 37. Porcentaje de masa vs vacíos, sobrecapa de mezcla asfáltica modificada	75
Figura 38. Esquema de ensayo viga a cuatro puntos, vista longitudinal.....	75
Figura 39. Montaje ensayo en laboratorio.....	76
Figura 40. Cálculo de velocidad, gráfico de Baksdale	77
Figura 41. Señal haversiana con periodos de descanso, carga máxima de 15 kN	79
Figura 42. Colocación LVDT's	79
Figura 43. Salida programa UTM MTS LANDMARK	80
Figura 44. Agrietamiento inicial, espécimen de prueba	81
Figura 45. Modo de falla de vigas	83
Figura 46. Vida a fatiga especímenes fallados a 13 kN.....	84
Figura 47. Vida a fatiga especímenes fallados a 14 kN.....	84
Figura 48. Vida a fatiga especímenes fallados a 15 kN.....	85
Figura 49. Capacidad a fatiga según el nivel de esfuerzo	85
Figura 50. FTIR comparación entre mezclas asfálticas	86
Figura 51. FTIR mezcla asfáltica convencional	86
Figura 52. Fatiga real vs la estimada por el modelo.....	90

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Resumen esquema experimental	13
Cuadro 2. Funciones primarias de geosintéticos.....	17
Cuadro 3. Descripción de las funciones de los geosintéticos.....	18
Cuadro 4. Requisitos físico-mecánicos mínimos de geotextiles en pavimentación y repavimentación	25
Cuadro 5. Requisitos físico-mecánicos mínimos de geomallas en pavimentación y repavimentación	25
Cuadro 6. Requisitos físicos para tejido de pavimentación.....	26
Cuadro 7. Tasas de dosificación recomendadas para geotextiles en sobrecapas asfálticas	26
Cuadro 8. Ensayos en geosintéticos	27
Cuadro 9. Eficacia de geosintético como sistema intercapa	33
Cuadro 10. Selección del geotextil según grado de deterioro de la superficie de ruedo.....	34
Cuadro 11. Soluciones a posibles problemas en campo.....	43
Cuadro 12. Valore recomendados de FEF para geotextiles	47
Cuadro 13. Valores recomendados de FEF para geomallas.....	47
Cuadro 14. Umbrales de falla por porcentaje de área agrietada (grietas de abajo hacia arriba por fatiga).....	49
Cuadro 15. Ensayos a flexotracción en especímenes de mezclas asfáltica.....	51
Cuadro 16. Coeficientes del modelo general a fatiga (Ecuación 17) de distintos centros de investigación	54
Cuadro 17. Modelos de transferencia de carga a fatiga.....	54
Cuadro 18. Estudios sobre el efecto en la viga a fatiga de sobrecapas asfálticas empleando geosintéticos	57
Cuadro 19. Estudios sobre el efecto de los geosintéticos en el agrietamiento reflectivo en sobrecapas asfálticas.....	60
Cuadro 20. Granulometría mezcla asfáltica convencional	66
Cuadro 21. Parámetros volumétricos mezcla asfáltica convencional	67
Cuadro 22. Granulometría mezcla asfáltica modificada	69
Cuadro 23. Parámetros volumétricos de sobrecapa de mezcla asfáltica modificada	69
Cuadro 24. Resultados de densidad y asfalto residual en emulsión asfáltica	70

Cuadro 25. Especificaciones técnicas geomalla MacGrid AR 5.7	71
Cuadro 26. Variables del modelo de desempeño a fatiga	88
Cuadro 27. Salida regresión lineal múltiple iteración 1	89
Cuadro 28. Salida regresión lineal múltiple iteración 2	89
Cuadro 29. Constantes del modelo de deterior propuesto	89
Cuadro 30. Estructura de pavimento patrón	91
Cuadro 31. Respuesta mecánica de los casos de estudios	92
Cuadro 32. Análisis de sensibilidad de las variables independientes del modelo de desempeño	92

Rubio Escobar, Jorshua Eduardo
Calibración de una ecuación de transferencia a fatiga para capas de mezcla asfáltica reforzadas con geomallas en Costa Rica
Proyecto de graduación - Ingeniería Civil – San José, C.R.:
J.E. Rubio E., 2021
x, 102, [16]h; ils. col. -58 refs

Resumen

Bajo la inclusión de conceptos mecanicistas en el diseño de pavimentos de Costa Rica y nuevas técnicas de preservación y mantenimiento de pavimentos, se investigó, desarrollo y propuso una ecuación para aproximar la capacidad a fatiga de una carpeta asfáltica reforzada con geomalla a nivel de laboratorio.

Para realizar ello se elaboraron un total de quince especímenes de concreto asfáltico, que constan de una primera capa de mezcla asfáltica convencional de 5 cm que fue envejecida para simular una carpeta existente. A ocho de estas se les colocó una sobrecapa de concreto asfáltico convencional y a seis una sobrecapa de concreto asfáltico modificado con butonal. La sobrecapa colocada fue de 10 cm y todas las probetas fueron reforzadas con geomalla en la interfaz capa existente-sobrecapa.

Para la falla de las probetas se siguió el esquema de montaje de ensayo estipulado en la Normativa Europea para vigas a flexotracción en cuatro puntos (4PB-PR). A estos se les aplico pulsos haversianos con una frecuencia de 10 Hz y periodos de descanso de 0,9 s entre cada pulso. El ensayo se realizó a esfuerzo controlado y la carga utilizada varia dentro de tres rangos, siendo estos: 0,45 kN a 13,0 kN, 0,45 kN a 14,0 kN y de 0,45 kN a 15,0 kN.

Los resultados del ensayo a flexotracción muestran un mejor desempeño en los especímenes cuya sobrecapa tiene un mayor módulo dinámico, esto para todos los niveles de esfuerzo. Basado en estos datos y el módulo dinámico de la sobrecapa asfáltica, se planteó un modelo predictivo en función de dos variables independientes. Al finalizar y mediante un análisis de sensibilidad, se verifica bajo distintos escenarios que la variable de mayor impacto es el módulo dinámico de la sobrecapa asfáltica.

PALABRAS CLAVE: GEOMALLA, FATIGA, SOBRECAPA DE MEZCLA ASFÁLTICA, DESEMPEÑO, ENSAYO A FLEXIÓN

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.
Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo I: Introducción

1.1. Justificación

1.1.1. Problema específico

El daño por fatiga constituye uno de los principales deterioros presentes posterior a la construcción y rehabilitación de pavimentos flexibles en Costa Rica. Según el Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica (también conocido como MAV 2016) (MOPT, 2016), a este tipo de daño también se conoce como "cuero de lagarto" y hace énfasis a la conexión de grietas que se propagan desde fondo la capa de concreto asfáltico hasta la superficie.

Este tipo de daños pueden ser producto de varios factores como la acción repetida de cargas de tránsito, capas inferiores deterioradas o agrietadas, ligante envejecido y/o drenaje inadecuado y es considerada como una falla estructural del pavimento que puede variar entre baja, media y alta severidad (MOPT, 2016). Por lo general, el fisuramiento es una indicación de que el pavimento ya no tiene capacidad estructural, es decir, que ya no es capaz de soportar la concentración de esfuerzos que se producen en la última fibra a flexión y conforme pasa el tiempo, este se va agravando e interconectando con otras grietas hasta producir surcos o huecos en la superficie de rodadura.

Debido a la problemática expuesta, desde el análisis de los materiales, el diseño de la estructura de pavimento flexible y del proceso constructivo en obra, existe toda una verificación y seguimiento con el fin de que la obra civil cumpla y conserve un buen desempeño durante su vida útil de diseño. Proceso que también debe ser acompañado de mantenimiento periódico e intervenciones oportunas con técnicas adecuadas.

En Costa Rica se ha utilizado la metodología de diseño para pavimentos flexibles conocida como AASHTO 93 (de la Asociación Estadounidense de Carreteras Estatales y Oficiales de Transporte, AASHTO por sus siglas en inglés), metodología empírica que se complementa con un análisis mecánico para subsanar factores no contemplados en dicho procedimiento y de esta forma analizar y determinar la capacidad de carga por fatiga de la capa asfáltica (Arias, 2020). Dicho análisis se puede realizar mediante una ecuación que ha sido calibrada por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Leiva-Villacorta, Vargas-Nordbeck, Aguiar-Moya, & Loria-Salazar, 2016) como parte de su diseño mecánico-empírico de pavimentos flexibles para Costa Rica. No obstante, esta no considera capas asfálticas reforzadas con geomallas.

Por otra parte, tomando en cuenta que varios estudios realizados en nuestro país como la tesis de Leiva (2016), Picado (2018), Katiyar (2018), entre otros; demuestran que para mejorar la capacidad funcional de una capa asfáltica se añade una geomalla de tal forma que esta absorba parte de los esfuerzos a tensión y retarde las grietas que provengan desde capas inferiores (técnica que ha venido aplicándose en la construcción y rehabilitación de la Red Vial Nacional), resulta imperativo que se calibre una ecuación de transferencia a fatiga que abarque capas de mezcla asfáltica reforzadas con el fin de analizar los ciclos de carga que deben transcurrir antes de que falle la carpeta asfáltica, de manera que se pueda considerar el efecto del refuerzo en la propagación del daño de la capa asfáltica.

1.1.2. Importancia

El diseño de pavimentos, al contrario de otras obras civiles, se desarrolla para que paulatinamente se vaya deteriorando hasta llegar a su vida útil de diseño y esto sucede en función de la calidad de los materiales, cargas de tránsito e influencia ambiental. Este tipo de infraestructura vial ha venido de la mano de metodologías empíricas que no contemplan adecuadamente la respuesta del pavimento y por ello, se ha trabajado a nivel internacional y nacional para incorporar procedimientos mecanicistas basados en propiedades fundamentales de los materiales.

Según un comunicado emitido por Casa Presidencial (2019) el desarrollo vial de nuestro país ha sido impactado de manera positiva con proyectos como la conexión con pasos a desnivel de Circunvalación, ampliación de la Ruta Nacional No. 32, ampliación y rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1 sección Limonal-Cañas, OBIS entre San José y San Ramón, entre otros. En la mayoría de estas obras se plantea o se construye estructuras de pavimento flexible, donde específicamente en la construcción del viaducto de Garantías Sociales se ha colocado geomallas como medida a reforzar la carpeta asfáltica, retardar el reflejo de grietas y mejorar el desempeño que tendrá la misma.

Por otra parte, según el Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica 2018-2019 (ERVN2018), al menos 1657,43 km requieren medidas correctivas relacionadas en colocar sobrecapas de mezcla asfáltica. Por ejemplo, en la Ruta Nacional No. 18 en mayo de 2020, se hizo una intervención en aras de mejorar la capacidad funcional de la vía y en el tramo intervenido se realizó un perfilado del pavimento existente, se colocó una geomalla y posteriormente la sobrecapa de mezcla asfáltica. Esto evidencia el uso de esta técnica también en labores de mantenimiento y conservación de la Red Vial Nacional.

De esta manera, el refuerzo con geomalla como medida a mejorar la capacidad funcional de la carpeta asfáltica a resistir esfuerzos a tensión, retardar el reflejo de grietas y por ende mejorar la capacidad de carga a fatiga de la estructura, da pie a la importancia de aproximar el desempeño que tendrá la misma hasta alcanzar la falla. La ecuación utilizada en nuestro país para identificar la cantidad de ciclos de carga que causan la falla no contempla el uso del geosintético mencionado y por esta razón, también es significativo identificar cual es el aporte real que tendrá dicho procedimiento.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Calibrar una ecuación de transferencia a fatiga para evaluar el desempeño de capas asfálticas reforzadas con geomalla en pavimentos flexibles de Costa Rica.

1.2.2. Objetivos específicos

- Examinar la investigación nacional y literatura internacional acerca de la mejora en respuesta mecánica de sobrecapas asfálticas reforzadas con geomallas, incluyendo especificaciones técnicas y construcción en campo.
- Aplicar la norma UNE-EN 12697-2: ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR).
- Desarrollar una ecuación producto de un análisis estadístico para predecir el desempeño a fatiga en carpetas de concreto asfáltico reforzadas con geomalla.
- Realizar un análisis de sensibilidad al modelo predictivo planteando distintas estructuras de pavimento.

1.3. Antecedentes

Un diseño de pavimentos empírico, como el aceptado de AASHTO 93 por nuestro país, ha dejado claro a los diseñadores que solo fue calibrado bajo condiciones ambientales determinadas, características de los materiales y condiciones de carga específicas, lo que puede provocar resultados y comportamientos de la estructura diferentes a las esperadas. Posteriormente se han desarrollado múltiples investigaciones que tratan de incorporar, mediante cálculos analíticos y procedimientos científicos, variables que predigan la respuesta de la estructura según acciones del clima, tránsito y propiedades elásticas de los materiales (Loría S. L., 2013).

En 2012 LanammeUCR incluye en su plan de trabajo una guía de diseño mecanicista-empírico calibrada para nuestra región, la cual ya hoy cuenta con variables de análisis como esfuerzos, deformaciones y deflexiones, así como funciones de transferencia de carga. Esta última convierte las respuestas del pavimento en la progresión del deterioro en el tiempo y su última calibración en 2016, tiene por parámetros de entrada el módulo dinámico, la deformación axial en la última fibra y la temperatura, todas referentes a la carpeta asfáltica. Mediante la misma, los diseñadores comparan la cantidad de ciclos de carga que causan la falla y los ejes equivalentes de diseño, con el fin de determinar que el diseño concebido sea correcto o cumpla. Sin embargo, cuando se refuerza la carpeta asfáltica con geomalla, esta ecuación no considera que aporte tendrá el mismo en su desempeño funcional, es decir, no cuantifica el aumento en ciclos de carga a fatiga que podrá soportar la estructura.

Cuando se utilizan geomallas en sobrecapas asfálticas, se genera un sistema intercapa (pavimento existente-material geosintético-sobrecapa) que contribuye al retardo en el reflejo de grietas, brinda refuerzo a la estructura y alivia los esfuerzos a los que es sometida, lo que puede generar una extensión de la vida útil de la estructura (Leiva, Utilización de geosintéticos en pavimentos como estrategia contra el reflejo de grietas, 2016). Debido a ello los proveedores de los materiales geosintéticos y otros autores como Koerner (2005), han desarrollado formas de cuantificar el efecto que tiene el incorporar este componente en capas de mezcla asfáltica y en el diseño de la estructura. Sin embargo, siempre están sujetas a realizar un ensayo determinado, contienen variables empíricas y no son basadas en una propiedad fundamental del material que sea estándar entre todas las marcas.

Adicionalmente, al utilizar geomallas como sistema intercapa en la construcción y rehabilitación de pavimentos flexibles, se muestra una carencia en demostrar cual será la justificación en utilizar dicha técnica, pues usualmente los contratistas solo cuantifican el daño por fatiga con la ecuación de MEPDG de la AASHTO y dejan claramente de lado el aporte del geosintético; esto también es producto de que no existe una forma clara y aceptada de como cuantificar dicho efecto. Usualmente se colocan simplemente para retardar el reflejo de grietas de capas inferiores hacia la superficie de la sobrecapa (Picado, 2018).

En la actualidad existen herramientas de software que simulan el comportamiento de la estructura de pavimento, facilitando realizar múltiples corridas y gran cantidad de modificaciones a distintas variables. Generalmente estos programas hacen uso del análisis de elemento finito (FEM por sus

siglas en inglés). Un ejemplo de ello es ABAQUS, que permite realizar cálculos estáticos lineales, no lineales y dinámicos. Este tipo de herramientas computacionales son de gran importancia para el desarrollo, modelación y calibración de ecuaciones capaces de aproximar el comportamiento de pavimentos de concreto asfáltico según propiedades índices de los materiales.

Los antecedentes nacionales que guardan relación con el tema que acá se desarrolla recae en trabajos finales de graduación, artículos científicos y publicaciones que divulgan información entre los diseñadores de pavimentos de Costa Rica.

- “Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas asfálticas en caliente”: es un artículo emitido por el LanammeUCR y realizado por Luis Guillermo Loria en conjunto con otros investigadores asociados (2004). Su línea de investigación es la calibración de un modelo que prediga la fatiga mediante múltiples curvas maestras de nivel de carga versus deformación unitaria, empleando el ensayo a flexotracción con vigas compactadas en laboratorio.
- “Análisis técnico sobre el uso de geomallas de refuerzo para la pavimentación y repavimentación de carreteras”: conforma el trabajo final de graduación de Sergio Alonso Alvarado Sánchez (2012). El estudio trata de la disminución de espesores de sobrecapas asfálticas mediante el uso de geomallas y que se relaciona con la disminución de ejes equivalentes de diseño.
- “Estimación de la dosificación apropiada de ligante asfáltico en la rehabilitación de pavimentos flexibles con uso de geosintéticos”: es la investigación realizada por Mario Solano Rodríguez como proyecto de graduación (2016). El autor estima experimentalmente la tasa de dosificación de ligante asfáltico en la rehabilitación de pavimentos de concreto asfáltico donde se emplea geosintéticos en la colocación de sobrecapas asfálticas.
- “Utilización de geosintéticos en pavimentos como estrategia contra el reflejo de grietas”: es un trabajo de investigación de Paulina Leiva Padilla para optar por el grado de maestría (2016). El objetivo general de la tesis se basa en estudiar el fenómeno del reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas reforzadas con un geosintético como medida de rehabilitación.
- “Evaluación de la resistencia a fatiga por reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos”: pertenece al trabajo final de graduación de

Mauricio Picado Muñoz (2018). La tesis analiza la resistencia a fatiga por reflexión de grietas en vigas de mezcla asfáltica reforzadas con geosintéticos a diferentes alturas, determinando así su ubicación óptima.

- “Análisis de desempeño de geosintéticos como sistemas intercapa en pavimentos flexibles”: realizado por Indira Katiyar Quirós como trabajo final de graduación. Su línea de investigación sigue la resistencia o capacidad de adherencia de especímenes de mezcla asfáltica reforzadas con geosintéticos.
- “Propuesta para la guía de diseño mecánica-empírica para pavimentos flexibles y semirrígidos de Costa Rica”: conforma la tesis de Eliécer Arias Barrantes como parte de su trabajo de graduación para optar por el título de maestría. En la misma se propone una metodología de diseño mecánico-empírica de pavimentos de concreto asfáltico basada en AASHTOWare (2015) y otras guías internacionales, pero adaptada a calibraciones de modelos nacionales y que aprovecha los conocimientos actuales de los diseñadores de pavimentos costarricenses.

Asimismo, se presenta a continuación la recopilación de los principales artículos, normas e investigaciones internacionales que poseen estrecha relación con modelos de fatiga en mezcla asfáltica y el uso de geosintéticos en recarpeteo de pavimentos flexibles y semirrígidos.

- “Funciones de transferencia de fatiga: ¿cómo se comparan?”: en documento de carácter científico que recopila modelos de transferencia a fatiga desarrollados hasta el año 2004. Los mismos han sido calibrados en función de parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, propiedades índices como el módulo dinámico y la deformación unitaria a tensión de la última fibra de la carpeta asfáltica. El trabajo fue desarrollado por Terhi K. en conjunto con otros investigadores (2004).
- “Resumen del estado del arte de sistemas intercapa-geosintético para retardar el reflejo de grietas”: es un documento que sintetiza el objetivo de colocar un geosintético en una capa intermedia del concreto asfáltico y cómo ha evolucionado este concepto en el tiempo. Se enfoca principalmente en la eficacia que se obtiene al usar geotextiles o geomallas como mecanismo de refuerzo. Este informe fue desarrollado por investigadores de la División de Ingeniería Geotécnica y la División de Ingeniería del Transporte de la India (2015).

- “Estudio comparativo de las leyes de fatiga en mezclas asfálticas convencionales haciendo uso de la viga de fatiga”: constituye el trabajo final de graduación de Josue Alfaro Velásquez, Mauricio Flores Alvarado y Cesar Martines Hernández (2016). Su objetivo fue caracterizar la respuesta ante daños por fatiga en vigas de mezcla asfáltica convencional mediante el ensayo de flexión a cuatro puntos.
- “AASHTO M288-17: Especificación estándar para la especificación de geotextiles para aplicaciones en carreteras”: consta de una normativa para el uso de geotextiles según su aplicación, la sección 10 presenta los requerimientos físico-mecánicos de geotextiles para ser empleados en pavimentación y repavimentación (2017).
- “AASHTO T321-17: Método estándar de prueba para determinar la vida de fatiga de mezclas de asfalto compactado sometidas a flexión repetida por flexión”: presenta el procedimiento para determinar la vida de fatiga y la energía de fatiga de vigas de concreto asfáltico y es la norma con la cual se ha calibrado el modelo a fatiga de Costa Rica.
- “Especificaciones estándar del Departamento de Transportes de California”: presenta en su sección 96-1.02L los lineamientos mínimos que debe cumplir la geomalla para su implementación en capas asfálticas (2018).
- “UNE-EN 12697-24: Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 24: Resistencia a la fatiga”. Consiste en una normativa europea adoptada por la Asociación Española de Carretera y que presenta los métodos para caracterizar la fatiga en mezcla asfáltica (2019).
- “Una revisión sobre el comportamiento mecánico y las consideraciones de diseño para pavimentos bituminosos rehabilitados y reforzados”. Este documento detalla y menciona los principales hallazgos en diferentes investigaciones sobre el uso de geosintéticos en pavimentos flexibles. Dicha investigación fue desarrollada Solatiyan E., Bueche N. y Carter A., expertos e investigadores de la Universidad de Québec y la Universidad de Ciencias Aplicadas de Berna (2020).

1.4. Metodología

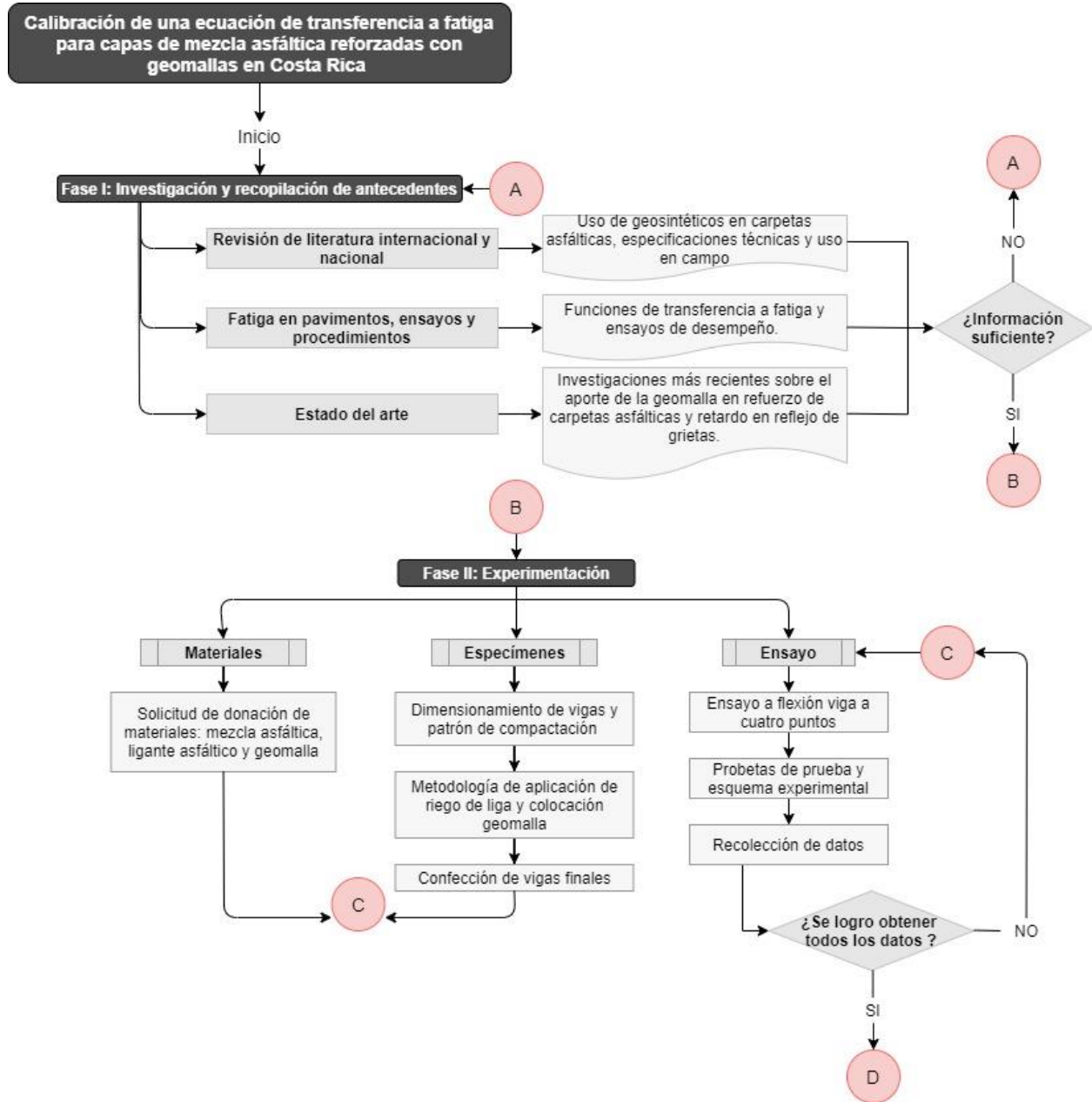


Figura 1. Diagrama de actividades Fase I y Fase II

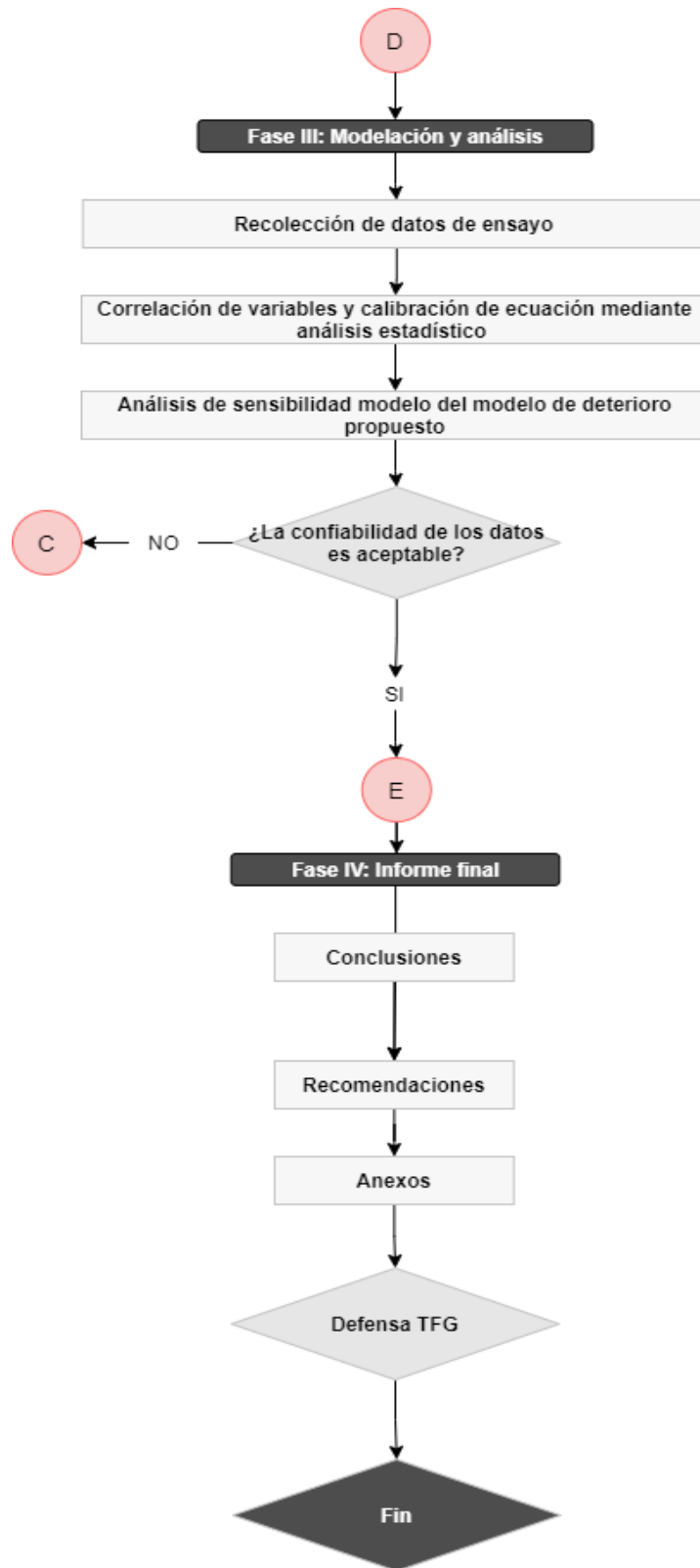


Figura 2. Diagrama de actividades Fase III y Fase IV

1.4.1. Fase de investigación y recolección de antecedentes

Se indagó en el tema de los geosintéticos en pavimentación, incluyendo normas internacionales y del país. Además, se investigó acerca de cuáles son los geosintéticos más usados para dicho fin, las propiedades físico-mecánicas que deben cumplir y los ensayos que se pueden aplicar según cada uso. Seguidamente se estudió la norma UNE-EN 12697-24 para vigas a flexotracción en cuatro puntos, con el fin de conocer el procedimiento del ensayo, limitaciones y datos que pueden ser obtenidos. Dicho esquema de montaje de ensayo será la que se aplique en el desarrollo de esta investigación, siguiendo las recomendaciones de Picado (2018).

De forma paralela se estudiaron las funciones de transferencia a fatiga que se han desarrollado hasta el momento por diferentes autores y que les permite a los diseñadores de pavimentos cuantificar los ejes equivalentes que producen la falla de la estructura. Para ello se recurre a tesis y artículos científicos. Asimismo, se realizó una revisión bibliográfica para determinar el estado del arte en el tema del uso de geomallas en sobrecapas asfálticas.

Por último, se realizaron trámites y solicitudes de permisos ante la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica y el LanammeUCR. De forma continua se recibió oportunamente capacitaciones por parte de este último ente.

1.4.2. Fase de experimentación

Los materiales que se utilizaron para la confección de especímenes son solicitados como donación a la Unidad Ejecutora del CONAVI y a una empresa constructora. Dichos materiales son mezcla asfáltica convencional, mezcla asfáltica modificada con butonal, ligante asfáltico y geomalla biaxial.

Para la confección de especímenes se siguió el siguiente procedimiento:

- Se calculó la cantidad de mezcla asfáltica a dosificar para alcanzar el 4% de vacíos en la probeta prismática. Para ello se utilizó el compactador de bloques de mezcla asfáltica del LanammeUCR, ver Figura 3a.
- Una vez realizados los bloques, se cortaron en capas de 5 cm desechando la capa del medio al tener dos caras lisas, ver Figura 3b y Figura 3c.
- Las capas de 5 cm fueron envejecidas durante 5 días a 60 ° C (Leiva, 2016), ver Figura 4a.

- Seguidamente se determinó el peso de emulsión asfáltica a dosificar (ver página 72) y una vez aplicado se deja romper para colocar la geomalla, ver Figura 4b y Figura 4c.
- Finalmente, para la sobrecapa asfáltica de 10 cm se calculó la cantidad de masa de cada tipo de mezcla asfáltica para alcanzar el 7% de vacíos. Una vez colocada se tiene la viga final a ensayar

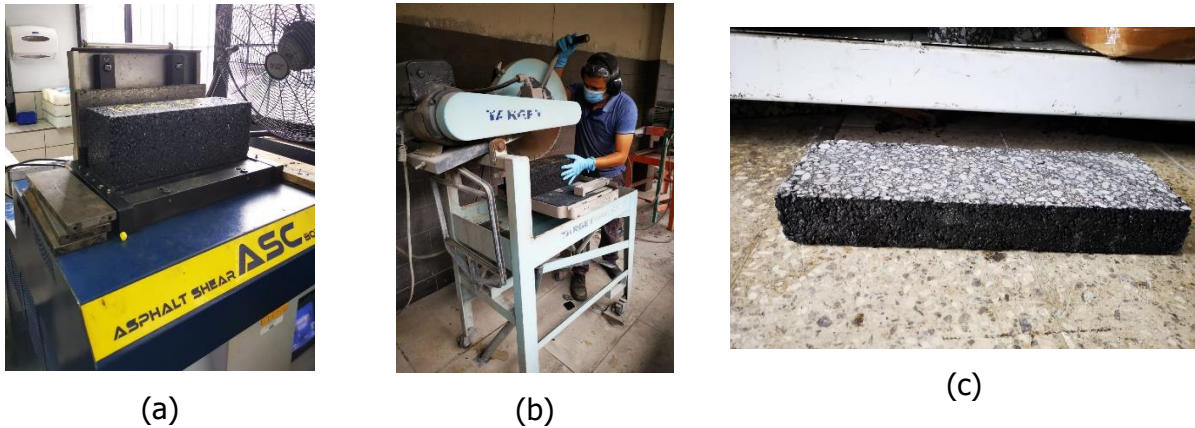


Figura 3. Elaboración de bloque de mezcla asfáltica (a) y corte en capas de 5 cm (b y c)

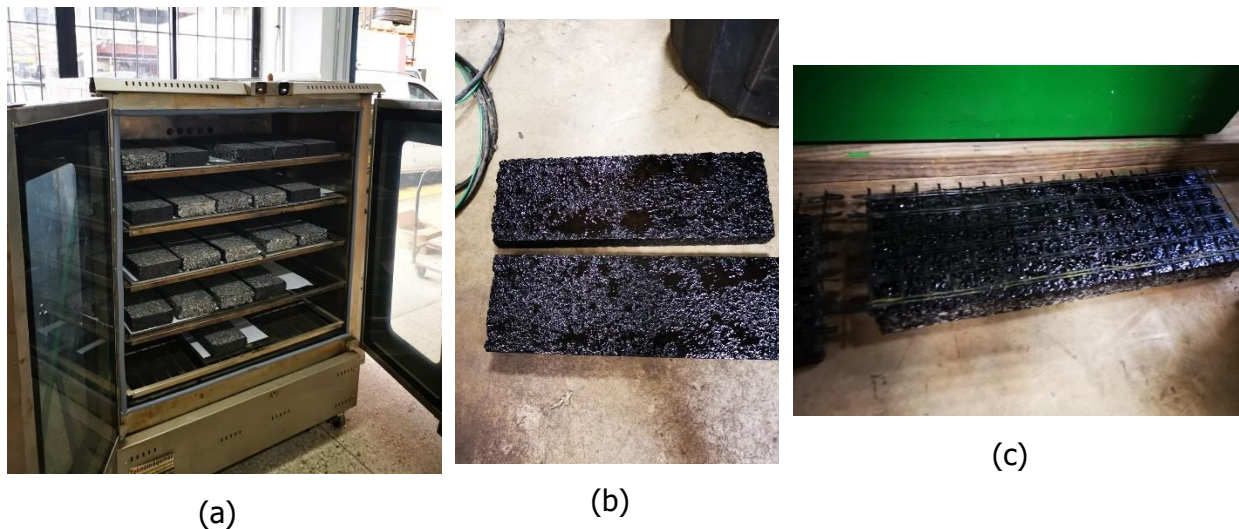


Figura 4. Envejecimiento de capas asfálticas (a), riego de liga (b) y colocación de geomalla (c).

Se confeccionaron 15 especímenes y se realizó el ensayo a esfuerzo controlado bajo una señal haversiana con descansos de 0,9 s, una frecuencia de 10 Hz y distintos rangos de carga que se encuentran entre los 0,45 kN y 15 kN. El esquema experimental se presenta a continuación.

Cuadro 1. Resumen esquema experimental

Norma	*Dimensiones	Cantidad	**MAC primera capa	***MAC segunda capa	Nomenclatura	Rango de Carga (kN)
Esquema de montaje Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR)	L=450 H=150 E=150	9	Mezcla convencional	Mezcla convencional	MC-C-1	0,45 a 13,0
					MC-C-2	0,45 a 13,0
					MC-C-3	0,45 a 13,0
					MC-C-4	0,45 a 14,0
					MC-C-5	0,45 a 14,0
					MC-C-6	0,45 a 14,0
					MC-C-7	0,45 a 15,0
					MC-C-8	0,45 a 15,0
					MC-C-9	0,45 a 15,0
		6	Mezcla convencional	Mezcla modificada con polímeros	MC-M-1	0,45 a 13,0
					MC-M-2	0,45 a 13,0
					MC-M-3	0,45 a 14,0
					MC-M-4	0,45 a 14,0
					MC-M-5	0,45 a 15,0
					MC-M-6	0,45 a 15,0

* L: largo, H: altura y E: espesor

** Espesor primera capa de 5 cm a 4% de vacíos.

***Espesor segunda capa de 10 cm a 7% de vacíos.

Nota 1: Todos los especímenes son reforzados con geomalla biaxial a un tercio de altura.

Nota 2: Se realizaron 3 especímenes de prueba previo a la falla.

Nota 3: Para todos los casos se usó un periodo de descanso de 0,9 s entre cada pulso de carga.

Para la etapa de falla de las vigas se siguió el siguiente proceso:

- Se realizó un análisis bibliográfico y un cálculo mediante el gráfico de Barksdale para determinar la frecuencia de 10 Hz del ensayo.
- Se estimó mediante un análisis de esfuerzos a flexión (en el rango elástico-lineal) y de la respuesta mecánica de una estructura real la carga mínima que fue ajusta luego de forma experimental, los rangos de carga finales son los del Cuadro 1.
- Se instrumentan las vigas con dos LVDT, ambos en la última fibra a tensión (horizontalmente en la cara frontal y la cara posterior, ver Figura 5a). El cuarto de ensayo tiene una temperatura de control de $21 \pm 0,5$ °C.
- Se fallan las probetas de prueba para verificar que los rangos de carga estimados produzcan las deformaciones unitarias esperadas. Las mismas siguen el esquema de montaje de la norma UNE-EN 12697-24:2019 para vigas en flexión a cuatro puntos (Figura

5b y 5c). Los pulsos de carga aplicados constan de ciclos de 0,1 s de carga y 0,9 s de descanso.

- Se recalcula la carga experimentalmente para existencia diferencias en la cantidad de ciclos de falla entre cada rango de carga.
- Se falla el restante grupo de vigas y se recolectan los datos respectivos.

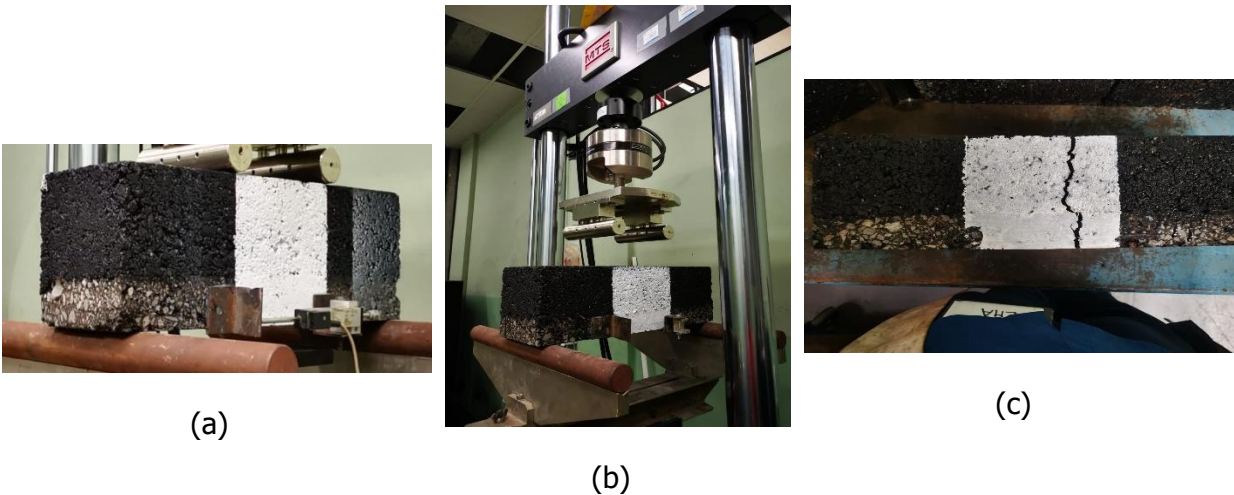


Figura 5. Colocación LVDT (a), montaje de ensayo (b) y falla del espécimen (c)

1.4.3. Fase de modelación y análisis

El análisis de resultados se realizó para cada nivel de esfuerzo, contrastando el desempeño a fatiga de los especímenes para cada uno de estos. Se representó mediante una curva ciclos a fatiga vs esfuerzo a tracción la relación que existe para cada grupo de vigas, esta representación se realiza para dichas variables linealizadas.

Con la recolección de datos de la fase experimental, se realizó un análisis estadístico que relaciona dos principales parámetros que median en la capacidad a fatiga de la carpeta asfáltica. Dicha regresión trae implícito el efecto del geosintético en la capacidad que tiene el espécimen a fatiga.

Para concluir esta etapa, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo de deterioro propuesto, de esta manera se determinó el impacto que tiene cada uno de los parámetros de la ecuación.

1.4.4. Fase de elaboración del informe final

En esta última etapa se documentaron los resultados finales y se prepararon las conclusiones, recomendaciones y anexos del proyecto de investigación.

Capítulo II: Marco teórico e hipótesis

Un pavimento, según lo define el Manual Centroamericano para diseño de pavimentos (2002), se trata de una serie de capas superpuestas, que se encargan de recibir las cargas de tránsito y clima y cuya capacidad estructural disminuye conforme crece la profundidad de la estructura. En general, las capas que lo conforman en forma decreciente son: la carpeta, la base granular, la subbase granular y la subrasante, siendo esta última como se mencionó anteriormente, la de menor módulo resiliente al tratarse del suelo existente o natural.

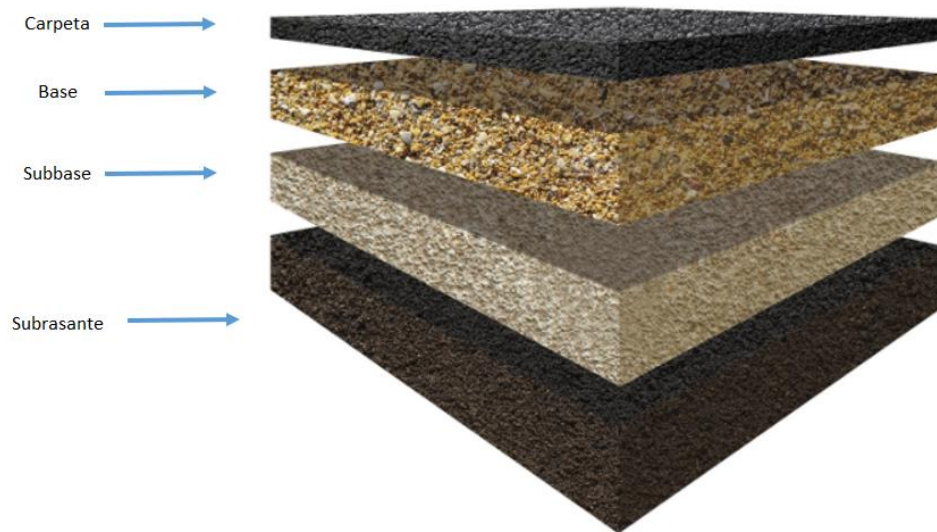


Figura 6. Estructura de pavimento típica
Fuente: Loría, 2017. Modificada por el autor

No obstante, la estructura de pavimento mencionada es más común cuando se habla de un pavimento flexible, donde la carpeta es de mezcla asfáltica. Este tipo de obras civiles, al contrario de edificios, represas hidroeléctricas o puentes, se diseñan de tal forma que se deterioren paulatinamente hasta llegar a su vida útil de diseño. Dicho método de diseño está en estado de transición, es decir, se está logrando pasar de una metodología empírica (la de AASHTO 93) a una mecanístico-empírica de mayor confiabilidad (propuesta conocida como CR-ME); donde se incluye ya variables del medio ambiente (humedad y temperatura) y respuesta del pavimento (esfuerzos y deformaciones de la estructura).

En términos del desarrollo de infraestructura vial, el ente encargado es el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). Según la Ley 7798 (ley que da creación a la entidad mencionada), en su capítulo I, artículo 1, establece que el mismo debe encargarse del mantenimiento rutinario y periódico, rehabilitación, reconstrucción, mejoramiento y construcción de obras nuevas de la red vial nacional. Además de ello, dicha entidad y las labores que esta realice, deben estar en concordancia con los programas que elabore la Dirección de Planificación del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y por lo que existen diferentes áreas dentro del CONAVI que tratan de llevar a cabo un adecuado sistema de gestión de pavimentos.

Cuando se habla de mantenimiento periódico o rehabilitación de vías, existen al menos 1657,43 km de la red vial nacional que requieren alguna intervención en aras de recuperar la capacidad funcional y/o estructural de la vía colocando una sobrecapa de mezcla asfáltica, esto según el Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica 2018-2019 (ERVN2018).

En este contexto, es usual detectar el reflejo de grietas del pavimento existente a la nueva sobrecapa, deterioro prematuro que provoca que la intervención no haya sido efectiva y da evidencia que la carpeta existente ya no posee capacidad estructural para soportar las cargas de tránsito (MOPT, 2016). No obstante, con el desarrollo de nuevas metodologías constructivas y la inclusión de nuevos materiales como los geosintéticos, es posible retardar el reflejo de grietas de capas adyacentes hasta la superficie.

Por otro lado, como parte de múltiples investigaciones y mediante cálculos analíticos y procedimientos científicos, existen ecuaciones que predicen la respuesta de la estructura según acciones del clima, tránsito y propiedades fundamentales de los materiales (Loría S. L., 2013). Sin embargo, al incluir geosintéticos como la geomalla para formar un sistema intercapa (pavimento existente-geomalla-sobrecapa de mezcla asfáltica) que contribuya al retardo del reflejo de grietas (Picado, 2018), es necesario cuantificar el aporte que tiene al daño por fatiga, objetivo principal que sigue esta investigación.

2.1. Geosintéticos en pavimentación

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) define en su norma ASTM D4439-20, que un geosintético es: "un producto plano fabricado de material

polimérico utilizado con suelo, roca, tierra u otro material relacionado con la ingeniería geotécnica, como parte integral de un proyecto, estructura o sistema creado por el hombre”.

Estos materiales están constituidos de polímeros tales como poliéster, poliestireno, cloruro polivinílico, entre otros. Debido a ello su comportamiento mecánico difiere y se debe evaluar cuál utilizar según los fines del proyecto. De manera reciente, se ha dado el uso de materiales geosintéticos en la rehabilitación de pavimentos, más precisamente cuando se colocan sobrecapas asfálticas, como lo mencionan Leiva (2016) y Picado (2018). Es por ello por lo que la investigación que acá se desarrolla gira en torno al tema mencionado.

Uno de los grandes expositores en el tema de diseño con geosintéticos, Rober M. Koerner, expone en su libro “*Designing with geosynthetics*” que las cinco principales funciones de estos materiales están en: separación, refuerzo, filtración, drenaje o sellado. Con ello, el siguiente cuadro muestra la recomendación del autor acerca de cuál geosintético es más ideal para desempeñar cada función (Koerner, 2005).

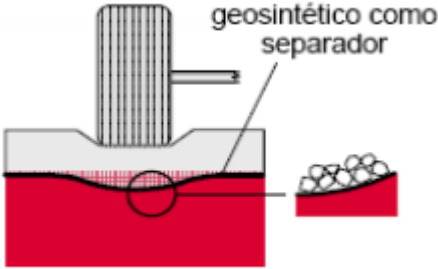
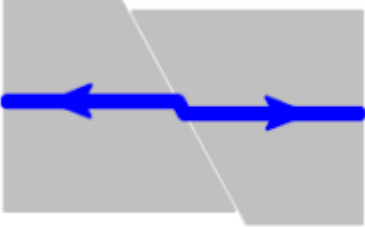
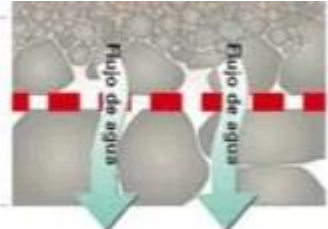
Cuadro 2. Funciones primarias de geosintéticos

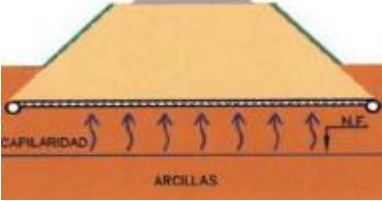

Tipo de geosintético	Función principal				
	Separar	Reforzar	Filtrar	Drenar	Sellar
Geotextil	x	x	x	x	
Geomalla		x			
Geored			x		
Geomembrana					x
Geocompuestos	x	x	x	x	x

Fuente: Koerner, 2005

Por otro lado, Díaz et al (2009), describe estas funciones como bondades que poseen los geosintéticos para la construcción de obras civiles, más específicamente enfocado a la construcción de estructuras de pavimento (ver Cuadro 3).

Cuadro 3. Descripción de las funciones de los geosintéticos

Función	Descripción	Imagen
Separación	<p>Usualmente se emplean geotextiles que permiten separar capas de una estructura de pavimento con diferentes propiedades y granulometría. Cuando no existe esta barrera, el paso de vehículos provoca movimiento de agregados en capas inferiores y eventualmente bombeo de finos hacia la superficie. Esto puede provocar disminución en la resistencia de las capas y su capacidad de drenaje.</p>	
Refuerzo	<p>Esta función, que desempeñan los geotextiles, geomallas y geoceldas, es de gran utilidad para estabilizar subrasantes, aumentar su capacidad de carga y no tener que usar material de préstamo. Cuando son usados en subbase o base, ayudan a reducir los asentamientos asociados a la dispersión lateral de los materiales por lo que contribuye a la redistribución de esfuerzos cortantes. Debe ser considerado la interacción geosintético-suelo, resistencia al daño mecánico, módulo de rigidez y resistencia tensionales.</p>	
Filtración	<p>El uso de geotextiles, cuyas propiedades de retención, permeabilidad y resistencia a la colmatación son de interés, permite que exista flujo de agua de la subrasante hasta la superficie, sin pérdida de partículas sólidas.</p>	

Función	Descripción	Imagen
Drenaje	El uso de geocompuestos en puntos relevantes de la estructura de la vía, permite la evacuación de aguas pluviales y evita el deterioro de la vía, así como el bombeo de finos. El geosintético debe tener una adecuada capacidad de descarga y resistencia al daño mecánico.	
Sellado	También llamada una función impermeable. Los geosintéticos actúan como barrera impermeable para los fluidos entre las capas adyacentes de pavimento y retención de suelos expansivos. Acá es útil el uso de geomembranas y geotextiles impregnados de asfalto, por ejemplo.	

Fuente: Díaz et al, 2010

2.1.1. Tipos de geosintéticos en rehabilitación de pavimentos flexibles

Según lo menciona Solano (2016) y Leiva (2017), en proyectos de rehabilitación de pavimentos, es frecuente el uso de materiales geosintéticos como geomallas y geotextiles. Su inclusión en sobrecapas asfálticas recae en sus propiedades mecánicas y en sus buenos resultados para mitigar el reflejo de grietas (al absorber parte de los esfuerzos a tensión en la carpeta asfáltica) producto de las cargas de tránsito. Dichos geosintéticos se describen a continuación:

- Geotextiles: según la norma ASTM D 4439-20, se define como un material permeable a base de textiles. Usados comúnmente en fundaciones, suelos, rocas, tierras y cualquier otro material relacionado con ingeniería geotécnica (ASTM-International, 2020).

Díaz et al (2009) lo define como un material plano, permeable y de apreciable deformabilidad. Están formados por fibras termoplásticas de diversos orígenes (poliolefinas, poliésteres y poliuretanos, son algunos de ellos) y se encuentran en dos grandes grupos: los tejidos y no tejidos.

- Geotextil tejido: formados por cintas entrecruzadas que puede ser unidas mediante máquina de tejer; las cintas en sentido longitudinal son de urdimbre y en sentido transversal de trama (Leiva, 2011). Generalmente se unen en ángulo de 90 grados,

capaces de resistir diversas condiciones de los suelos por su alta resistencia y bajas deformaciones.



Figura 7. Geotextil tejido

Fuente: Solano, 2016

- Geotextil no tejido: poseen filamentos unidos en forma regular o aleatoria, formando una lámina plana. Pueden ser unidos químicamente, mecánicamente o por calor. Su filamento puede ser cortada o continua (Díaz, Escobar, & Olivo, 2009). Es muy utilizado en terrenos poco uniformes debido a sus propiedades de separación y filtración.



Figura 8. Geotextil tejido

Fuente: Solano, 2016

- Geomallas: material polimérico con aberturas suficientes que generan trabazón con el suelo circundante. Sus características mecánicas y físicas varían en función de su composición química,

tecnología de fabricación y diferentes patentes en el mercado (Díaz, Escobar, & Olivo, 2009). Tienen gran aplicación y uso en el área de geotecnia y construcción de estructuras de pavimento.

La norma ASTM D5262 lo define como “un material formado por una red regular de elementos integralmente conectados con aberturas mayores a 6,3 mm o ¼ in, tal que permita enclavamiento con el suelo circundante, roca, tierra y otros materiales que lo rodean, cumpliendo una función de refuerzo” (ASTM-International, 2015).

De acuerdo con PAVCO (2016) los tipos de geomallas puede clasificarse, de acuerdo con su proceso de fabricación y sentido de mayor resistencia a la tracción, en uniaxiales, biaxiales y triaxiales.

- Geomallas uniaxiales: estructuras bidimensionales producidas a partir de polietileno de alta densidad (HPDE por sus siglas en inglés), mediante un proceso de extrusión seguido de un estiramiento unidireccional. Poseen una distribución de largas aberturas elípticas, obteniendo gran fuerza y módulo de tensión en dirección longitudinal. Son de gran uso como refuerzo de muros y taludes, terraplenes y la fabricación de geocolchones.



Figura 9. Geomalla uniaxial

Fuente: PAVCO, 2016

- Geomallas biaxiales: son producidas a base de polipropileno, químicamente inertes y con propiedades uniformes. Se confeccionan mediante un proceso de extrusión y luego estiradas en ambas direcciones, formando una estructura bidimensional con espacios regulares de alta resistencia. Sus aberturas generan trabazón entre agregados que permite distribución de esfuerzos, lo cual es útil para reforzar capas granulares de estructuras de pavimento. Además, es de utilidad en suelos blandos y terraplenes.



Figura 10. Geomalla biaxial

Fuente: PAVCO, 2016

Dentro de este grupo se encuentran las geomallas de fibra de vidrio, las cuales según esta casa fabricante (PAVCO), son útiles para el refuerzo de pavimentos asfálticos de tal manera que reducen la fisuración o agrietamiento reflexivo de carpetas asfálticas y aumentan su resistencia a la fatiga. En otras palabras, este geosintético aumenta la resistencia a la tracción de la carpeta asfáltica, distribuye de forma uniforme los esfuerzos verticales productos de las cargas de tránsito y ayuda a controlar las deformaciones plásticas.



Figura 11. Uso de geomalla de vidrio en recarpeteo de pavimentos flexible

Fuente: PAVCO, 2016

- Geomallas triaxiales: su geometría triangular brinda gran rigidez planar, distribuye las cargas en forma radial en todos los niveles dentro del agregado y estabiliza el material granular de forma mecánica. Fabricada con costillas de mayor espesor y con vértices

rectangulares, cuya junta hexagonal da mayor resistencia y rigidez permite mitigar la solitud de carga en la superficie (TENSAR, 2016).

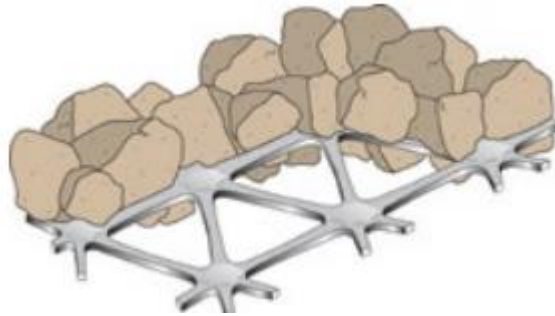


Figura 12. Geomalla triaxial

Fuente: TENSAR, 2016

2.1.2. Mecanismos de los geosintéticos en pavimentación y repavimentación

En el contexto de bondades que brindan el uso de geotextiles y geomallas y desde el punto de vista de estructuras pavimento y obras geotécnicas, PAVCO (2016) y Díaz et al (2009) mencionan una serie de ventajas y funciones (a parte de las mencionadas en el Cuadro 2), al emplear este tipo de materiales geosintéticos. No obstante, estas ventajas son más resaltables según la fabricación y composición del geosintético, por lo que siempre debe ser evaluado cual utilizar basado en la ficha técnica y especificaciones del proyecto.

-Geotextiles

- Conforman estructuras de suelo reforzado, tal que permiten aumentar el ángulo de inclinación en caras de taludes y terraplenes.
- Separación y estabilización de subrasantes en vías y cimentaciones.
- Filtración y separación en estructuras hidráulicas (muros de gaviones, canales, otros).
- Aumento en la vida útil de estructuras e incrementa en la capacidad portante.
- Absorbe diferencias de rigidez en la base de estructuras asfálticas.

-Geomallas

- Refuerzo de muros, suelos blandos, taludes y terraplenes.

- Refuerzo de pavimentos asfálticos tal que reduce la reflexión de grietas y aumenta la resistencia a la fatiga producto de el paso de vehículos en la capa de rodamiento. Incrementando de esta manera la vida útil de la obra civil.
- Genera trabazón entre los agregados en capas granulares, lo que reduce las deformaciones y optimiza la distribución de esfuerzos.
- Restringe el desplazamiento lateral de capas granulares como la base y subbase de una estructura de pavimento, lo que genera mayor confinamiento y resistencia.
- Buenas propiedades mecánicas, en este sentido poseen módulos de alta resistencia a la tracción, altos puntos de fusión y baja deformabilidad.

Por otra parte, según lo menciona Leiva (2017), en labores de manteniendo, rehabilitación o construcción de pavimentos flexibles y más específicamente cuando se trata de sobrecapas asfálticas, existen dos principales funciones o mecanismos al emplear geosintéticos en estas obras: refuerzo y alivio de esfuerzos

-Refuerzo: esta función hace alusión al retardo en el reflejo de grietas de capas adyacentes hasta la superficie o capa de ruedo, producto de la disipación de energía que poseen las mismas. Para dicho propósito es importante tener en cuenta la resistencia a la tensión y el módulo secante del material geosintético. Es común cuando se habla de capas gruesas, donde el sistema trabaja a tensión.

-Alivio de esfuerzos: esta permite que el geosintético absorba parte de los movimientos verticales y horizontales de las grietas, lo que se traduce en retardo en el reflejo de las grietas. Usualmente aplica para capas delgadas, donde el sistema no necesariamente trabaja a tensión.

Además, como menciona Nithin S. et al (2015), un geosintético como el geotextil impregnado de asfalto puede generar una barrera contra la humedad al reducir la permeabilidad en la capa intermedia del concreto asfáltico.

2.1.3. Normativa de geosintéticos en pavimentación y repavimentación

De acuerdo con la norma AASHTO M288-17: Especificaciones estándar de geotextiles para aplicaciones en carreteras, existen requisitos mínimos que debe cumplir el geotextil para ser utilizado en pavimentos de concreto asfáltico, según se muestra en el Cuadro 4. Los geotextiles tipo I son diseñados con bajo alargamiento y son fabricados con combinaciones de fibra de vidrios

y polímeros sintéticos. Por otra parte, los geotextiles tipo II son telas con mayor alargamiento y se fabrican con polímeros sintéticos.

Cuadro 4. Requisitos físico-mecánicos mínimos de geotextiles en pavimentación y repavimentación

*Propiedad	Normas de ensayo	Unidades	Tipo I	Tipo II
Resistencia al agarre	ASTM D 4632	N	-	450
Elongación última	ASTM D 4632	%	-	≥50
Masa por unidad de área	ASTM D 5261	g/m ²	125	140
Retención de asfalto	ASTM D 6140	l/m ²	**	**
Punto de fusión	ASTM D 276	°C	205	≥150

*Todos los valores numéricos son promedios mínimos por rollo (VMPR) y en la dirección principal más débil.

**Este valor debe ser brindado por el fabricante, así como el valor de retención de asfalto. La tasa de aplicación debe ser tal que garantice la saturación del geosintético y brinde la correcta adherencia entre capas asfálticas.

Fuente: AASHTO M288-17, 2017

Por otro lado, el Departamento de Transporte de California (Caltrans), contiene en sus Especificaciones estándar (2018), Sección 96-1.02L: Geomalla de pavimentación, los lineamientos mínimos que debe cumplir este geosintético para su implementación en capas asfálticas.

Cuadro 5. Requisitos físico-mecánicos mínimos de geomallas en pavimentación y repavimentación

Propiedad	Normas de ensayo	Unidades	Valor			
			*Clase I	**Clase II	**Clase III	
Apertura de rejilla	Calibrado	mm	12,7	12,7	12,7	
Resistencia a la tracción	ASTM D 6637	kN/m	Dirección longitudinal	197	98	49
			Dirección transversal	98	98	49
Elongación máxima	ASTM D 6637	%	12	12	12	
Masa por unidad de área	ASTM D 5261	g/m ²	542,5	339	186,5	
Punto de fusión	ASTM D 276	°C	≥163	≥163	≥163	

* Máquina en dirección perpendicular

**Máquinas en ambas direcciones

Fuente: Caltrans, 2018

En términos nacionales, el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR2010), detalla en la sección 714: Materiales geocompuestos y geotextiles para drenaje, que los geotextiles tipo VI son aquellos empleados en la pavimentación de carreteras y los requisitos mínimos, en cuanto a sus propiedades físico-mecánicas, se muestran en el Cuadro 6. Cabe destacar que dicho manual, que es de uso obligatorio en Costa Rica, no abarca o incluye el uso de geomallas para dicho fin.

Cuadro 6. Requisitos físicos para tejido de pavimentación

Propiedad	Normas de ensayo	Unidades	Tipo VI
Resistencia al agarre	ASTM D 4632	N	500
Elongación última	ASTM D 4632	%	50% en la ruptura
Retención de asfalto	ASTM D 6140	l/m ²	0,9
Punto de fusión	ASTM D 276	°C	150

Fuente: MOPT, 2010

2.1.4. Dosificación de ligante asfáltico es pavimentación y repavimentación con geosintéticos.

Dentro de una investigación realizada por la casa fabricante de geosintéticos, MACCAFERRI (2015), se recomiendan tasas de aplicación en campo basado en el gramaje del geosintético, ver Cuadro 7.

Cuadro 7. Tasas de dosificación recomendadas para geotextiles en sobrecapas asfálticas

Geosintético	Gramaje o peso nominal (g/m²)	Ligante asfáltico residual (l/m²)
Geotextil	120	0,60-0,80
	140	0,80-1,00
	150	0,80-1,00
	180	1,00-1,20
	200	1,10-1,30
	205	1,20-1,40
*Geomalla	275-300	0,20-0,45

*Posee poca o nula capacidad de absorción.

Fuente: MACCAFERRI, 2015

Por otro lado, relacionado con investigación nacional, Solano (2016) expone un su trabajo final de graduación, una serie de especímenes con diferentes geotextiles y geomallas embebidas dentro espécimen de concreto asfáltico que fueron sometidas al ensayo "Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la adherencia entre capas de pavimento, ALDOT-430".

Dentro de su tesis propone una ecuación para determinar la cantidad optima a dosificar de ligante asfáltico para geotextiles (para geomallas recomienda una tasa de 0,4 l/m²).

$$D = 0,077 + 5,703 \times 10^{-3} * G + 2,558 * \gamma$$

Ecuación 1

Donde,

D: dosificación de ligante asfáltico (l/m²)


G: gramaje del geotextil (g/m²)

γ : deformación máxima ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)

2.1.5. Ensayos en geosintéticos

Según los requerimientos o fines del proyecto, las propiedades del geosintéticos deben ser diferentes y estar acorde a las necesidades de este, de tal manera que se garantice un buen desempeño en la obra civil. Existen otros parámetros o propiedades físico-mecánicas que pueden ser evaluadas, como lo muestra el siguiente cuadro emitido en un boletín técnico por LanammeUCR: Uso de materiales geosintéticos en Costa Rica para el refuerzo de sobrecapas asfálticas (Rubio, 2021). En dicho cuadro se presenta la norma asociada a cada parámetro y una imagen que muestra el ensayo o esquema de este.

Cuadro 8. Ensayos en geosintéticos

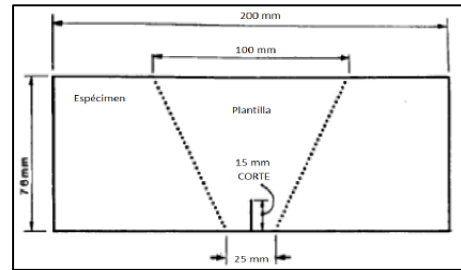
Norma	Parámetro	Esquema de ensayo
ASTM D 4632	-Resistencia al agarre de geotextiles (Método Grab)	
	-Resistencia al agarre de geotextiles (Dirección máquina y Dirección cruzada)	
	- Elongación última para geotextiles	
	-Resistencia de juntas cosidas en geotextiles	
	-Resistencia a rasgaduras de geotextiles	

Norma

Parámetro

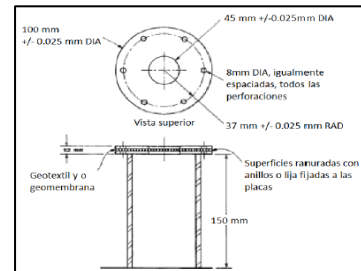
Esquema de ensayo

ASTM D 4533



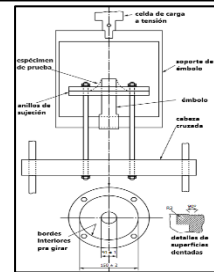
ASTM D 4833

-Resistencia al punzonamiento de geotextiles



ASTM D 6241

-Resistencia a la perforación estática de geotextiles



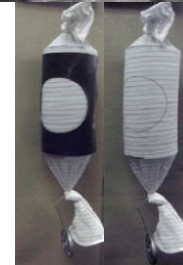
ASTM D 4491





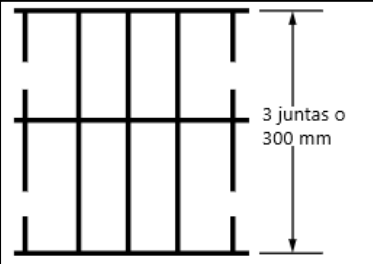
-Permitividad de geotextiles

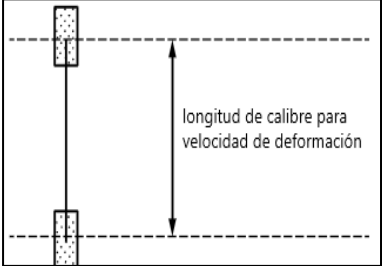


ASTM D 4751

-Abertura aparente de geotextiles



Norma	Parámetro	Esquema de ensayo
ASTM D 4355	-Resistencia a rayos ultravioleta de geotextiles	
ASTM D 6140	-Retención de asfalto en geotextiles	
ASTM D 5261	-Masa por unidad de área en geotextiles y geomallas	
ASTM D 276	-Punto de fusión en geotextiles y geomallas	(no hay foto en la norma)
ASTM D 3786	-Resistencia hidráulica al estallido en geotextiles	
ASTM D 6637	-Elongación última en geomallas	
	-Resistencia a la tracción en geomallas	

Norma	Parámetro	Esquema de ensayo
ASTM D 7556	-Propiedades de tensión en geotextiles y geomallas	

Fuente: Base de datos ASTM, 2020

2.2. Reflejo de grietas en pavimentos flexibles

La colocación de sobrecapas asfálticas constituye una de las principales labores de mantenimiento que se realizan en los pavimentos de Costa Rica, dicha capa en general se coloca en caliente y pueden reemplazar parte o la totalidad de la carpeta asfáltica. Este tipo de intervenciones pretenden recuperar la capacidad funcional de la vía, aunque también pueden aportar capacidad estructural a la estructura pavimento.

Cuando dicha técnica se ejecuta bajo un pavimento fatigado, es decir, que ya no posee capacidad estructural para soportar las cargas de tránsito, se genera el fenómeno de agrietamiento reflectivo. Estas grietas se van interconectando y afloran a la superficie hasta el punto de generar "cuero de lagarto". Además de provocar que la intervención no haya sido efectiva, se pueden generar surcos o huecos en la superficie de rodadura, lo que afecta claramente la serviciabilidad de la vía.

Como bien lo menciona el MAV (MOPT, 2016) además, existen otras causas para que ocurra dicho deterioro, como lo es acción repetida de cargas de tránsito, capas granulares agrietadas, ligante envejecido y/o drenaje inadecuado. Pereira (2002), enlista una serie de factores que propician o intervienen en la formación de grietas o fisuras en pavimentos flexibles:

- Fatiga: deterioro y agrietamiento de la capa asfáltica producto de la aplicación de un número de ciclos de carga mayor al de su diseño. Además, se ve más afectado por movimientos a baja velocidad de tránsito pesado, esto pues, a las propiedades viscoelásticas de la carpeta asfáltica y el principio de superposición tiempo-temperatura.

- Retracción: las variaciones climáticas, como la temperatura y precipitación, producen cambios cíclicos en la estructura de pavimento y esto combinado con capas estabilizadas, pueden provocar la retracción de la carpeta asfáltica y favoreciendo la aparición de fisuras.
- Movimiento de la base: son las diferencias en movimientos verticales entre las fisuras ocasionadas por efectos climáticos como humedad, expansión y asentamientos.
- Defectos constructivos: malas prácticas en campo, materiales no competentes y diseños poco confiables son algunas causas de este factor.

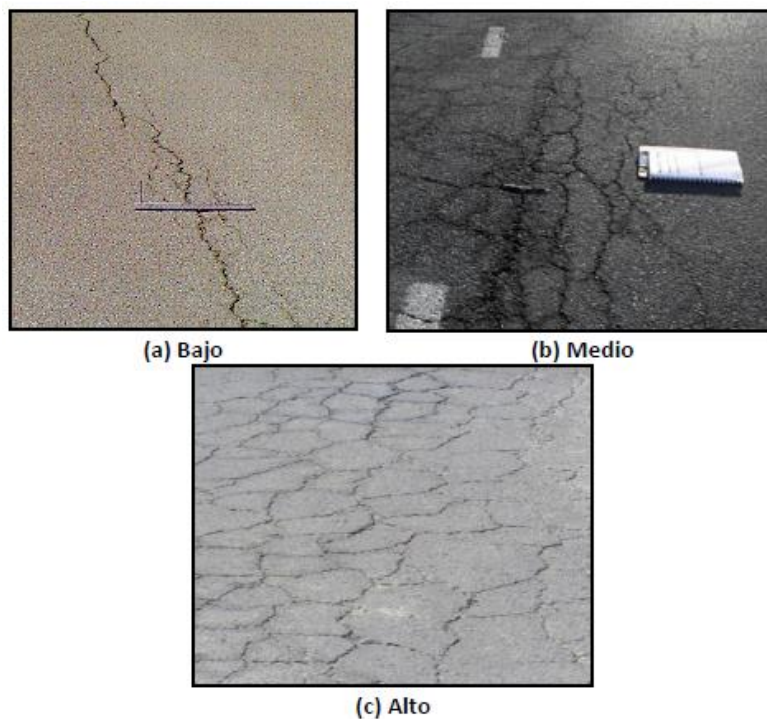


Figura 13. Cuero de lagarto según su grado de severidad

Fuente: MOPT, 2016

Basado en la mecánica de fractura, las grietas pueden ser propagadas mediante tres modos de falla, como lo menciona Loría (2008):

- Modo I (modo de apertura, I): también llamado modo de deformación y es resultado de cargas que se aplican normal o perpendicularmente al plano de la fisura (pueden ser cargas térmicas y de tráfico).
- Modo II (modo deslizante, II): también llamado modo de resistencia al corte vertical y es resultado de una carga de corte en el plano, esto provoca deslizamiento entre capas (lo pueden ocasionar las cargas de tráfico).

- Modo III (modo de desgarro, III): también llamado modo de resistencia al corte horizontal y es resultado de una carga de corte fuera del plano, lo que provoca un deslizamiento paralelo en ambas direcciones de la grieta. Este modo de carga es insignificante para pavimentos.

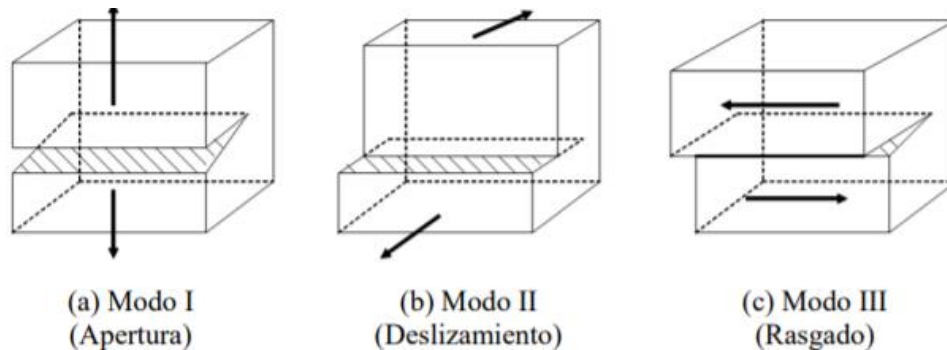


Figura 14. Mecanismos de propagación de grietas

Fuente: Loría, 2013

Hasta el momento se ha hablado de agrietamiento reflexivo y mecanismos de propagación de grietas, no obstante, también existen dos maneras en que la grieta puede transmitirse (Alfaro, Flores, & Martinez, 2016):

- Grietas ascendentes (*bottom-up cracking*): fisuración típica de fatiga, se produce por tensiones y deformaciones por esfuerzos a tracción en la última fibra de la carpeta asfáltica y que se reflejan hasta la superficie.
- Grietas descendentes (*top-down fatigue cracking*): fisuración que inicia desde la capa de ruedo hasta la base de la mezcla asfáltica. Este puede ocasionarse en pavimento de gran espesor y producto de tensiones combinadas de tracción y corte en la superficie de rodamiento.

Loría (2008) menciona que, como parte de su investigación, el aumento de espesor de la MAC (mezcla asfáltica caliente) o la inclusión de membrana capaz de absorber parte de los esfuerzos a tensión, puede reducir la magnitud de la superposición de las grietas. En el primer caso, el incremento de la dimensión de la carpeta asfáltica provoca una mayor capacidad a resistir carga y por ende mayor capacidad a absorber esfuerzos. Mientras que el uso de una membrana suficientemente flexible brinda a la estructura mayor capacidad de soportar tensión que se transfiere de una capa asfáltica existente a una nueva sobrecapa.

Estudios como el de Picado (2018), muestran como la inclusión de un geosintético como la geomalla o el geotextil, provoca un retardo en el que una grieta es reflejada a la superficie, es decir, existe una disipación de la energía y por ende un diferencial de tiempo en que el sistema intercapa logra mitigar la transmisión de dicha grieta hasta la superficie de rueda. No obstante, como lo menciona Katiyar (2018), la adherencia entre capas (capa existente y la nueva sobrecapa de mezcla asfáltica) debe ser evaluado al existir una superficie de falla definida en la ubicación del geosintético, efecto que se ve más agravado cuando se tiene menor área de contacto entre capas adyacentes.

Además, Leiva (2016) y Picado (2018), muestran en el Cuadro 9 la efectividad del geosintético a emplear basado en el tipo de grieta presente.

Cuadro 9. Eficacia de geosintético como sistema intercapa

Sistema intercapa	Cuero de lagarto			Agrietamiento en bloque, longitudinal y transversal (no térmico)	
	Fatiga	Oxidación baja a media	Oxidación media a alta	Bajo a medio (espesor < 0,5 in)	Alto (espesor > 0,5 in)
Geotextil	N	E	A	A	**A
Geoesfera	N	E	*E	B	**B
Geomalla	N	*E	*E	*E	*E
Geocompuesto	N	E	*E	E	**E

De forma abreviada se expresa si no se recomienda (N), excelente (E), adecuado (A) o bien (B), el uso de cada geosintético según corresponda.

*Intercapa con nivelación previa

**Intercapa con sello de grietas

Fuente: Leiva, 2017

Adicionalmente, un resumen del estado del arte presentado por Nithin S. et al (2015), menciona que, para la rehabilitación de carpetas asfálticas en pavimentos flexibles existe una masa por unidad de área mínima que debe cumplir el geotextil según directrices de la AASHTO. Para la selección de este geosintético, se debe realizar una evaluación de las condiciones en que se encuentra la superficie de rueda y relacionar el tráfico de diseño (ESAL) de la ruta a rehabilitar con el gramaje de este. El Cuadro 10 muestra los criterios mencionados para la selección del geotextil a utilizar, es decir, no es aplicable para otro tipo de geosintéticos.

Cuadro 10. Selección del geotextil según grado de deterioro de la superficie de ruedo

Grado del deterioro del pavimento	Calificación de las condiciones del pavimento	Deflexiones (mm)	Tráfico de diseño (ESAL)	Gramaje del geotextil (g/m ²)
Grado bajo	65-80	< 2,5	≤ 50 000	140 g/m ²
Grado intermedio	40-50	> 1,5	≤ 2 000 000	150 g/m ²
Grado alto	20-30	> 1,5	> 2 000 000	200 g/m ²

60-80: buenas condiciones, solo grietas longitudinales y cuero de lagarto ligeramente ásperos y desiguales

40-50: grietas longitudinales y cuero de lagarto pobre a moderado. Superficie es ligeramente rugosa e irregular.

20-30: malas condiciones, extenso cuero de lagarto con grietas longitudinales. Superficie muy rugosa y uniforme.

Fuente: Instituto de Asfalto, 1983. Modificado por el autor

2.3. Análisis de leyes a fatiga

El estudio del comportamiento a fatiga de materiales viscoelásticos como la mezcla asfáltica, es un proceso complejo donde varían condiciones intrínsecas y extrínsecas que pueden provocar resultados acelerados, lo cual se traduce en daños acumulativos mayores hasta que la estructura falla por completo.

Específicamente la fisuración y formación de grietas en carpetas asfálticas ha sido analizado por varios enfoques, los modelos de desempeño actuales pueden seguir estas distintas orientaciones, los más estudiados y comunes para su aplicabilidad se describen a continuación.

- Enfoque de energía disipada

Para materiales viscoelásticos ante la aplicación de cargas cíclicas bajo periodos de descanso, existe una parte de la energía empleada que es recuperada y otra disipada en forma de daño o calor. La energía disipada por cada ciclo puede calcularse como el área bajo la curva de cada ciclo histerético en el diagrama esfuerzo-deformación y matemáticamente viene dado por la siguiente ecuación (Vargas Nordbeck, 2014)

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \phi_i \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

W_i : energía disipada en el ciclo i

σ_i : nivel esfuerzo en el ciclo i

ε_i : nivel de deformación en el ciclo i

ϕ_i : ángulo de fase en el ciclo i

Este enfoque puede incluir energía disipada por comportamientos pasivos, como la energía térmica, lo cual no contribuye a la falla por fatiga y no debe considerarse. Como mencionada Vargas (2014) y basado en las investigaciones de Ghuzlan y Carpenter (2000), la razón de energía disipada RDEC (por sus siglas en inglés) se puede calcular incluyendo solo los mecanismos que producen daño de la siguiente manera:

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

RDEC: razón de energía disipada por ciclo de carga

RE_n : energía disipada en ciclo de carga "n" (kPa)

RE_{n+1} : energía disipada en ciclo de carga "n+1" (kPa)

Como parte de estos estudios, en la Figura 15 se muestra que la falla del material se da en tres etapas. La Fase I o parte izquierda decreciente muestra como RDEC desciende súbitamente debido al reacondicionamiento microestructural del material. La Fase II representa una zona constante del cambio en energía disipada (llamada Plateau Value o PV) y que se asocia a un daño acumulativo proporcionado y único para cada tipo de mezcla, modo de falla y nivel de carga. Finalmente, el inicio Fase III hace referencia a que el material ha alcanzado una reducción del 50% de su rigidez y por ende su falla, RDEC aumenta de manera significativa por cada ciclo extra de carga aplicado.

$$PV = \frac{\left[1 - \left(1 + \frac{100}{N_{f50}} \right)^f \right]}{100} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde,

N_{f50} : número de ciclos de carga que producen una reducción del 50% del material

f : pendiente de regresión entre DE y los ciclos sobre N_{f50}

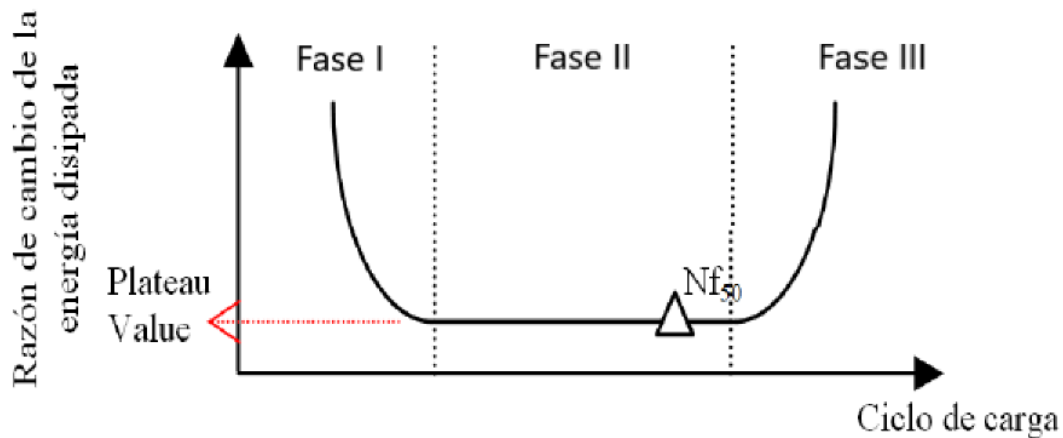


Figura 15. Relación entre razón de energía disipada y ciclos de carga

Fuente: Leiva, 2016

- Enfoque Ley de Paris

La ley de Paris es una herramienta de cálculo muy utilizada cuando existe ya un agrietamiento e interesa conocer la vida residual del material. Paris P. et al (1961) describe una ecuación diferencial que permite aproximar la tasa de propagación de una grieta basado en un factor de intensidad de esfuerzos, tal y como se muestra en la Ecuación 4 y Ecuación 5.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \text{Ecuación 4}$$

$$K = \beta\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

$\frac{da}{dN}$: es la tasa a la que se propaga la grieta, donde "a" es la longitud de la grieta y N el número de ciclos

ΔK : es el cambio en el factor de intensidad de esfuerzos, es decir, diferencia entre el máximo y mínimo.

C y m: constantes del material

β : tamaño y forma de la grieta

σ : esfuerzo aplicado

Como lo menciona Cicero et al (2015) y se describe en dicha Ley, su representación logarítmica permite detectar tres zonas, ver

- Zona I: región donde no se detecta propagación de grietas o pueden considerarse despreciables (zona umbral)
- Zona II: región lineal donde aplica la Ley de Paris (zona de propagación estable)
- Zona III: región donde la propagación se vuelve acelerada hasta alcanzar un valor crítico de $K_{\text{máx}}$ (zona de propagación inestable)

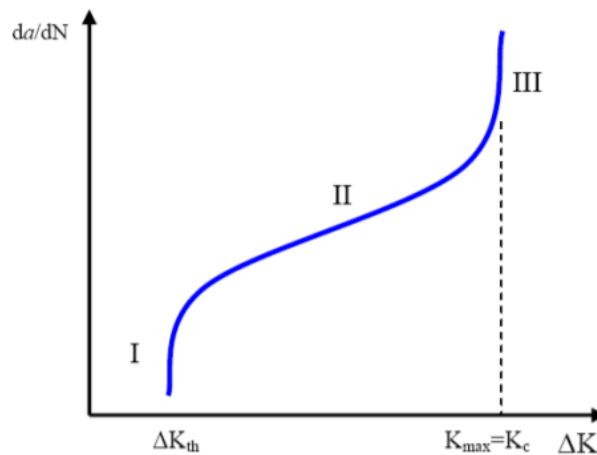


Figura 16. Curva Ley de Paris

Fuente: Cicero et al, 2015

Cabe mencionar que esta Ley es en esencia empírica y determina la fisuración del material en el rango elástico-lineal, por lo que de lado la parte plástica y en el caso de materiales bituminosos, la parte viscosa.

2.4. Proceso constructivo de sobrecapas asfálticas reforzadas con geosintéticos

Como lo expone Rubio (2021), la norma AASHTO M288-17 y basado es recopilaciones de trabajos finales de graduación nacionales y recomendaciones expuestas en la "Guía de inspectores colocación de sobre capas asfáltica" (Solórzano , Salas, Sequeira, & Loria, 2015); se presenta a continuación la metodología constructiva de colocación sobrecapas asfálticas empleando geosintéticos (geomallas o geotextiles). Consta de una serie de seis pasos que ejemplifican dicha labor, de tal manera que se eviten malas prácticas constructivas y que la intervención muestre así un buen desempeño.

1. Trabajos preliminares

- a) Reparar y corregir cualquier tipo de deterioro que esté sobre la superficie de la carpeta asfáltica. Se debe verificar las posibles medidas correctivas según criterio del ingeniero de proyecto, como, por ejemplo: perfilado, bacheo, sello de grietas, entre otros.
- b) Las grietas mayores a 6 mm deber ser selladas para que no se transmitan a la nueva capa asfáltica
- c) Se recomienda colocar una capa de prenivelación con métodos alternativos como microcapas o sellos asfálticos.



Figura 17. Aplicación de sellos asfálticos

Fuente: Asphaltpro, s.f

2. Preparación de la superficie

- a) Limpiar toda la superficie, asegurándose de eliminar cualquier material suelto, polvo, tierra o sustancias deletéreas o degradables que impidan o disminuyan una adecuada adherencia.
- b) La superficie debe encontrarse libre de humedad. El procedimiento nunca puede llevarse a cabo bajo lluvia, pues esto afecta directamente aspectos como la trabajabilidad de la mezcla asfáltica y disminuya la adherencia entre capas asfálticas.



Figura 18. Limpieza de superficie mediante barredora mecánica

Fuente: Solórzano et al, 2015

3. Aplicación del riego de liga

- a) Se recomienda mantener la temperatura de la emulsión asfáltica entre 55 °C y 70 °C, con el fin de dar una mejor trabajabilidad.
- b) Para el riego de liga, se debe calcular la cantidad óptima de emulsión asfáltica a emplear para evitar problemas de exudación o de adherencia. Es recomendable utilizar la tasa de dosificación sugerida por el fabricante del material geosintético a emplear. De no poseer este dato, se recomienda utilizar lo expuesto en la sección “2.1.4 Dosificación de ligante asfáltico es pavimentación y repavimentación con geosintéticos” de esta investigación.
- c) Realizar un paño de prueba con el fin de calibrar el ángulo, abertura, alineación y altura de las barras de distribución de asfalto (se recomienda revisar la guía: “Aplicación de riego de liga del LanammeUCR”) (Guerrero, y otros, 2019).
- d) Aplicar la emulsión asfáltica de forma continua y uniforme, de forma que se garantice una adecuada adherencia y no exista excesos de esta.
- e) Al utilizar geotextiles es importante colocar un 70% del riego de liga previo a la colocación del geosintético y la restante cantidad una vez instalado. En caso de geomallas se aplica toda la dotación de ligante asfáltico antes de su colocación y es recomendable usar una tasa de aplicación de 0,4 l/m² (Solano, 2016).
- f) Distribuir la emulsión en un ancho que exceda en 150 mm el ancho del material geosintético.

- g) Evitar que circulen vehículos sobre la emulsión antes de terminar la sobrecapa.
- h) Asegurarse que la emulsión cure por completo, con el fin de evitar problemas de adherencia o la pérdida del ligante cuando las vagonetas o la pavimentadora estén operando. El tiempo de ruptura se ve afectado por factores climáticos (temperatura, humedad y velocidad del viento) y aspectos relacionados con el proceso de aplicación. Por ello, es recomendable la construcción de un tramo de prueba donde se determine con mayor exactitud el tiempo de ruptura del riego de liga.



Figura 19. Aplicación uniforme del riego de liga

Fuente: Solórzano et al, 2015



Figura 20. Rompimiento de emulsión asfáltica

Fuente: Solórzano et al, 2015

4. Colocación del material geosintético:

- a) La instalación del material geosintético debe realizarse de forma manual, en caso de no tener equipo especializado para dicho fin, empleando una cuadrilla de al menos tres personas (dos manteniendo la alineación del rollo y desenrollándolo, y uno cepillando sobre el material geosintético, eliminando de esta forma al máximo las arrugas que se puedan generar).
- b) Se debe garantizar un correcto anclaje y planicidad con respecto a la superficie asfáltica existente con el fin de maximizar la superficie de contacto con la sobrecapa, tomando en cuenta el siguiente aspecto:
 - Si existen arrugas y dobleces menores a 25 mm se puede continuar con los siguientes puntos.
 - En caso de arrugas y dobleces mayores a 25 mm, deberán cortarse y aplanarse en sentido del avance de los equipos de pavimentación.
 - Si la arruga o doblez sobrepasa los 50 mm, este exceso deberá ser eliminado y aplanado. La corrección será por medio de superposición mínima.



Figura 21 . Anclaje de la geomalla

Fuente: Rubio, 2021

- c) Para eliminar arrugas y garantizar una mejor adherencia se recomienda una compactación de neumático con baja presión que aplique entre 2,80 kg/cm² y 3,60 kg/cm². Como medida alternativa se recomienda entre dos y tres pasadas a baja velocidad del

compactador para inducir la penetración de la emulsión asfáltica en el material geosintético.

- d) Proveer traslapes de 150 mm en la dirección transversal y de 100 mm en sentido longitudinal. El traslape de juntas transversales debe realizarse en la dirección de la pavimentación, de esta forma se evita el desplazamiento o levantamiento de los bordes de este cuando circule equipo sobre el mismo.

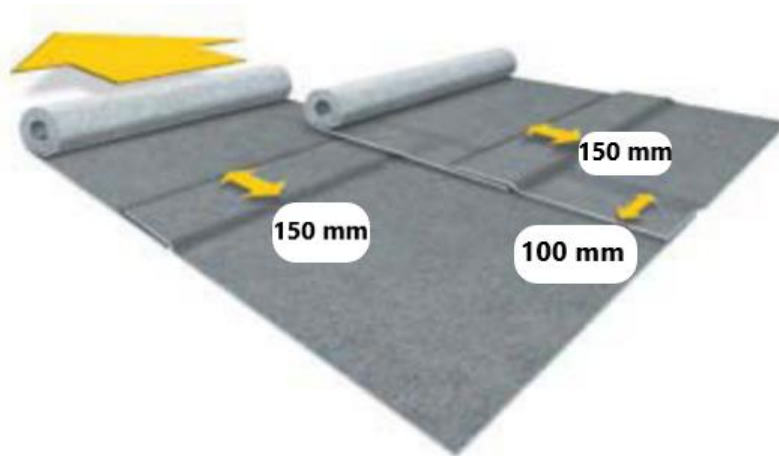


Figura 22. Traslapes mínimos del geosintético a colocar

Fuente: Alvarado, 2012 (Modificado por el autor)

- e) En el caso del geotextil, aplicar la emulsión asfáltica restante.
- f) Aplicar emulsión asfáltica adicional en los traslapes para una correcta adherencia. entre los materiales. Evitar la acumulación de excesos de emulsión y evitar excesos adyacentes.

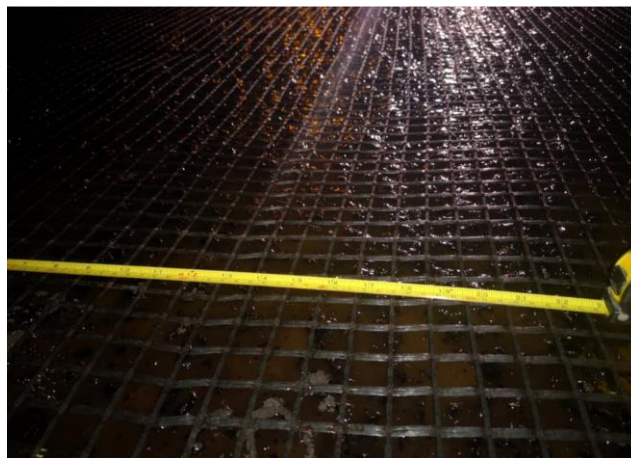


Figura 23. Acumulación y exceso de riego de liga

Fuente: Rubio, 2021

g) Cuando el material geosintético sea colocado en curvas, se debe fraccionar en rectángulos de forma que se arme la curva por segmentos.

Además, el siguiente cuadro muestra problemas que pueden surgir durante este proceso, incluyendo las causas y las soluciones que se recomiendan respectivamente

Cuadro 11. Soluciones a posibles problemas en campo

Problema	Causas	Soluciones
Arrugas	<ul style="list-style-type: none"> - Colocar el material geosintético sin alineamiento o tensión requerida. - Equipos transitando por el material geosintético. 	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurarse de que la cuadrilla instale el material de forma que se mantenga en línea recta y una adecuada tensión. - Minimizar el tránsito de vehículos sobre el material geosintético.
Las llantas de los vehículos están desgarrando el material geosintético	<ul style="list-style-type: none"> - Altas temperaturas del medio ambiente. - Exceso de emulsión - Exceso de tránsito de vehículos de construcción o públicos sobre el material instalado. - El pavimento está húmedo o saturado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Colocar mezcla o arena sobre la intercapa (barrer la arena antes de colocar la sobrecapa) - Eliminar el sobrante de ligante asfáltico. - Limitar el paso de equipo sobre la emulsión. - Secar el pavimento antes de colocar el geosintético. - Revisar la temperatura de colocación de la emulsión asfáltica.
Encogimiento del material geosintético cuando se coloca la emulsión asfáltica	<ul style="list-style-type: none"> Riego de liga a muy altas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Enfriar o esperar que se enfríe el riego de liga antes de aplicar el geosintético.

Problema	Causas	Soluciones
El material geosintético no está adherida al pavimento	- Emulsión fría, insuficiente emulsión o la misma no ha sido absorbida por la capa de prenivelación.	- Revisar la temperatura del ligante y la tasa de aplicación.
	- Superficie del fresado muy rugosa.	- Agregar capa de prenivelación o bacheo
	- El material se coloca con el lado incorrecto para abajo	- Revisar la colocación correcta del material según indicaciones del fabricante.

Fuente: Leiva, 2011

5. Colocación de la sobrecapa asfáltica

- a) Si se realiza una segunda aplicación de riego de liga, esperar que esta cure o rompa.
- b) No se debe colocar "traba", actividad que consiste en extender una capa delgada de mezcla asfáltica menor a 4 cm en el área a bachear, una vez que se ha aplicado el riego de liga.
- c) Verificar la temperatura de la mezcla asfáltica y colocarla en un plazo no mayor a 48 h posterior a la colocación del sistema intercapa, teniendo especial cuidado de no rasgar el material geosintético. El espesor de sobrecapa debe ser como mínimo tres veces el tamaño máximo nominal (TMN) de la MAC.
- d) La temperatura de la mezcla asfáltica a colocar como sobrecapa debe estar entre 120 °C y 160 °C. Una temperatura mayor puede ocasionar daños al material geosintético si este posee un punto de fusión cercano al de colocación de la MAC. Dicho procedimiento debe realizarse en capas menores a 10 cm y superiores a tres veces el tamaño nominal del agregado de la mezcla asfáltica.



Figura 24. Colocación de la sobrecapa asfáltica

Fuente: Alvarado, 2012

6. Compactación

- a) Compactar la sobrecapa mediante medios convencionales para garantizar una buena calidad del concreto asfáltico y la adherencia necesaria entre las capas.
- b) La compactación debe estar entre 92% y 97% de la densidad máxima teórica.



Figura 25. Compactación de sobrecapa asfáltica mediante compactador de tambor

Fuente: Alvarado, 2012

2.5. Metodología de diseño de sobrecapas asfálticas reforzadas con geosintéticos

En la actualidad no existe una metodología basada en principios mecánicos que permita obtener valores próximos a los reales del desempeño de un sistema intercapa (pavimento existente-material geosintético-sobrecapa), pues aún se deben desarrollar más investigaciones y generar criterios más técnicos. Dicho de otra manera, aun no se cuenta con una metodología de diseño mecanístico-empírica de sobrecapas asfálticas reforzadas aceptada y difundida entre los diseñadores de pavimentos.

Sin embargo, existen avances y propuestas para determinar el espesor de sobrecapa asfáltica a colocar incluyendo un geosintético. Una metodología de diseño desarrollada por Koerner (2005) permite determinar el aporte que tendrá el geosintético mediante un aumento en el número de ciclos de carga que causan la falla y no mediante una propiedad mecánica del material directamente. El diseño emplea factor de eficiencia del material geosintético (FEF), que es determinado mediante ensayos de laboratorio (AASHTO T321) y es suministrado comúnmente por el fabricante.

$$FEF = \frac{N_R}{N_N} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

N_R : número de ciclos que causan la falla, con refuerzo.

N_N : número de ciclos que causan la falla, sin refuerzo.

Los pasos de la metodología se enumeran a continuación:

1. Determinar el módulo resiliente de la subrasante y capas granulares, así como el módulo dinámico de la mezcla asfáltica.
2. Determinar los ejes equivalentes de diseño modificados por un factor FEF (DTN_r). Para ello es importante tener calculado previamente el número de ejes equivalentes de diseño (DTN_N , conocida comúnmente en el diseño de pavimentos como ESAL 's de diseño) de la ruta a la que se le realizará la intervención. Este paso es en el que se considera el aporte del geosintético y lo separa de diseño de sobrecapas asfáltica sin reforzar como el AASHTO 93 (ver Ecuación 7).

$$DTN_R = \frac{DTN_N}{FEF}$$

Ecuación 7

Koerner (2005) recomienda valores de FEF para geotextiles según su gramaje o masa por unidad de área (ver Cuadro 12). El valor recomendado para geomallas se muestra en el Cuadro 13, sin embargo, es limitado a la casa fabricante Geomatrix. Debido a ello, este dato es brindado por el proveedor o en su defecto debe determinarse mediante el ensayo AASHTO T321-17: Método estándar de prueba para determinar la vida de fatiga de mezclas de asfalto compactado sometidas a flexión repetida por flexión.

Cuadro 12. Valore recomendados de FEF para geotextiles

Geotextil	Gramaje (g/m²)	FEF
Sin refuerzo	-	1
No tejido punzonado de polipropileno	150	2,1
No tejido punzonado de poliéster	200	4,8
Tejido punzonado de polipropileno	200	6,8
Tejido punzonado de poliéster	170	5,8
No tejido termofijado de poliéster	108	15,9

Fuente: Koerner, 2005

Cuadro 13. Valores recomendados de FEF para geomallas

Geotextil	Rango FEF	FEF (sugerido)
Fortgrid Asphalt 140	1,3-1,5	1,4
Fortgrid Asphalt 160	1,5-1,8	1,6
Fortgrid Asphalt 300	3,0-3,5	3,2
Fortgrid Asphalt 700	4,0-7,0	7,0

Fuente: Geomatrix, 2019

- Basado en la confiabilidad, error estándar, número de ejes equivalentes de diseño modificado por el FEF, índice de servicio inicial y final, coeficientes estructurales y coeficientes de drenaje de las capas; emplear la metodología AASHTO 93 con el fin de determinar los espesores de las capas de la estructura de pavimento. En este paso es de interés el espesor de la carpeta asfáltica (t_d).

4. Medir en campo el espesor de pavimento existente (t_e). La diferencia de espesor entre carpeta asfáltica de diseño (t_d) y el espesor de concreto asfáltico existente (t_e), será el espesor de sobrecapa asfáltica a colocar (t).

$$t = t_d - t_e \quad \text{Ecuación 8}$$

Como parte de investigaciones desarrolladas en Costa Rica, también existe una propuesta de diseño más robusta y que considera propiedades fundamentales de los materiales. Leiva (2017) expone en su tesis una metodología de diseño de sobrecapas asfálticas reforzadas con geosintéticos y calibrada para Costa Rica. Además de determinar el espesor de sobrecapa a colocar, también considera la ubicación óptima del geosintético dentro de la carpeta asfáltica.

La calibración de la autora considera un total de 1152 combinaciones de propiedades geométricas y mecánicas de estructuras de pavimentos flexibles y geosintéticos. La metodología es aplicable a que la carpeta asfáltica existente posea un mínimo de 10 cm y la misma consta de una serie de pasos iterativos presentados a continuación:

1. Asumir un espesor de sobrecapa asfáltica h_{ac} (cm) para calcular las siguientes constantes. Este espesor debe ser al menos 3 veces mayor al TMN del agregado de la mezcla asfáltica que se utilizará en la rehabilitación de la vía.

$$C_2 = -2,40874 - 39,748 * \left(1 + \frac{h_{ac}}{2,54}\right)^{-2,85609} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$C_1 = -2 * C_2 \quad \text{Ecuación 10}$$

2. Despejar el valor N_f (número de repeticiones a fatiga) de la Ecuación 2.6. El porcentaje de área agrietada puede ser la propuesta por Arias (2020) y que proviene de recomendaciones de la AASHTOWare ME (AASHTO, 2015)

$$FC = \left(\frac{6000}{1 + e^{C_1 - C_2 * \log\left(\frac{N_f}{ESAL's \text{ diseño}}\right)}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde,

FC: agrietamiento por fatiga (% de área del carril)

Nf: número de ciclos que causan la fatiga

Cuadro 14. Umbrales de falla por porcentaje de área agrietada (grietas de abajo hacia arriba por fatiga)

Ejes equivalente período de diseño	Porcentaje de área agrietada antes de la falla (FC _{B-U-P})	Confiabilidad
< 3 millones	35%	75%
3-15 millones	20%	85%
> 15 millones	10%	95%

Fuente: Arias, 2020

- Determinar la deformación unitaria a tensión en la fibra inferior de la sobrecapa asfáltica $\epsilon_{t,sc}$ con la siguiente ecuación

$$\epsilon_{t,sc} = \left(\frac{18,39 * e^{-0,129*T} * \left(\frac{M_{ca,sc}}{3000} \right)^{-1,281}}{Nf} \right)^{\frac{1}{3,951}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde,

$M_{ca,sc}$: es el módulo dinámico de la sobrecapa de mezcla asfáltica a colocar (MPa)

T: temperatura del pavimento (°C)

- Determinar el espesor de sobrecapa requerida h_{sc} (cm) de la siguiente forma

$$h_{sc} = 8,252 * (M_{gs} * M_{ca,sc})^{-0,116} * (M_{ca,ex})^{0,164} * (M_{bg} * h_{bg})^{0,338} * (M_{sb} * h_{sb})^{0,0479} * (M_{sr})^{-0,0346} * (\epsilon_{t,sc})^{0,164} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde,

M_{gs} : modulo del geosintético (MPa)

$M_{ca,ex}$: módulo dinámico de la carpeta asfáltica existente (MPa)

M_{bg} : módulo resiliente de la base granular (MPa)

h_{bg} : espesor de la base granular (cm)

M_{sb} : módulo de la subbase granular (MPa)

h_{sb} : espesor de la subbase granular (cm)

M_{sr} : módulo de la subrasante (MPa)

5. Se debe iterar del paso 1 al paso 4 hasta que se encuentre la menor diferencia entre el espesor de sobrecapa supuesto y el requerido del paso anterior. Para ello se recomienda realizar tantas iteraciones hasta que se muestre que la diferencia crece de nuevo.
6. Finalmente, el espesor de carpeta asfáltica existente a dejar $h_{ca, ex}$ (cm) y donde se colocará el geosintético, se calcula como

$$h_{ca,ex} = \frac{h_{sc}}{3} \quad \text{Ecuación 14}$$

7. La carpeta asfáltica de la ruta intervenida será entonces, el espesor de concreto asfáltico existente ($h_{ca, ex}$), el geosintético y el espesor de sobrecapa asfáltica a colocar (h_{sc}).

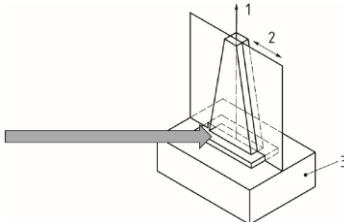
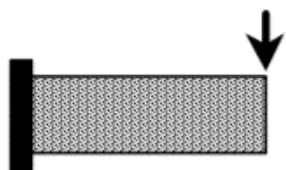
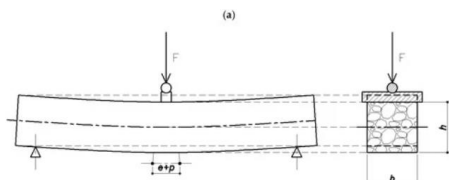
2.6. Ensayos de fatiga a flexotracción en mezcla asfáltica

Un ensayo de desempeño mide de una manera precisa los daños que se producen en el pavimento y determinan hasta qué punto estos son aceptables, de manera que no produzcan daños negativos y por consecuencia se vea afectado la calidad funcional de la vía. Evaluar la calidad de los materiales en una estructura de pavimento flexible permite determinar su competitividad para los requerimientos de un determinado proyecto; esto sucede de igual forma con la mezcla asfáltica, donde influyen aspectos como su contenido de asfalto, contenido de vacíos, granulometría, temperatura, humedad y otros (Alfaro, Flores, & Martinez, 2016).

Existen varios ensayos que permiten cuantificar la cantidad de ciclos de carga que puede soportar un espécimen de concreto asfáltico hasta su falla. Según Alfaro et al (2016), estos ensayos pueden aplicarse de dos formas: a esfuerzo constante (en cuyo caso la deformación aumenta linealmente) o a deformación constante (de forma análoga al caso anterior, el esfuerzo disminuye linealmente). Los ensayos a esfuerzo constante aplican para especímenes de mezcla asfáltica cuyo espesor supere las 6 pulgadas (15,24 cm). Si se trata de espesores menores a 2 pulgadas (5,08 cm), es recomendable un ensayo a deformación constante donde la deformación la soportan las capas subyacentes y no influye la disminución de rigidez de la mezcla asfáltica.

Como lo menciona Loría et al (2004) y basado en lo mencionado en el NCHRP 465, los ensayos de desempeño simple son: "Aquellos métodos de ensayo con que confiabilidad y precisión miden la respuesta de un parámetro o característica de la mezcla que está altamente correlacionada con la ocurrencia de un daño al pavimento (como por ejemplo la fatiga) en un rango de tráfico y condiciones climáticas". A continuación, se presentan aquellos ensayos que permiten determinar la vida útil de un espécimen de mezcla asfáltica sometido a fatiga mediante flexotracción, ver Cuadro 15.

Cuadro 15. Ensayos a flexotracción en especímenes de mezclas asfáltica

Ensayo	Norma		Esquema de ensayo	Dimensiones mm	Frecuencia de falla Hz
	Americana	Europea			
Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales (2PB-TR)	-	UNE-EN 12697-24:2019		Ver norma, dependiente del TMN	25 ± 1
Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas prismáticas (2PB-PR)	-	UNE-EN 12697-24:2019		Ver norma, dependiente del TMN	25 ± 1
Ensayo de flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas (3PB-PR)	-	UNE-EN 12697-24:2019		300 (± 10) * 50 (± 3) * 50 (± 3)	10

Ensayo	Norma		Esquema de ensayo	Dimensiones mm	Frecuencia de falla Hz
	Americana	Europea			
Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR)	AASHTO T:321	UNE-EN 12697-24:2019		$B/D > 3$ y $H/D > 3$ Donde D es el tamaño máximo nominal del agregado. B y D las dimensiones del área transversal	A definir entre 0,01 a 60 ($\pm 0,1$)
Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY)	-	UNE-EN 12697-24:2019		Ver norma, dependiente del TMN	Mínimo 400
Ensayo de tracción indirecta cíclica sobre probetas cilíndricas (CIT-CY)	-	UNE-EN 12697-24:2019		Ver norma, dependiente del TMN	10

2.7. Funciones de transferencia a fatiga en carpetas asfálticas

La fatiga en pavimentos flexibles es un fenómeno causado por el paso de cargas cíclicas (carga y descarga) que producen concentración de esfuerzos en la última fibra de la carpeta asfáltica. Como lo menciona el MAV (2016), por lo general el fisuramiento excesivo es un indicador de que el pavimento ya no tiene capacidad estructural para soportar las cargas de tránsito, es decir, este ha terminado su vida útil.

Parámetros de respuesta mecánica como los obtenidos por programas de análisis de pavimentos, son de insumo para determinar bajo modelos de deterioro, si el proyecto diseñado se mantendrá bajo los umbrales de falla y límites de aceptación, de tal manera que se asegure la vida útil y la

serviciabilidad de la vía. En contraparte, permite determinar el cambio de espesores de la estructura de pavimento o calidad de los materiales, para cumplir con los parámetros de aceptación.

Un diseño mecanicista fundamentado en teoría científica y comportamiento mecánico de los materiales aún es difícil de modelar, por lo que existen acercamientos con ecuaciones de transferencia de carga a fatiga. Estas funciones se han tratado de calibrar según diferentes características de la mezcla asfáltica, tomando en consideración propiedades mecánicas índice de este material, pero ninguna incluyendo geosintéticos.

La expresión más general de una ecuación a fatiga en mezclas asfálticas, bajo una escala logarítmica, tiene la forma de una ecuación lineal, donde los ciclos a fatiga están en función de la deformación unitaria a tracción (País & Minhoto, 2010).

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{k_2} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\text{Log}(N) = k_2 \text{Log}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) + \text{Log}(k_1) \rightarrow y = mx + b \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde,

N: número de ciclos que causan la falla

ε : deformación unitaria a tensión (mm/mm)

k_1, k_2 : constantes de la regresión lineal

Algunas investigaciones consideran que se debe tomar en cuenta la rigidez de la mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga del material viscoelástico, siguiendo la expresión que se muestra en la Ecuación 17 (Loría, Arce, Elizondo, & Aguiar, 2004).

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{k_2} \left(\frac{1}{E}\right)^{k_3} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde,

N: número de ciclos que causan la falla

ε : deformación unitaria a tensión (mm/mm)

E: módulo elástico mezcla asfáltica (MPa)

k_1, k_2, k_3 : constantes de la regresión lineal múltiple

Para esta última se ha calibrado el modelo por distintas organizaciones y centros de investigación, ver Cuadro 16. Por otra parte, el Cuadro 17 muestra un recopilado de las principales funciones que permiten predecir el desempeño que tendrá la carpeta asfáltica según distintos parámetros volumétricos y de respuesta mecánica de la estructura.

Cuadro 16. Coeficientes del modelo general a fatiga (Ecuación 17) de distintos centros de investigación

Organización	k_1	k_2	k_3
Instituto de Asfalto	0,0795	3,291	0,854
Investigaciones Shell	0,0685	5,671	2,363
Cuerpo de Ingenieros del Ejército de USA.	479,156	5	2,66
Centro Belga de Investigación de Carreteras	$4,95 \times 10^{-14}$	4,76	0
Laboratorio de Investigación en Transporte y Carreteras	$1,66 \times 10^{-10}$	4,32	0
Administración Federal de Carreteras (FHWA)	0,01	3,565	1,474
Departamento de Transporte de ILLINOIS	$5,00 \times 10^{-6}$	3	0
Ingenieros de investigación de Austin (ARE)	0,4875	3,0312	0,06529

Fuente: Ahmed, 2012. Modificado por el autor.

Cuadro 17. Modelos de transferencia de carga a fatiga

Modelo	Ecuación	Descripción de parámetros
	<u>*Esfuerzo controlado</u>	
Modelo SHELL (1980)	$\blacksquare N_f = (0,0252PI - 0,00126V_b + 0,00673V_b - 0,0167)^5 * \epsilon t^{-5} * S_m^{-1,8}$	N_f : número de ciclos de falla PI : índice de penetración V_b : volumen de aglutinante (%) ϵt : deformación por tracción S_m : módulo dinámico complejo de la mezcla (psi)
	<u>*Deformación controlada</u>	
	$\blacksquare N_f = (0,17PI - 0,0085PI * V_b + 0,04543V_b - 0,112)^5 * \epsilon t^{-5} * S_m^{-1,8}$	
Modelo Instituto de Asfalto (1982)	$\blacksquare N_f = A * 0,00432C * \epsilon t^{-3,291} * E * ^{-0,854}$ $\blacksquare C = 10^M$ $\blacksquare M = 4,84 * \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} - 0,69 \right)$	N_f : número de ciclos de falla $ E * $: módulo dinámico de la mezcla (psi) ϵt : deformación por tracción A : 18,4 FSF (factor de campo sugerido) C y M : factores de corrección volumétricos V_{beff} : contenido de asfalto (%) V_a : contenido de aire en la mezcla (%)

Modelo	Ecuación	Descripción de parámetros
Modelo SHRP (1992)	$\blacksquare N_f = 2,738 \times 10^5 * e^{0,077 * VFA} * \varepsilon_t^{-3,624} * (S'')^{-2,720}$	N_f : número de ciclos de falla ε_t : deformación por tracción VFA : vacíos llenos de asfalto (%) S'' : módulo de pérdida de compleja (psi)
Modelo WesTrack (2000)	<p>*Mezclas finas</p> $\blacksquare N_f = -27,0265 - 0,1439V_a + 0,4148P_{wasp} - 4,6894 \ln(\varepsilon_t)$ <p>*Mezclas gruesas</p> $\blacksquare N_f = -27,6723 - 0,0941V_a + 0,6540P_{wasp} - 0,0331T - 4,5402 \ln(\varepsilon_t)$	N_f : número de ciclos de falla V_a : contenido de aire en la mezcla (%) P_{wasp} : contenido de asfalto (%) ε_t : deformación por tracción
Modelo LanammeUCR (2016)	$\blacksquare MN = 18,39 * \left(\frac{\varepsilon}{200}\right)^{-3,951} * \left(\frac{E}{3000}\right)^{-1,976} * e^{-0,129T}$	MN : número de repeticiones de carga en millones ε : deformación por tracción (strain) E : módulo del material (MPa) T : temperatura (°C)

Fuente: Terhi K., Donald W., Geoffrey M. Rowe, y Mark S., 2004. Modificado por el autor.

2.8. Elementos que afectan la vida a fatiga en mezcla asfáltica

Como se mencionó en la sección 2.2 Reflejo de grietas de pavimentos flexibles de esta investigación; existen factores como la acción repetida y cíclica de cargas de tránsito, presencia de humedad, cambios de la temperatura ambiente y malas prácticas constructivas que pueden afectar la vida útil de la mezcla asfáltica, siendo estas causan en ocasiones de forma simultánea.

No obstante, existen propiedades intrínsecas de la mezcla asfáltica que perjudican su desempeño a fatiga. Como lo menciona Loría et al (2004), las propiedades volumétricas afectan significativamente la resistencia a fatiga del concreto asfáltico y por ende su durabilidad. Estos parámetros volumétricos son los siguientes (Loría, Arce, Elizondo, & Aguiar, 2004):

- Ligante asfáltico: un aumento es la cantidad de ligante asfáltico dentro de la mezcla asfáltica provoca que las partículas de agregado estén más recubiertas de asfalto y por ende que se puedan concentrar mayores esfuerzos a flexo-tracción en el ligante (esto pues, el agregado es mucho más rígido). Entre más gruesa esta película significará un menos esfuerzo al ligante.

- Contenido de vacíos: un alto contenido de vacíos de aire puede provocar ahuellamiento de la mezcla asfáltica y una menor vida a fatiga. Debido a que el aire atrapado no puede transmitir ningún esfuerzo, es reemplazado por ligante o agregado y se reduce el nivel de esfuerzo que es capaz de soportar. Un bajo contenido de vacíos reduce el ahuellamiento, aumenta la vida a fatiga y genera una estructura más homogénea.
- Vacíos llenos de asfalto: también conocido como VFA, este parámetro restringe la cantidad de vacíos de aire y se ha encontrado que una porosidad reducida incrementa la rigidez y resistencia de la mezcla asfáltica.
- Película de asfalto entre agregados: el incremento del contenido de ligante asfáltico y la reducción en la cantidad de vacíos de aire, propicia el contacto directo entre los agregados y transmite los esfuerzos de tensión a través del sólido. Gracias a ello las microgrietas provenientes de la última fibra a flexo-tracción se propagan más lentamente.

Existen factores externos que pueden perjudicar el desempeño de la carpeta asfáltica, entre ellos los dos siguientes (Salvador, 2012):

- Temperatura: esta variable modifica e influye en la resistencia a fatiga en mezclas asfálticas. Es decir, modifica el módulo de rigidez y lo aumenta cuando la temperatura es baja y disminuye cuando la temperatura crece. Experimentalmente se ha observado que a temperaturas como los 0 °C, 20 °C y 30 °C, el mejor comportamiento se registra a la mayor temperatura, pero debe tenerse en cuenta el efecto que esto produce en la deformación permanente.
- Humedad: existen elementos que provocan la degradación de un pavimento flexible producto de la presencia de humedad: pérdida de cohesión, fisuras por adhesión entre el agregado y el asfalto y fisuras de las partículas de agregados por efecto del hielo-deshielo.

2.9. Estado del arte en el uso de geosintéticos como sistema intercapa en pavimentos flexibles

El agrietamiento y la deformación permanente son los deterioros más comunes detectados en superficie de ruedo de pavimentos flexibles. La existencia de grietas permite la filtración del agua, debilitando la capa de ruedo y provocando que poco a poco se desprenda el material existente hasta llegar a capas inferiores, donde puede existir inclusive, pérdida del material de base de la estructura.

Una rehabilitación como el fresado de una superficie de ruedo y la colocación de una sobrecapa asfáltica, pretende restaurar parte de la capacidad estructural del pavimento y mejorar las condiciones de rugosidad y confort de la ruta. En estas condiciones el uso de un sistema de capa intermedia capaz de absorber parte de los esfuerzos a tracción mediante un geosintético, ha sido utilizado en distintas partes del mundo en los últimos 20 años, pues resulta ser una opción rápida, constructivamente sencilla y que ha generado buenos resultados en campo (Nithin, Rajagopal, & Veeraragavan, 2015). No obstante, a falta de un diseño estandarizado que refleje el efecto mecánico que tiene el uso de estos materiales, provoca que exista un sesgo en su uso o inclusive evita que este tipo de técnicas se realicen.

En la actualidad un modelo teórico capaz de predecir el comportamiento del agrietamiento reflectivo en capas de mezcla asfáltica ha sido difícil de desarrollar debido a la gran variedad de causas y parámetros que pueden dar origen a este deterioro. Adicional a ello, evaluar dichas condiciones con la inclusión de materiales geosintéticos como sistema intercapa genera aún menos precisión en el uso de modelos o ecuaciones empíricas desarrolladas para determinar la vida a fatiga de la carpeta asfáltica (Solatiyan, Bueche, & Carter, 2020).

Como bien se menciona en el artículo de Solatiyan E. et al (2020) y se señaló en la sección 2.1; en rehabilitaciones de carpetas asfálticas pueden emplearse geosintéticos como geotextiles y geomallas, sin embargo, puede utilizarse también un híbrido entre estos conocidos como geocompuestos; los cuales reúnen diferentes características mecánicas de ambos. Según dicho autor, la geomalla aporta 2,5 veces más refuerzo que los geotextiles y varios estudios realizados por distintos autores contienen conclusiones importantes acerca del uso de estos geosintéticos en la vida a fatiga de la carpeta asfáltica, ver Cuadro 18.

Cuadro 18. Estudios sobre el efecto en la vida a fatiga de sobrecapas asfálticas empleando geosintéticos

Investigadores	Tema de investigación	Tipo de prueba	Mayores descubrimientos
Safavizadeh et al.	Estudiar el efecto del hormigón asfáltico reforzado en vigas con fibra de vidrio sobre fisuras reflectantes.	Ensayo de flexión de viga con muescas a cuatro puntos	La vida de una fatiga se prolonga mediante la aplicación de una capa de adherencia de alta calidad en la interfaz.
Cho et al.	Examinar la resistencia al agrietamiento de pavimentos		1. Una carga grande de fatiga resulta en un efecto de bajo reforzamiento.

Investigadores	Tema de investigación	Tipo de prueba	Mayores descubrimientos
	bituminosos incluyendo revestimientos de asfalto reforzado con hoja de fibra de vidrio.	Ensayo de flexión de viga a tres puntos	2. La vida de la fatiga en una capa de asfalto reforzados es entre 6 y 10 veces mayor que una capa no reforzada.
Arsenie et al.	Investigación de laboratorio del comportamiento a fatiga de la capa de asfalto reforzado con geomalla de fibra de vidrio.	Ensayo de flexión de viga a cuatro puntos	En especímenes reforzados: 1. Mejora de la vida de fatiga (Nt) por un 50% 2. Incremento de la tensión en falla por fatiga durante 10^6 ciclos a un 10,52 % 3. Incremento en b (la pendiente de la curva de fatiga) arriba de 11,55 %
Polidora et al.	Estudiar los efectos de la inclusión de geosintéticos entre diferentes capas de asfalto y localizaciones.	Ensayo en vigas a cuatro puntos con muescas	1. En un modo de prueba estático, los especímenes reforzados con geosintéticos en dos capas poseen una alta resistencia contra la falla de fatiga comparada con los especímenes de una capa sencilla reforzados y los no reforzados. 2. Según la ley de Paris, en un modo cíclico de prueba, los especímenes de doble capa reforzados la menor tasa de crecimiento en grietas.
Kumar and Saride	Estudiar el comportamiento de flexión de vigas de asfalto reforzado con tres diferentes tipos de geogrillas por una técnica de Correlación de Imagen Digital (CID)	Ensayo de viga a cuatro puntos	1. La técnica CID es un método útil para estudiar la formación y evolución de grietas por fatiga. 2. Las estructuras reforzadas con geogrillas hechas con poliestireno tienen 22 veces una vida de fatiga más alta comparada con la aplicación de fibras fabricadas con materiales de GeoJute.
Fakhri et al.	Aplicación de un enfoque mecanicista para explicar la propagación de grietas en especímenes reforzados con geosintéticos.	Ensayo de viga a cuatro puntos	1. Según la fatiga versus a la evolución del daño de curvas, las sobrecapas reforzadas tienen una tasa más baja de propagación de grietas. 2. Los especímenes reforzados con bajos niveles de deformación de geotextiles y altos niveles de deformación de geogrillas poseen la menor tasa de propagación de grietas.
Požaryckia and Garbowski	Investigación del tipo de geosintético sobre la vida de la fatiga de la capa de asfalto reforzado	Dispositivo de fuerza Schenck	La vida útil de la capa de asfalto se extiende en un 16% en el caso de la geomalla y arriba de 35% para un geocompuesto.

Investigadores	Tema de investigación	Tipo de prueba	Mayores descubrimientos
Nguyen et al.	Examinación de campo de estructuras de pavimento con y sin rejilla de vidrio a través de pruebas de facilidad de pavimento acelerado de IFSTTAR para comparar las respuestas estructurales bajo carga de tráfico.	Investigación de campo de la respuesta estructural tomando ventaja de las galgas extensiométricas instaladas en la geomalla.	La ubicación de una cuadrícula cerca de la parte inferior de la capa de asfalto mejora notablemente la vida útil de la fatiga del sistema.

Fuente: Solatiyan E., Bueche N. & Carter A., 2020

No obstante, aún con las investigaciones realizados y los modelos numéricos desarrollados, existen discrepancias con respecto al comportamiento mecánico de la estructura de capas reforzadas en campo. Una causa fundamental de esta diferencia es que aún deben realizarse más investigaciones acerca del comportamiento de la interfaz del pavimento existente, geosintético y capa asfáltica adyacente en presencia de distintas condiciones de contenido de humedad, tasa de carga, temperatura y una propiedad mecánica índice que describa la capacidad fisco-mecánica del geosintético bajo cargas cíclicas (Solatiyan, Bueche, & Carter, 2020).

Los resultados experimentales de los distintos investigadores y como es bien mencionado por Solatiyan E. et al (2020), el refuerzo de capas intermedias de mezcla asfáltica beneficia la vida a fatiga de la estructura, seguido de un retardo en el reflejo de grietas y finalmente el ahuellamiento. A tempranas edades de una estructura de pavimento recién construido no se espera un gran aporte del geosintético, pero conforme la mezcla asfáltica vaya perdiendo capacidad estructural, el material tendrá una mayor participación como alivio de esfuerzos y refuerzo. Sin embargo, debe estudiarse de manera más clara como y en qué forma se distribuyen los esfuerzos y deformaciones con la inclusión de este material, siendo este un beneficio en el comportamiento mecánico de la estructura.

Desde el punto de vista de la mecánica de la fractura y enfocándolo a este tipo de estructuras con carpetas asfálticas reforzadas con geosintéticos; cuando existe una disipación de energía que proviene de una grieta, su transmisión hacia la superficie se retarda al propagarse de manera paralela a la interfaz del sistema; este caso ha sido ampliamente estudiado por diferentes investigadores y sus hallazgos generan una mayor comprensión de este tipo de mecanismos, ver Cuadro 19.

Cuadro 19. Estudios sobre el efecto de los geosintéticos en el agrietamiento reflectivo en sobrecapas asfálticas.

Investigadores	Tema de investigación	Tipo de prueba	Mayores descubrimientos
Safavizadeh et al	Estudiar el efecto del asfalto reforzado en vigas de concreto con rejilla de fibra de vidrio en agrietamiento reflectante.	Ensayo de vigas con muescas a cuatro puntos.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Varias condiciones intercapa no reflejan un único mecanismo de falla. 2. Las vigas de asfalto reforzado se comportan mejor que las no reforzadas.
Moghadas Nejad et al.	Examinar el efecto de los geosintéticos en la propagación del agrietamiento reflectivo en la sobrecapa de asfalto reforzado tomando en cuenta la influencia de ancho de la grieta, tipo de geosintético, temperatura y sus interacciones.	Carga cíclica aplicada por la máquina de prueba dinámica servo-hidráulica UTM-25.	<ol style="list-style-type: none"> 1. La geomalla supera al geotextil en el retraso del agrietamiento reflectante. 2. La temperatura es el factor mayor influyen en el número de ciclos a fallar (Nf) debido al agrietamiento reflectivo seguido del tipo de geosintético.
Moghadas Nejad et al.	Simulación de laboratorio de la iniciación y propagación del agrietamiento reflectivo.	Viga de dos capas con muescas cargadas por una placa bajo carga cíclica haversiana.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Los módulos altos geosintéticos son más eficientes en sobrecapas delgadas de asfalto. 2. En sobrecapas reforzadas, el número de ciclos antes de la falla, la velocidad de la propagación de grietas, la tasa de desplazamiento en la parte inferior de la capa son todos dependientes del módulo geosintético.
Khodaii et al.	Estudiar el efecto de los factores influenciados como la temperatura, posición de la geogrilla, tipo de casa existente en la propagación del agrietamiento reflectivo.	Carga repetida aplicada por un marco dinámico e hidráulico de carga.	La colocación de la geogrilla en un tercio de la profundidad desde la parte inferior de la capa de asfalto conduce a una mayor mitigación del agrietamiento reflectante.
Sobhan et al.	Estudiar el efecto de la colocación de geosintético en sobrecapas de asfalto en la propagación del agrietamiento reflectivo y en la deformación permanente.	Viga con sobrecapa de asfalto ubicada sobre una junta y cargada por una máquina servo-hidráulica MTS en dos condiciones diferentes: i) Ensayo estática para simular la iniciación y propagación del agrietamiento reflectivo. ii) Ensayo cíclico para evaluar el comportamiento de la fatiga.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Los especímenes reforzados superan a los no reforzados en términos de agrietamiento reflectivo y surcos. 2. La respuesta mecánica mejorada de la sobrecapa de asfalto reforzado es fuertemente dependiente de la adherencia confiable en la interfaz. 3. La colocación más profunda de geosintéticos en las sobrecapas de asfalto conducen a una extensión de la vida de la fatiga e incrementan la resistencia a los surcos.
Ling et al.			

Investigadores	Tema de investigación	Tipo de prueba	Mayores descubrimientos
	Estudio de laboratorio tanto del tráfico como del agrietamiento reflectivo inducido térmicamente en sobrecapas de asfalto reforzado con geotextil, SAMI, y polipropileno atáctico tomando en cuenta el efecto de la temperatura, combinación de carga, tipo de mezcla y esfuerzo de compactación.	Un novedoso dispositivo desarrollado llamado Sistema de Simulación de Movimiento Articular (SSMA por sus siglas en inglés)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Consideración separada del efecto de las cargas verticales y horizontales en la iniciación y propagación del agrietamiento, genera un mayor número de ciclos hasta la falla, lo que puede ser sobrestimar la vida útil real 2. La tasa de propagación de grietas es no lineal, lo que significa que en la primera etapa crece rápidamente, seguido de una tasa menor en etapas posteriores 3. En comparación, el geotextil puede retardar eficazmente el agrietamiento reflectante
Solatiyan et al.	Evaluación de laboratorio de telas empleada en pavimentación para mitigar el agrietamiento reflectivo	Prueba de flexión en tres puntos con muescas y nuevo dispositivo de ensanchamiento de grietas (CWD por sus siglas en inglés)	<p>Los especímenes reforzados tienen</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Tres veces menor ancho en la grieta reflejada en la superficie 2. Un 60% más en el índice de resistencia al agrietamiento
Saride and Kumar	Se examino el comportamiento mecánico de las capas de mezcla asfáltica pre-agrietadas reforzadas con geosintéticos	Ensayo de vigas con muescas a cuatro puntos.	<p>Las capas intermedias reforzadas con alta resistencia a la tracción y al corte, tienen un mayor potencial para controlar el agrietamiento reflectivo</p>
Torre et al.	Estudio de la influencia de distintos tipos de geosintéticos, temperatura y cargas de tránsito para controlar el agrietamiento reflectante	Ensayo de flexión de tres puntos bajo una combinación de cargas sinusoidales y triangulares	<ol style="list-style-type: none"> 1. El tipo de capa intermedia controla su efecto positivo en el reflejo de grietas. La geomalla, acompañada de un geotextil en su estructura, tiene un impacto de poca influencia debido a débil adherencia en la interfaz 2. Un módulo secante alto y una adherencia adecuada, proporciona las propiedades necesarias para mitigación de grietas de los geosintéticos en capas de mezcla asfáltica
Al-Qadi and Elseifi	Investigo el efecto de varios factores de diseño sobre la efectividad de capas intermedias para retardar el reflejo de grietas	Investigación de campo	<ol style="list-style-type: none"> 1. La aplicación de refuerzo de acero es más eficiente en sobrecapas asfáltica con espesores menores a 25 mm 2. El mayor aporte del sistema de capas intermedias para retardar el reflejo se da cuando se

Investigadores	Tema de investigación	Tipo de prueba	Mayores descubrimientos
Darling and Woolstencroft	Un estudio de 4 años de una sección de pavimento reforzado con geomalla de fibra de vidrio para retardar el agrietamiento reflectante	Estudio de campo	coloca cerca del punto de generación de grietas Las secciones reforzadas con geomalla de fibra de vidrio superan a la reforzada en términos de cantidad, severidad y ancho de grietas

Fuente: Solatiyan E., Bueche N. & Carter A., 2020

Por otra parte, en términos de la ubicación óptima del geosintético dentro del sistema intercapa, existen diferentes investigaciones que reflejan hallazgos similares. En términos nacionales, Leiva (2016) determina que, para el diseño calibrado mediante modelación numérica, la ubicación debe ser a $\frac{1}{4}$ del espesor total de la carpeta asfáltica, ubicación donde resistirá mayores ciclos a fatiga. Seguidamente Picado (2018) concluye que a $\frac{1}{3}$ del espesor de la carpeta asfáltica se disipa la mayor cantidad de energía y mitiga el reflejo de grietas. En términos internacionales, los hallazgos se describen a continuación:

- La Figura 26 demuestra como el uso de estos materiales contribuye a la cantidad de ciclos que es capaz de soportar una carpeta asfáltica antes de la falla. Sin embargo, la ubicación de este influye directamente en su capacidad ante dichos ciclos de carga, el estudio no tomo en cuenta la ubicación a $\frac{1}{3}$ del espesor de las probetas, pero se evidencia que a la mitad de la capa es la mejor ubicación. Esto se asocia a que, si el geosintético está en la última fibra a tensión, se llevara desde el inicio grandes ciclos de cargas y una vez falle, las cargas serán resistidas por la mezcla asfáltica teóricamente con menor rigidez. En cambio, para este caso de análisis, si el geosintético se ubica en la mitad del espécimen los ciclos de carga serán inicialmente soportados por la primera capa asfáltica hasta llegar a la interfaz, donde hay gran aumento en la capacidad a fatiga.
- La Figura 27 representa la relación entre ahuellamiento y ciclos a fatiga, según la ubicación del geosintético dentro de la carpeta asfáltica. Para este caso se concluye que la mejor ubicación es a $\frac{1}{3}H$, donde puede existir un pequeño aporte en la capacidad a deformación permanente respecto al caso sin refuerzo, con una capacidad a fatiga mayor al triple.
- La Figura 28 muestra la relación del agrietamiento reflectivo y lo ciclos a fatiga; al igual que el caso anterior, la mejor ubicación es a $\frac{1}{3}H$ donde la capacidad a fatiga del concreto

asfáltico incrementa es gran medida respecto al caso sin reforzar. Esto refuerza la teoría de que la inclusión de este tipo de materiales mitiga el reflejo de grietas y absorbe parte los esfuerzos a tensión del sistema.

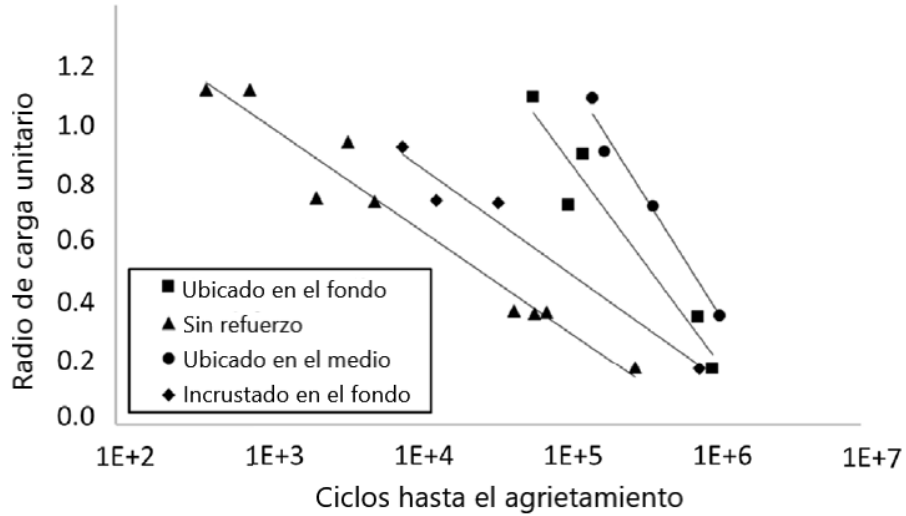


Figura 26. Efecto de la posición de la geomalla en la carpeta asfáltica sobre la resistencia a fatiga

Fuente: Sobhan, K., Crooks, T., Tandon, V. & Mattingly, S. 2004. Modificado por el autor

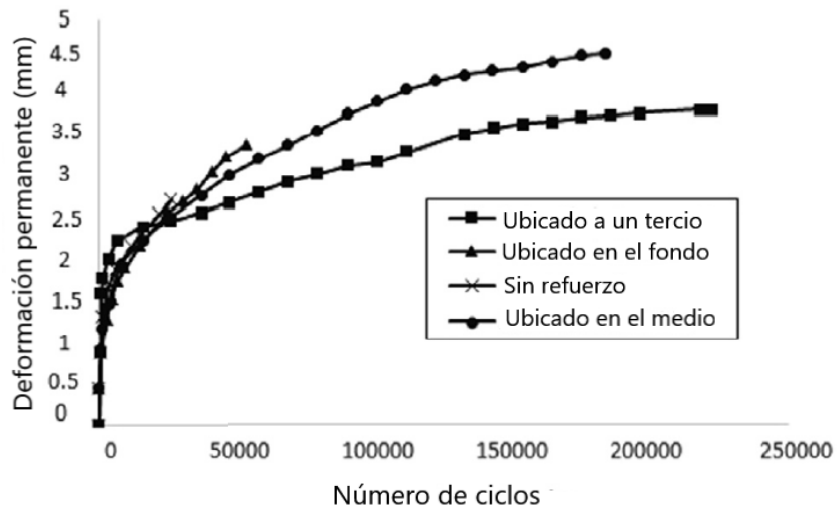


Figura 27. Efecto de la posición de la geomalla en la carpeta asfáltica sobre el ahuellamiento

Fuente: S. Flutcher & J.T. Wu, 2013. Modificado por el autor

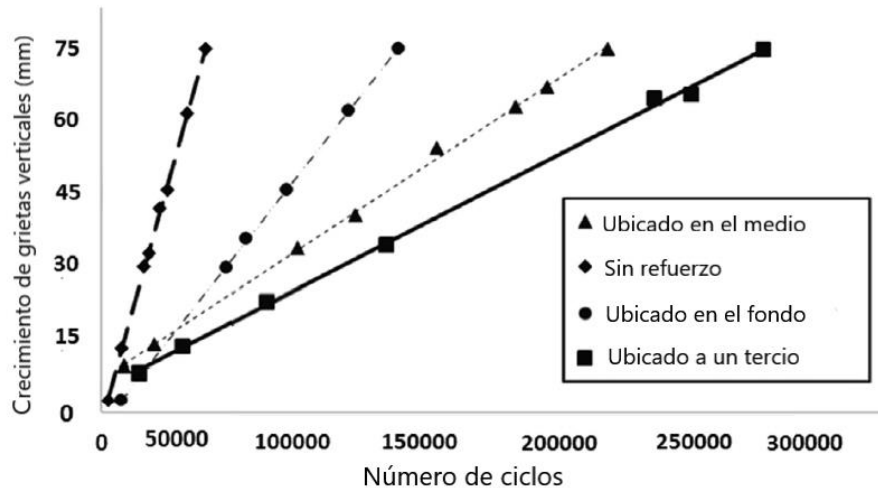


Figura 28. Efecto de la posición de la geomalla en la carpeta asfáltica sobre el agrietamiento reflectivo.

Fuente: A. Khoddaii, s. Fallah & F. Moghadas Nejad, 2009. Modificado por el autor

Finalmente, desarrollar un modelo mecánico o constitutivo requiere de una serie de consideraciones necesarias para lograr alcanzar una herramienta de diseño robusta y confiable, dichas variables a tomar en cuenta se mencionan a continuación (Solatiyan, Bueche, & Carter, 2020):

- Tipo de geosintético: la forma en que se distribuyen los esfuerzos y deformación en la capa asfáltica depende de la rigidez del material geosintético. Cuanto más rígido, mayor distribución.
- Espesor de sobre capa asfáltica: el espesor de sobre capa debe ser mínimo 4 veces el TMN o 4 cm, para cumplir requisitos de compactación.
- Tipo de sobrecapa: lo recomendable es usar MAC si se desea usar geosintéticos como sistema intercapa en la intervención a realizar.
- Periodo de diseño: la vida de diseño real solo puede realizarse con un estudio en campo a largo plazo. El periodo útil de diseño recae en la combinación de la sobrecapa y el geosintético.
- Reciclabilidad: la experiencia en campo revelo que la reciclabilidad de los geosintéticos rígidos se distingue de geomallas de polímero y acero, lo que afecta el ciclo de vida de la estructura.
- Calibración de campo a largo plazo: el estudio en campo a largo plazo bajo las condiciones climáticas y de tráfico a las que ha estado expuesto, genera mayor confiabilidad al diseño.

- Especificaciones del geosintético: la rigidez axial, la resistencia a la tensión y la longitud de anclaje son consideraciones importantes al influir en la mitigación de grietas, resistencia al corte, deslizamiento en la interfaz y la permeabilidad.
- Tipo de deterioro: la ubicación y tipo de geosintético se relaciona directamente con el tipo de deterioro, por ejemplo, si se habla de ahuellamiento o deformación permanente la propiedad de enclavamiento de agregados influye más que la permeabilidad.
- Tipo de carga: bajo cargas de tránsito y esfuerzos inducidos térmicamente, la geomalla trabaja como refuerzo durante la etapa de propagación de grietas.
- Comportamiento mecánico de la interfaz: considerar en dicho modelo el comportamiento mecánico real con los diferentes tipos de ligantes asfálticos y su evolución, bajo métodos de prueba validados.
- Costo: el tipo de geosintético y su instalación son costos adicionales por tomar en cuenta en este tipo de sistema intercapa, variable a considerar durante la evaluación de métodos de diseño para el proyecto.

Capítulo III: Resultados experimentales

Este capítulo describe los materiales empleados para el desarrollo de la investigación, así como los resultados de la calibración del modelo, su comparación con otras ecuaciones a fatiga y un análisis costo beneficio al emplear geomallas en sobrecapas asfálticas.

3.1. Materiales utilizados en el proyecto de investigación

3.1.1. Mezcla asfáltica

- Granulometría y parámetros volumétricos mezcla asfáltica convencional

Esta mezcla asfáltica posee un tamaño máximo nominal de 12,7 mm, se encontraba dentro de las instalaciones del LanammeUCR y fue donada al proyecto cuyo informe de diseño corresponde a ITP-1184-19 (año 2020). Debido a la disponibilidad del laboratorio y cantidad de material muestreado, no fue posible verificar por completo todas sus propiedades respecto a diseño y solo se realizaron algunas pruebas específicas, ver Cuadro 20 y Cuadro 21.

Cuadro 20. Granulometría mezcla asfáltica convencional

Malla	% Pasando diseño	Tolerancia diseño (% pasando)
1" (25 mm)	100	100
3/4" (19 mm)	100	100
1/2" (12,7 mm)	91	90-96
3/8" (9,5 mm)	80	75-85
N°4 (4,75 mm)	52	48-56
N°8 (2,36 mm)	34	30-38
N°16 (1,18 mm)	23	19-26
N°30 (600 µm)	16	12-19
N°50 (300 µm)	12	8-16
N°200 (75 µm)	5,7	3,7-7,7

Fuente: ITP, 2021

Cuadro 21. Parámetros volumétricos mezcla asfáltica convencional

Parámetro volumétrico	Método de prueba	Resultado ensayo	Valor de diseño
% Vacíos	-	*NI	4
Gravedad específica bruta (Gmb)	AASHTO T166	2,368	*NI
Gravedad máxima teórica (Gmm)	ASTM D 2041	2,490	2,456
% Contenido de asfalto (PTM)		5,82	5,2-6,2
Gravedad específica bruta agregado combinado (Gsb)	AASHTO T85/ AASHTO T84	*NI	2,614
% Vacíos sobre el agregado mineral (VAM)	-	14,68	14 mínimo
% Vacíos llenos de asfalto (VFA)	-	*NI	65-75

*No se tenía del diseño o no se determinó en laboratorio del LanammeUCR

Fuente: LanammeUCR, 2021

- Curva maestra mezcla asfáltica convencional

La rigidez de la mezcla asfáltica es dependiente de la frecuencia y temperatura en que se aplique la carga. Cuando se habla de materiales viscoelásticos, se habla de módulo dinámico y este responde a las propiedades de viscosidad lineal del material sometido a pulsos sinusoidales (Leiva F. , 2004). Para determinar la respuesta del material a distintos rangos de frecuencia y temperatura (insumo esencial en diseño estructural y análisis de desempeño), se construye una curva maestra mediante los datos del ensayo de módulo dinámico (en Costa Rica se emplea la metodología IPC para este ensayo).

Construir esta curva de forma manual requiere el empleo de ecuaciones complejas y por ello, el LanammeUCR ha creado una herramienta informática que facilita la construcción de dicha curva maestra. Esta herramienta se llama IModin (Interfaz de cálculo de módulo Dinámico) y es una interfaz gráfica en la cual se pueden colocar los datos procesados del ensayo y construir la curva de interés. Asimismo, este software verifica que los datos se ajusten a gráficos de "Black Space" (relaciona el comportamiento del ángulo de desfase respecto al logaritmo en base 10 del módulo dinámico) y "Diagrama Cole-Cole" (relaciona el valor del módulo de pérdida con el módulo de almacenamiento) con el fin de verificar la idoneidad de los datos y si se tiene que repetir o no el ensayo (Leiva P. , 2013).

Aplicando esto para mezcla utilizada en esta investigación, en el ensayo de modulo dinámico se realizaron 3 especímenes para tener validez estadística a lo hora de graficar la curva maestra

mediante el software IModin (ver Figura 30). La norma aplicada corresponde a AASHTO T378-17 y el módulo dinámico obtenido a 21°C (temperatura de control durante el ensayo) corresponde a 10799 MPa. Se recalca que este valor es alto y poco usual en mezclas asfálticas convencionales para dichas condiciones. En general a esa misma temperatura conforme disminuye la frecuencia (lo que se traduce a bajas velocidades de circulación), el módulo decrece (comportamiento más viscoso que elástico).

Gráfico Black Space

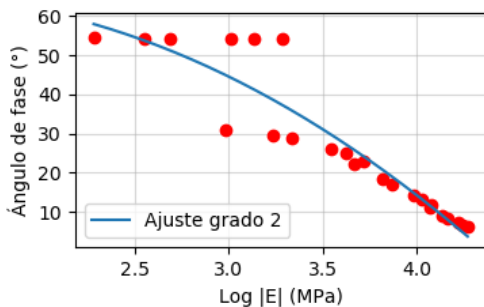


Gráfico Cole-Cole

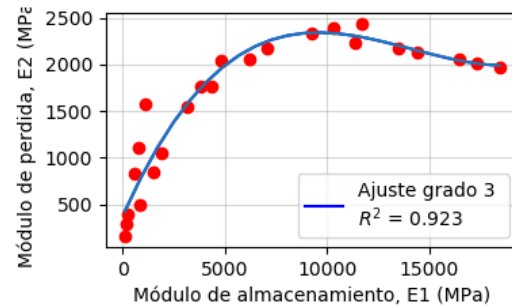


Figura 29. Ajuste de datos a gráfico Black Space y Cole-Cole, mezcla convencional

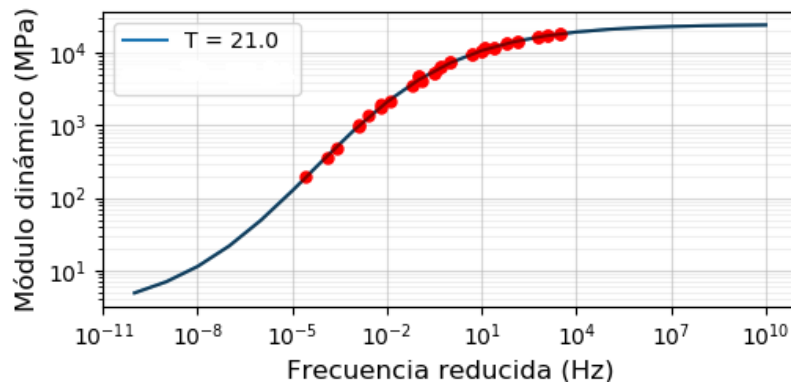


Figura 30. Curva maestra mezcla asfáltica convencional

- Granulometría y parámetros volumétricos mezcla asfáltica modificada con butonal NX 1129

Esta mezcla asfáltica fue solicitada a la Unidad Ejecutora del CONAVI (Proyecto Circunvalación Norte en 2021) y su diseño corresponde al 40-266-2018 Esta posee un TMN de 19 mm y en este caso se obtuvo por parte del laboratorio de verificación de calidad de dicho proyecto, los resultados de los ensayos que caracterizan la volumetría de la mezcla asfáltica, ver Cuadro 22 y Cuadro 23.

Cuadro 22. Granulometría mezcla asfáltica modificada

Malla	% Pasando	Tolerancia diseño (% pasando)
1" (25 mm)	100	100
3/4" (19 mm)	96	95-100
1/2" (12,7 mm)	81	75-85
3/8" (9,5 mm)	70	58-98
N°4 (4,75 mm)	46	44-52
N°8 (2,36 mm)	30	28-35
N°16 (1,18 mm)	21	18-24
N°30 (600 µm)	15	12-17
N°50 (300 µm)	10	8-12
N°100 (150 µm)	7	5-9
N°200 (75 µm)	4,3	3-7

Fuente: VIETO, 2021

Cuadro 23. Parámetros volumétricos de sobrecapa de mezcla asfáltica modificada

Parámetro volumétrico	Valor calculado	Especificación
% Vacíos	3,5	3,0-5,0
% Contenido de asfalto	6,0	5,5-6,5
% Vacíos en agregado mineral (VMA)	12,6	13 (mínimo)
% Vacíos llenos de ligante asfáltico (VFA)	72	65-75
*Gravedad máxima teórica (Gmm)	2,471	2,457

*Este parámetro también fue calculado por el LanammeUCR, el resultado es de 2,473 y es el valor utilizado para calibrar vacíos.

Fuente: VIETO, 2021

- Curva maestra mezcla asfáltica modificada

Al igual que la anterior mezcla asfáltica, para ensayo de modulo dinámico se realizaron 3 especímenes para tener validez estadística a lo hora de graficar la curva maestra (ver Figura 32). La norma aplicada corresponde a AASHTO T378-17 y el módulo dinámico obtenido a 21°C (temperatura de control durante el ensayo) corresponde a 7708 MPa.

Gráfico Black Space

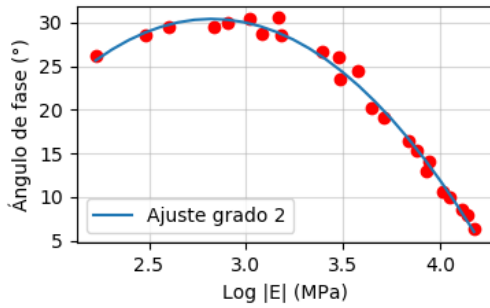


Gráfico Cole-Cole

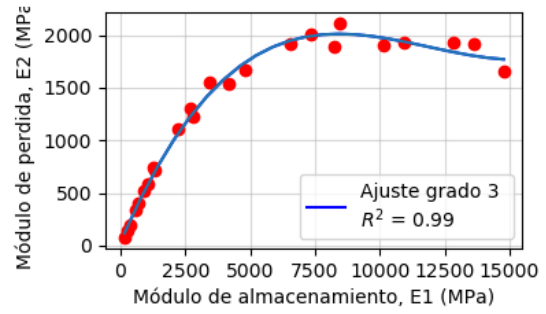


Figura 31. Ajuste de datos a gráfico Black Space y Cole-Cole, mezcla modificada

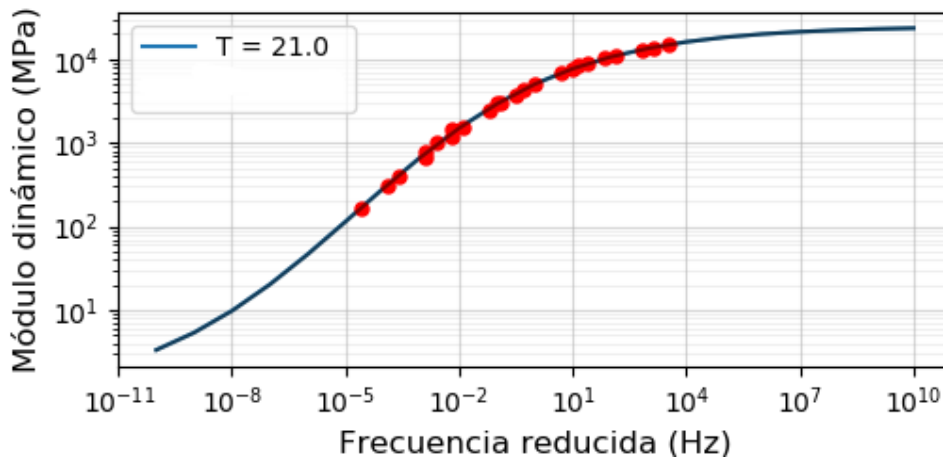


Figura 32. Curva maestra mezcla asfáltica modificada con butonal

3.1.2. Emulsión asfáltica

La emulsión asfáltica fue muestreada en campo (Proyecto Circunvalación Norte) y corresponde un ligante asfáltico de rompimiento rápido (CRS-1). Para fines de determinar la cantidad de ligante asfáltico a dosificar en el laboratorio basado en la tasa recomendada de 0,4 L/m² (Solano, 2016); se realizaron los ensayos: Método de prueba estándar para determinar la densidad del asfalto emulsionado (ASTM 6937) y Método de prueba estándar para la destilación de asfalto emulsionado (ASTM 6997), ver Cuadro 24.

Cuadro 24. Resultados de densidad y asfalto residual en emulsión asfáltica

Ensayo	Método de ensayo		Resultados	Unidades
	INTE	ASTM		
Densidad a 25 °C	-	D 6937	1000,3306 ± 2,378	g/L
Asfalto residual	C449	D 6997	61,1144 ± 0,7657	%

3.1.3. Geomalla

Este material, al igual que la mezcla asfáltica modificada con polímeros y el ligante asfáltico, fue solicitada a la Unidad Ejecutora del CONAVI y fue obtenida del Proyecto de Circunvalación Norte. La geomalla empleada corresponde a una MacGrid AR 5.7 (ver Figura 33) y sus especificaciones técnicas se describen en el Cuadro 25.



Figura 33. Geomalla biaxial

Cuadro 25. Especificaciones técnicas geomalla MacGrid AR 5.7

Propiedades Mecánicas	Norma	Unidad	Valor
Resistencia a la Tensión en dirección longitudinal	ASTM D 6637	kN/m	50
Deformación típica a tensión en dirección longitudinal	ASTM D 6637	%	2,5±1
Resistencia a Tensión en dirección transversal	ASTM D 6637	kN/m	50
Deformación típica a tensión en dirección transversal	ASTM D 6637	%	2,5±1
Módulo de Young	-	GPa	76
Propiedades Físicas y Químicas			
Estructura de Geomalla	Arreglo biaxial de fibra de vidrio		
Recubrimiento	Polímero bituminoso compatible		
Adhesivo sensible a la presión	No		
Temperatura de Trabajo	-	° C	-100 a +280
Punto de Fusión	-	° C	1000
Masa por unidad de área	-	g/m ²	275
Apertura de Malla	-	mm	25×25

Fuente: MACCAFERRI, 2015

Estas propiedades cumplen con lo estipulado por Caltrans (2018) para geomallas utilizadas como refuerzo de carpetas asfálticas, ver Cuadro 5.

3.2. Metodología de riego de liga

Por recomendaciones de la casa fabricante del geosintético, resultados experimentales de Solano (2016) y lo estipulado en las Especificaciones, Materiales y Prácticas de construcción con Riego de Liga (NCHRP, 2018), se determina una tasa de ligante asfáltico residual a colocar de 0,4 L/m². Además, esta dosificación se realiza en su totalidad mediante una pistola de pintura previo a la colocación de la geomalla.

Por otra parte, y mediante el uso de la densidad de la emulsión asfáltica y el porcentaje de asfalto en la misma, se calcula el peso de riego de liga a dosificar, tal y como se muestra a continuación:

$$\rightarrow \text{Tasa de aplicación} \left(\frac{L}{m^2} \right) \times \text{Área} (m^2) = 0,4 \frac{L}{m^2} \times 0,0675 m^2 = 0,027 L$$

$$\rightarrow \text{Volumen de asfalto residual} (L) \times \text{Densidad ligante} \left(\frac{g}{L} \right)$$

$$= 0,027 L \times 1000,33 \frac{g}{L} = 27 g [\text{asfalto residual}]$$

$$\rightarrow \text{Masa de asfalto residual} (g) \times (1 + \% \text{agua en emulsión})$$

$$= 27 g * (1 + 0,39) = 37,53 g [\text{emulsión asfáltica}]$$

En laboratorio se siguieron los siguientes pasos para la dosificación del ligante asfáltico:

- Colocar la emulsión asfáltica en el horno durante 1 hora para que alcance una temperatura de 50 ° C (Guerrero, 2015).
- Preparar la zona del laboratorio para evitar ensuciar el equipo y zonas de trabajo.
- Revisar la limpieza de la pistola de pintura antes de su uso.
- Conectar la pistola a la válvula de aire y revisar mediante un manómetro que la presión esté entre 30 psi y 50 psi (recomendaciones del fabricante).
- Pesar cada capa asfáltica previo a la dosificación del ligante asfáltico.
- Talar la balanza y aplicar la masa de emulsión asfáltica calculada previamente. La aplicación de este debe ser de forma continua y uniforme.

- Esperar que “rompa” el riego de liga y verificar el peso de asfalto residual. En este caso en condiciones de laboratorio (sin exposición al sol, viento y humedad), se estima que el tiempo de rompimiento está entre 1:45 h y 2 h.
- Una vez concluido el paso anterior, colocar la geomalla y mediante un papel y una lámina aplicar presión para fijar y adherir el geosintético a la capa de mezcla asfáltica.

3.3. Compactación del bloque de mezcla asfáltica

Para la compactación de las probetas se utilizó equipo “*Asphalt shear box compactor*” del LanammeUCR. En este caso el equipo aplica una precarga de 3 kN que permite el acomodo del material y luego aplica ciclos de carga que varían de 3 kN a 40 kN. Los especímenes compactados tienen una dimensión de $15 \times 15 \times 45 \text{ cm}$ (área transversal por largo). La Figura 34 muestra la sección transversal de las vigas de concreto asfáltico reforzadas con geomalla construidas en el laboratorio.

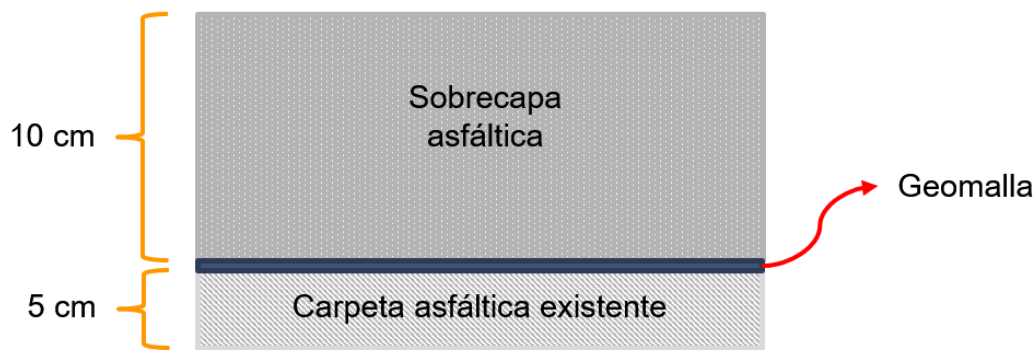


Figura 34. Sección transversal especímenes realizados en el laboratorio

- Compactación primera capa de mezcla asfáltica

Esta primera capa debía cumplir con un 4% de vacíos (valor de diseño indicado en el CR-2010), por lo que se tuvo que calibrar la masa de mezcla asfáltica a utilizar para llegar a este porcentaje. En este caso para todos los especímenes se utiliza mezcla asfáltica convencional y mediante varias iteraciones se logra obtener una ecuación con ajuste exponencial que permite determinar la masa necesaria para alcanzar el 4% de vacíos (2398,95 g a energía de compactación de aproximadamente 35 ciclos), ver Figura 35.

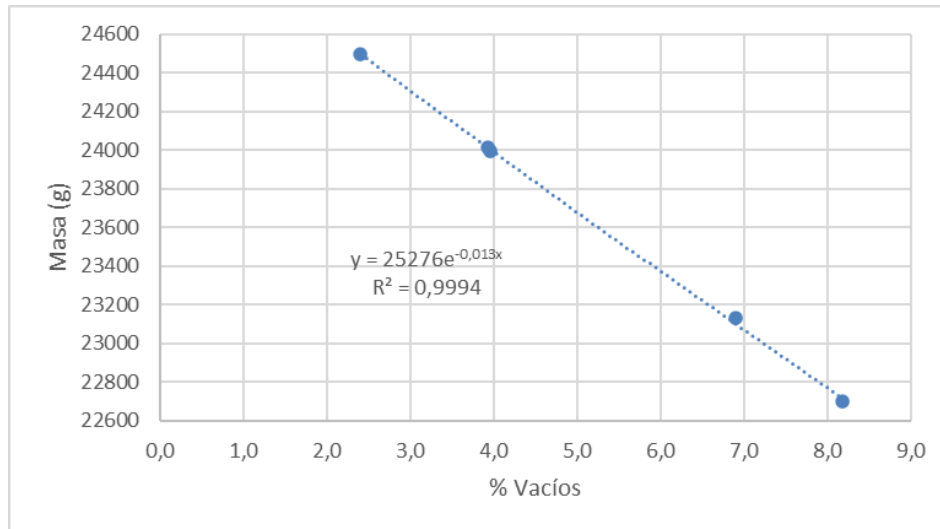


Figura 35. Porcentaje de masa vs vacíos, mezcla asfáltica convencional de la primera capa

- Compactación sobrecapa de mezcla asfáltica

La sección 405: Suministro y colocación de mezclas asfálticas en caliente (nueva actualización del CR-2010), indica que la densidad de compactación en campo debe estar entre el 92% y 94%, por lo que se calibran los vacíos a un valor óptimo de 7%. Al igual que el caso anterior se estimó mediante diferentes especímenes de prueba, una curva exponencial de mejor ajuste y se determina que para alcanzar un 7% de vacíos, se debe utilizar 14829 g de mezcla asfáltica convencional y 14608 g de mezcla asfáltica modificada a 15 ciclos y 19 ciclos de energía respectivamente (ver Figura 36 y Figura 37).

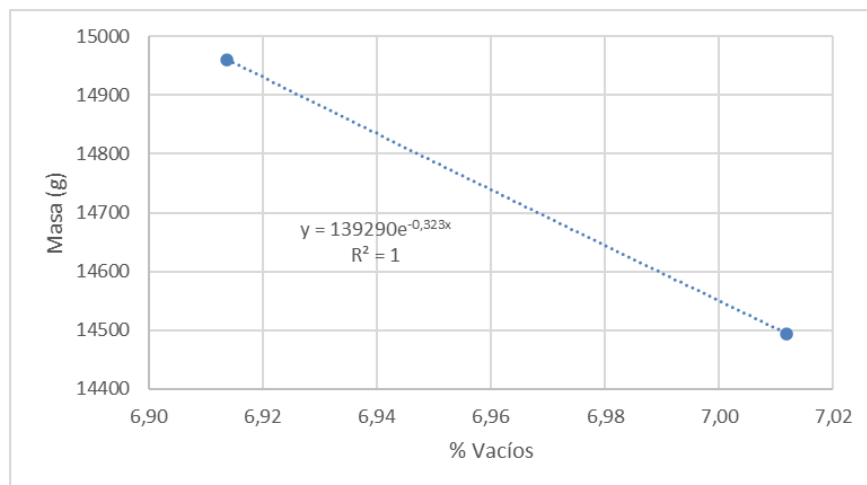


Figura 36. Porcentaje de masa vs vacíos, sobrecapa de mezcla asfáltica convencional

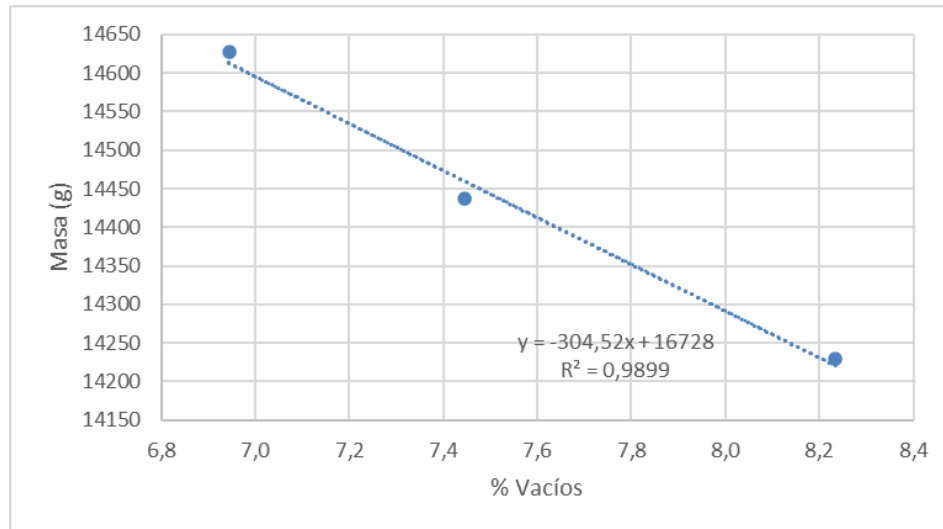


Figura 37. Porcentaje de masa vs vacíos, sobrecapa de mezcla asfáltica modificada

3.4. Ensayo a flexotracción

Para la falla de las probetas se sigue el esquema de montaje de ensayo estipulado en la Normativa Europea para vigas a flexotracción en cuatro puntos (4PB-PR). Pese a que este ensayo aclara que las distancias entre apoyos y cargas debe ser simétrico, esta condición no pudo ser obtenida debido a la configuración geométrica del equipo y el espécimen. Sin embargo, está simetría lo que pretende es que exista un momento constante en la luz central de la viga, condición con la cual se cumple (ver Figura 38 y Figura 39).

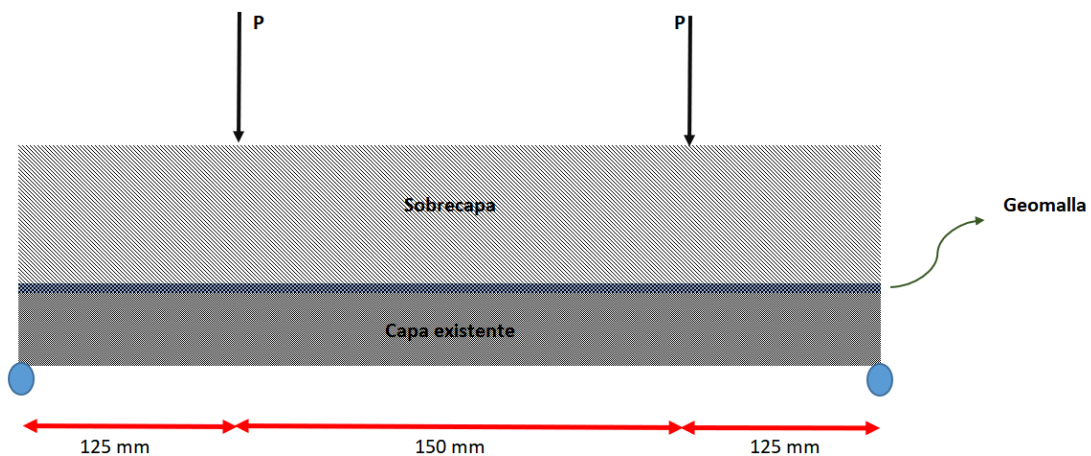


Figura 38. Esquema de ensayo viga a cuatro puntos, vista longitudinal



Figura 39. Montaje ensayo en laboratorio

La frecuencia del ensayo fue de 10 Hz, valor dentro del rango de dicha normativa para ensayos a fatiga, así como el usado en el ensayo AASHTO T321 y es un valor calculado mediante el gráfico de Barksdale (1971). En este último se calcula el pulso como $1/f$ por recomendaciones de la CRME (2018) y con un espesor de pavimento de 15 cm, se obtiene aproximadamente una velocidad 20 km/h, ver Figura 40.

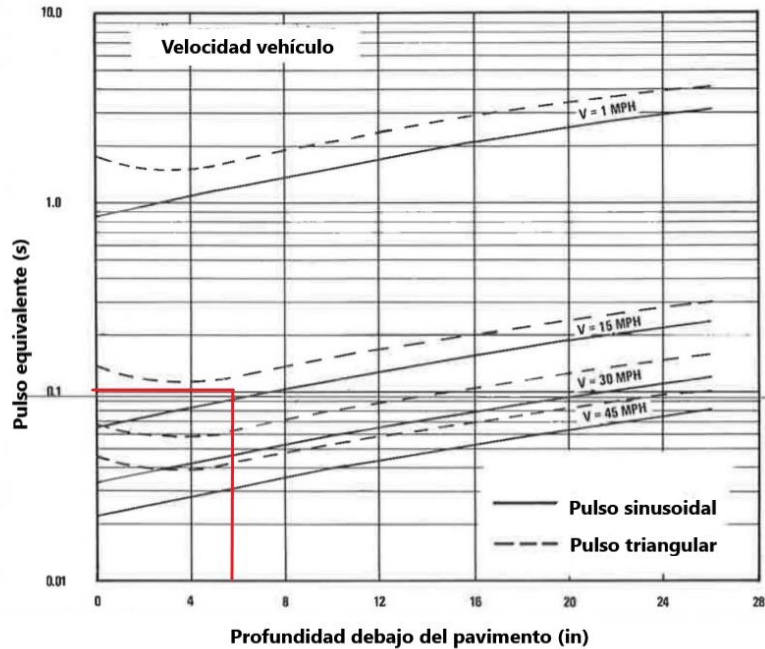


Figura 40. Cálculo de velocidad, gráfico de Baksdale

Fuente: Barksdale,1971. Modificado por el autor

La carga aplicada varía dentro de tres diferentes rangos como lo recomienda la UNE-EN 12697-24 para vigas a flexotracción en cuatro puntos (ver Cuadro 1). Para determinar dichos valores se realizó un análisis de la respuesta mecánica de una estructura típica de pavimento flexible (ver Anexo G y Anexo H, se emplea un vehículo de diseño T3-S2 con una presión de inflado de 90 psi y carga por llanta de 4500 lb).

El análisis permite determinar la magnitud de las deformaciones unitarias en la carpeta asfáltica y mediante un análisis de esfuerzos a flexión se calculó teóricamente la carga mínima (ver Ecuación 18). No obstante, este valor subestima la capacidad de la viga y de forma experimental se incrementó la carga para producir deformaciones esperadas sin fallas abruptas. Es importante que en futuras investigaciones se pueda tomar en cuenta el aporte viscoelástico del material y calcular la carga de manera más precisa en conjunto con el módulo compuesto (capa existen-geomalla-sobrecapa).

$$\sigma_{flexión} = E * \varepsilon$$

$$\frac{M * c}{I} = E * \varepsilon$$

$$\frac{\frac{5PL}{16} * \frac{h}{2}}{\frac{h^4}{12}} = E * \varepsilon$$

$$\frac{15PLh}{8h^4} = E * \varepsilon$$

Ecuación 18

$$P = \frac{8h^3 * E * \varepsilon}{15L}$$

$$P = \frac{8 * 150^3 * 7708 * 1,4107 \times 10^{-4}}{15 * 450} = 4349,47 \text{ N} = 4,35 \text{ kN}$$

Para todos los casos de falla se aplica 0,9 s descanso (condición aplicada por Pugazhent et al (2019), lo cual produce una "relajación" del esfuerzo y recuperación de la deformación).

La señal aplicada corresponde a pulsos haversianos, los cuales permiten desplazar la señal positivamente en el eje "y" para no aplicar cargas "negativas" a la probeta. La ecuación de la onda haversiana, para la carga y frecuencia que se aplicó, tiene la siguiente forma:

$$x(t) = A \sin(\omega t) + C$$

Ecuación 19

Donde,

A: amplitud de la onda y es la diferencia entre la carga máxima y mínima (kN)

w: frecuencia angular del ensayo y es equivalente a $2\pi f$ (Hz)

t: tiempo (s)

C: constante para desplazar la onda al valor mínimo de carga, corresponde a la amplitud más la carga mínima (kN)

La Figura 41 muestra los ciclos de carga aplicados durante el ensayo, cada uno de estos consta de 0,1 s de carga y 0,9 s de descanso.

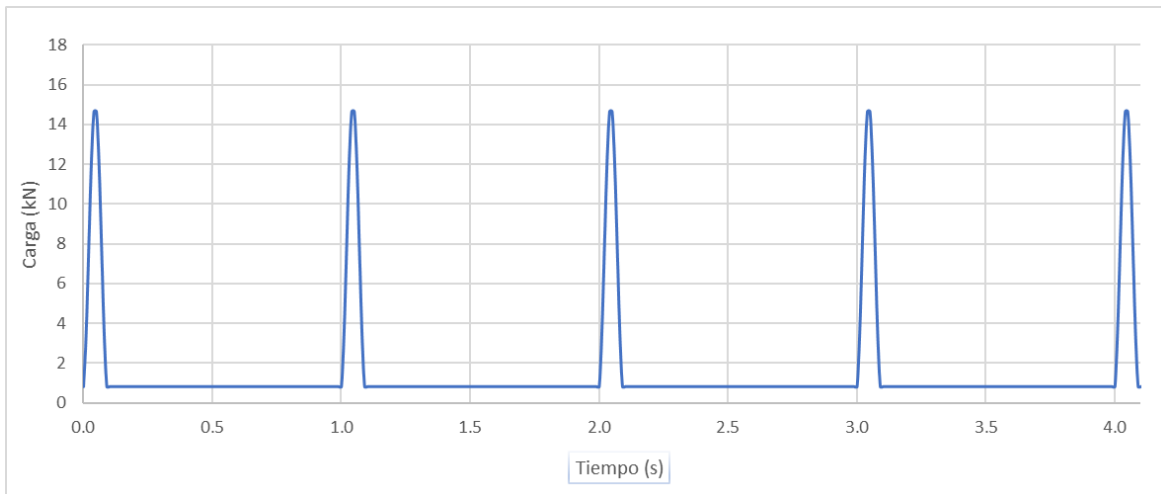


Figura 41. Señal haversiana con periodos de descanso, carga máxima de 15 kN

El ensayo se realiza a esfuerzo controlado como lo recomienda Alfaro et al (2016) y Huang Y. (2004) para vigas de espesores mayores o iguales a 15 cm. Finalmente y previo a la falla, se instrumenta cada uno de los especímenes en la cara frontal y posterior mediante un LVDT (transformador eléctrico utilizado para medir desplazamientos lineales) de 50 mm en la última fibra a tensión, ver Figura 42. El cuarto de ensayo se encuentra a una temperatura controlada de $21 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ La nomenclatura de cada probeta se detalla en el Cuadro 1.



Figura 42. Colocación LVDT's

3.4.1. Resultados ensayo a flexotracción

En una primera etapa se realizan los especímenes de prueba para verificar la carga teórica mínima; experimentalmente las probetas duraban hasta más de 3 días sin fallar (Figura 43) por lo que se aumenta la carga para producir una falla con deformaciones de la misma magnitud a las reales ($4,54 \times 10^{-4}$ mm/mm) y sin fallas abruptas (capacidad).

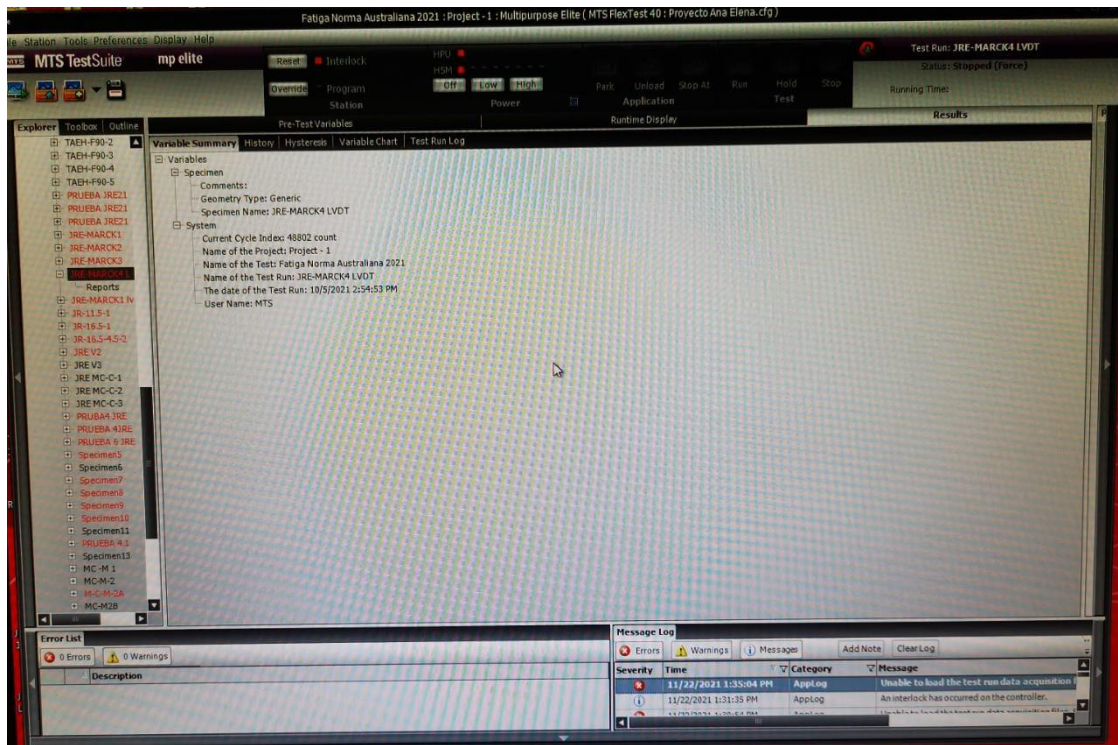


Figura 43. Salida programa UTM MTS LANDMARK

Al ensayar estas se determina que las deformaciones unitarias iniciales se encuentran dentro de la magnitud esperada en campo, pero que con el paso de las cargas se genera un daño acumulado que da origen a las primeras grietas (Ley de Miner), tal y como se muestra en la Figura 44. Las grietas iniciales logran observarse en promedio a 1 mm de deformación total o a $6,67 \times 10^{-3}$ mm/mm de deformación unitaria en la zona de momento constante.



Figura 44. Agrietamiento inicial, espécimen de prueba

Comúnmente en los ensayos a fatiga a cuatro puntos (a deformación controlada) el criterio de falla se define en la pérdida de 50% de la rigidez del elemento o como cierta cantidad de energía disipada durante la aplicación de ciclos de carga. No obstante, debido a que se busca cuantificar el efecto que tiene la geomalla como refuerzo de la interfaz, el criterio de falla definido es 3,5 mm de deformación total en la última fibra tensión, donde en promedio la grieta alcanza 2/3 de la altura del espécimen.

Lytton (1989), define varios modos de falla en sobrecapas asfálticas:

- Modo de falla I: la grieta se transmite de la capa existente hasta la superficie en línea recta.
- Modo de falla II: la grieta inicia en la capa existente, se extiende hasta la ubicación del geosintético y se traslada paralelamente por esta interfaz generando un plano de deslizamiento.
- Modo de falla III: la grieta se transmite de la capa existente hasta la interfaz donde se ubica el geosintético, luego inicia un proceso de agrietamiento desde la superficie a dicha interfaz.

Según la Figura 45, las vigas falladas tienen un modo de falla I, pero en varias de estas se muestra una desviación de la grieta (que podría ser efecto de la geomalla o la diferencia de rigideces entre capas), por lo que se presenta el efecto de refuerzo y mitigación en el reflejo de grietas (está última es visualmente poco apreciable y es recomendable estudiarlo a profundidad variando el tipo de geomalla). En general al no existir plano de falla entre capas el cortante se transmite

linealmente hasta la superficie. No obstante, si se traslada este concepto a campo y existen problemas de adherencia entre capas y/o se utiliza un geotextil, es de esperar un modo de falla II, donde la grieta se transmite por la interfaz antes de reflejarse.

La ubicación del geosintético propicia este modo de falla y como se presenta en la investigación de Khodaii A. et al (2009), a un tercio del espesor de carpeta asfáltica los ciclos a fatiga aumentan hasta que la grieta alcanza la superficie (ver Figura 28)



MC-C-1



MC-C-2



MC-C-3



MC-C-4



MC-C-5



MC-C-6



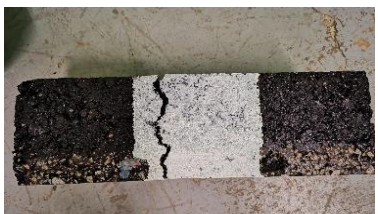
MC-C-7



MC-C-8



MC-C-9



MC-M-1



MC-M-2



MC-M-3

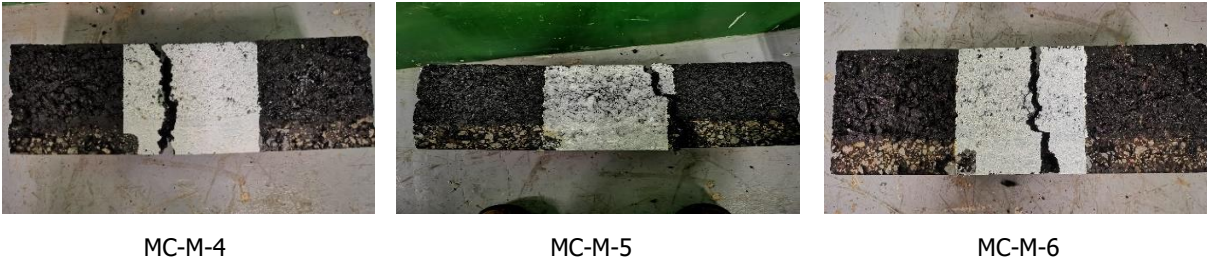


Figura 45. Modo de falla de vigas

La cantidad de ciclos en que la grieta se encuentra en la interfaz-sobrecapa puede detectarse justo antes de pasar a una transmisión exponencial (tercera fase curva Ley de Paris, ver pág. 37 y Figura 16). En los gráficos de Figura 46, Figura 47 y Figura 48, se detecta que antes de que la deformación unitaria a tracción cambie a una tasa de crecimiento exponencial, la grieta se mantiene en la interfaz cierta cantidad de ciclos (son aquellos datos donde aún hay un cambio constante hasta que dicho crecimiento sea acelerado, ver ejemplo ilustrativo de la viga MC-C-3 en la Figura 46). En promedio se determina lo siguiente:

- Para las vigas bajo una carga de 13 kN y tipo MC-C la grieta se mantiene en la interfaz 370 ciclos y la deformación a tracción registrada por el LVDT, cambia a una razón de $3,11 \times 10^{-4}$ mm/ciclo. Para este mismo nivel de esfuerzo, las probetas tipo MC-M presentan una tasa de $4,31 \times 10^{-4}$ mm/ciclo y la grieta se mantiene 237 ciclos en la interfaz.
- Las probetas tipo MC-C bajo una carga de 14 kN presentan una tasa promedio de cambio de deformación total de $1,20 \times 10^{-3}$ mm/ciclo (89 ciclos en la interfaz) y las tipo MC-M de $1,43 \times 10^{-3}$ mm/ciclo (87 ciclos en la interfaz).
- Para el mayor nivel de esfuerzo se detecta una tasa de deformación total por ciclo de $1,05 \times 10^{-3}$ (94 ciclos en la interfaz) para las probetas MC-C. Para el otro grupo de vigas a este nivel de esfuerzo se tiene en promedio $1,33 \times 10^{-3}$ mm/ciclo (70 ciclos en la interfaz)
- En general a mayor esfuerzo, menor cantidad de ciclos la grieta se mantiene en la interfaz y la tasa de deformación total por ciclo incrementa.

En la Figura 46, Figura 47 y Figura 48 se muestra una comparativa de la capacidad a fatiga entre los distintos tipos de especímenes. Los resultados muestran que las probetas con la sobrecapa de concreto asfáltico con mayor módulo dinámico poseen una vida a fatiga mayor, siendo en este caso específico las de mezcla asfáltica convencional (condición que se repite para todos los niveles de esfuerzo). Se resalta que la curva MC-C-1 no se gráfica por un error en los datos, sin embargo, su resultado a la falla si se obtiene.

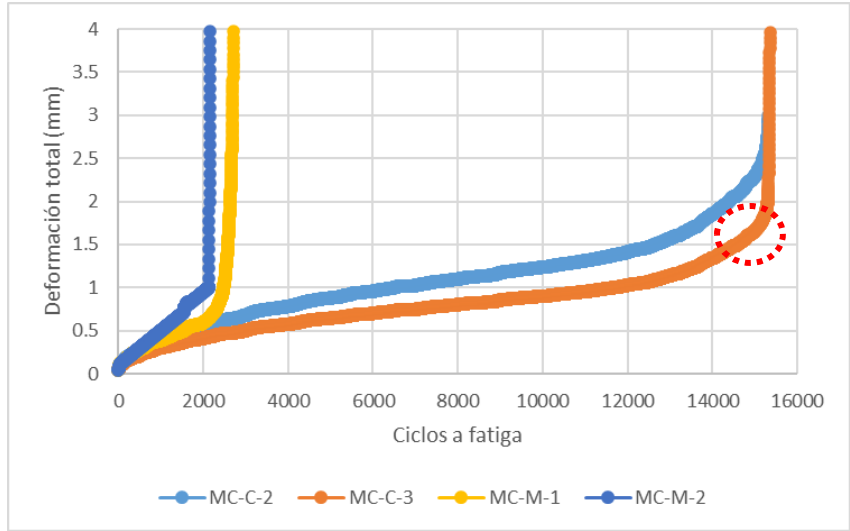


Figura 46. Vida a fatiga especímenes fallados a 13 kN

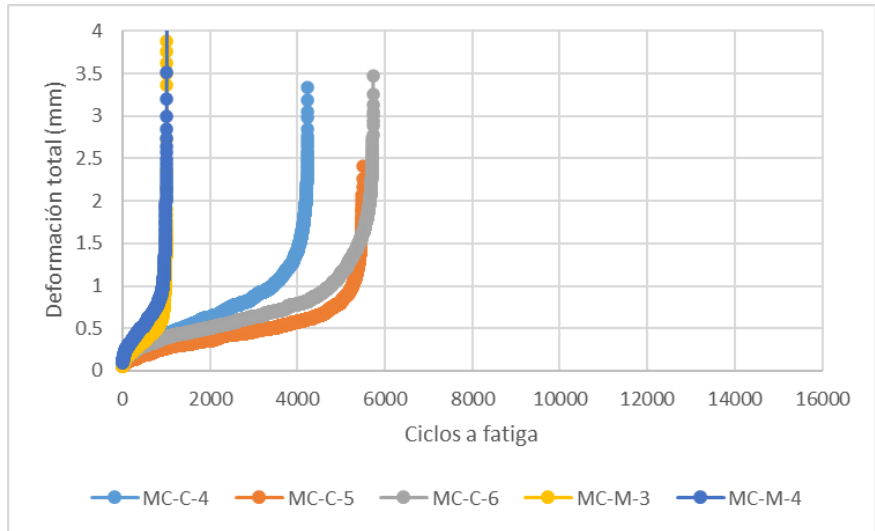


Figura 47. Vida a fatiga especímenes fallados a 14 kN

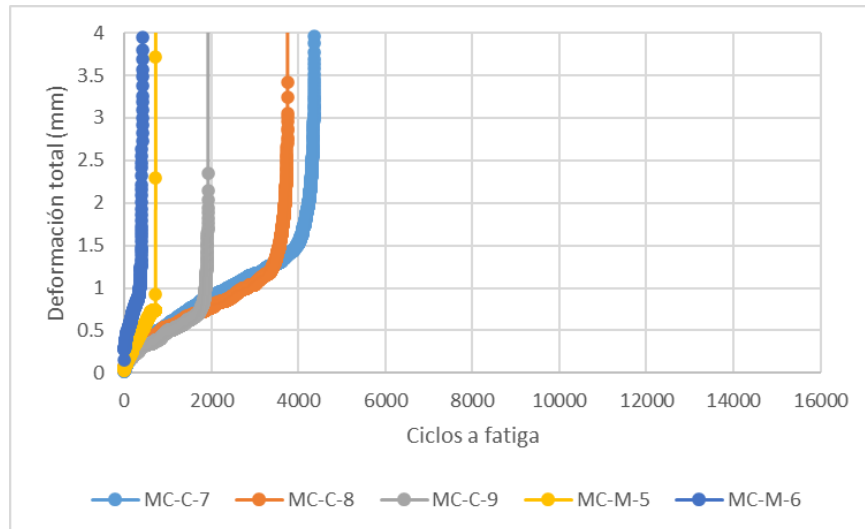


Figura 48. Vida a fatiga especímenes fallados a 15 kN

Al realizar el análisis, conforme disminuye el esfuerzo al que es sometido el espécimen, su capacidad a fatiga aumenta, ver Figura 49. Esta tendencia era lo esperado y se repite para todos los grupos de especímenes con sobrecapa de MAC modifica y MAC convencional.

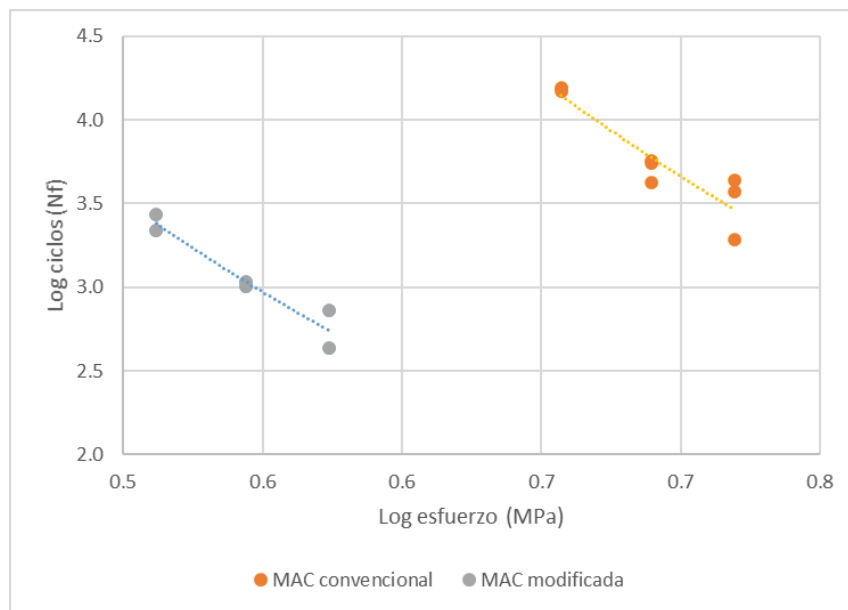


Figura 49. Capacidad a fatiga según el nivel de esfuerzo

Los resultados de módulo dinámico y fatiga muestran que la mezcla asfáltica convencional posee en este caso un mejor desempeño, cabe destacar que se realizó una espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) a ambas mezclas y se determina que:

- La Figura 50 muestra la comparativa de las mezclas asfálticas respecto al espectro de polímero como el butonal, en círculo rojo se denota un "pico" en la mezcla modificada característico del aditivo modificante, mismo que no se detecta en la mezcla convencional.
- La Figura 51 muestra la comparación del espectro de la MAC convencional respecto a otros aditivos modificantes de típico uso en Costa Rica, como lo es SBS, SBR y Elvaloy. El espectro evidencia que no existe ninguno de estos patrones en la mezcla de análisis, por lo tanto, se descartó la presencia de algún modificante no registrado.

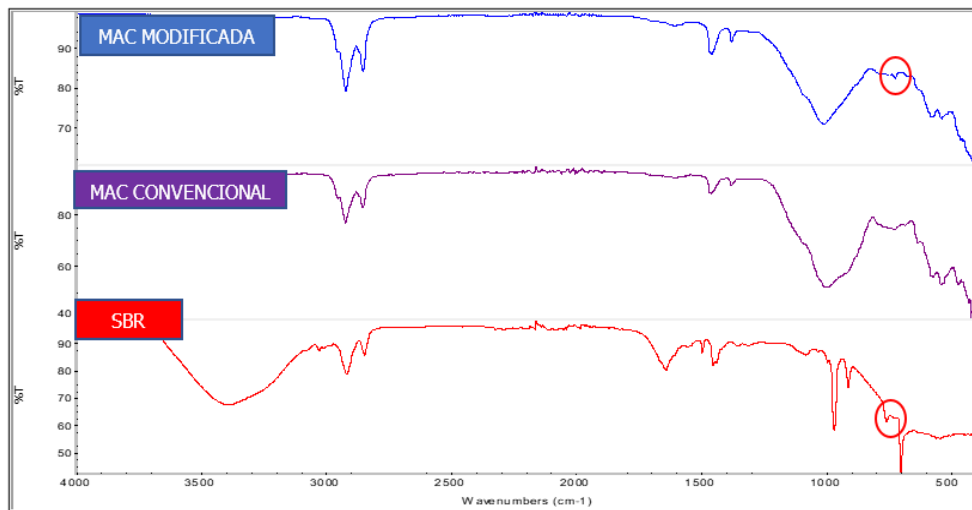


Figura 50. FTIR comparación entre mezclas asfálticas

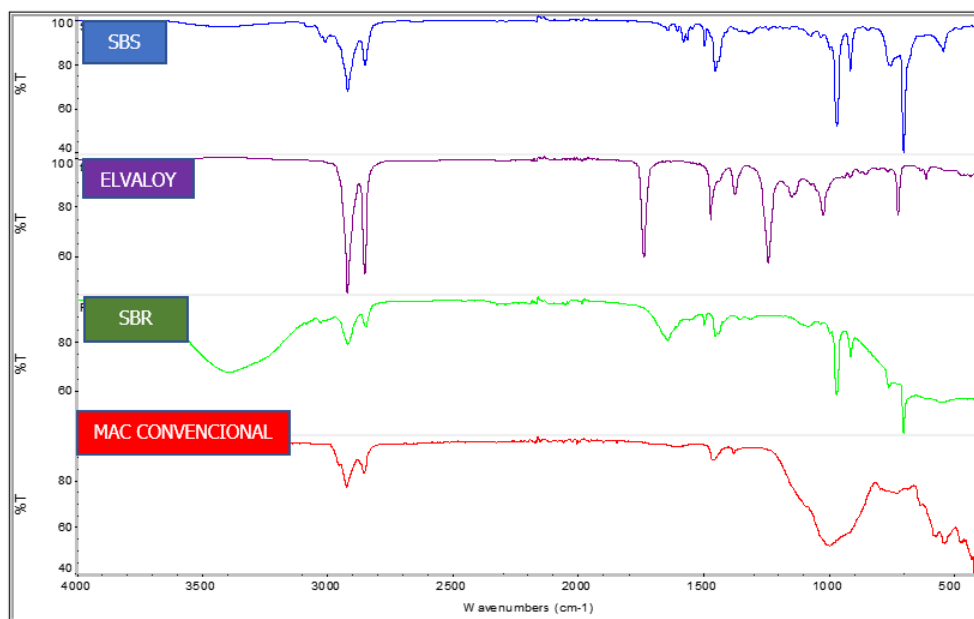


Figura 51. FTIR mezcla asfáltica convencional

En particular existen razones por las que no pueden compararse de manera directa:

- La fuente de asfalto procede de lotes distintos, principalmente se detecta de los certificados de RECOPE una penetración alta para el asfalto base de la MAC modificada (70 1/10 mm). No se muestreo el asfalto usado en las mezclas, pero aspectos como la temperatura de PG intermedia puede afectar directamente en la fatiga de la MAC.
- Son distintas granulometrías, diferente origen de agregado y distintos diseños de mezcla, por lo que existen muchas otras variables como el contenido de asfalto efectivo y relación polvo/asfalto que poseen cada una de estas y que median en su respuesta mecánica, lo que hace no comparables a las mezclas.
- Según el Ing. Álvaro Solís Ramírez (encargado del proyecto de Circunvalación Norte Unidad Ejecutora del CONAVI) la mezcla modificada (19 mm) donada era para capa de rodadura y se modificó con el fin de mejorar su desempeño a la deformación permanente y no fatiga.
- Cada polímero trata de prevenir distintos deterioros y añadir un aditivo como butonal al asfalto puede provocar que se rigidice la mezcla modificada.

Por otra parte, estudios como el de Wu R. et al (2017) señalan que granulometrías más densas poseen una mejor respuesta mecánica a fatiga. Anderson R.M y Bentsen R.A (2001) mencionan que para rangos de entre 13% y 15% de VMA en diseño de mezclas "finas" existe un mejor desempeño a fatiga, tendencia que no se sigue en mezclas "gruesas". Esta teoría se cumple con el caso de estudio, pues el rango de VMA en la mezcla más "fina" es de 14,68% y su desempeño a fatiga es notablemente mejor (MAC convencional).

3.5. Propuesta de ecuación de transferencia a fatiga

Con el fin realizar un modelo dependiente de características volumétricas y mecánicas de la mezcla asfáltica, se propone un modelo de regresión lineal múltiple. Las variables independientes seleccionadas corresponden a aquellas que afectan la capacidad a fatiga de carpetas asfálticas, condiciones de esfuerzo, módulo dinámico, parámetros volumétricos y granulometría (está última basada en el modelo Witzack (2004) para predecir la rigidez de la mezcla asfáltica). De manera general se propone un modelo de la siguiente forma estructural:

$$N_f = k_1(x_1^{k_2})(x_2^{k_3})(x_3^{k_4}) \dots \dots \dots (x_N^{k_N})$$

Ecuación 20

Donde,

x_N : variable independiente seleccionada para el modelo predictivo

k_N : constante real que proviene del modelo de regresión lineal múltiple

A partir de los datos del Cuadro 26, se linealizan las variables y se realiza una regresión lineal múltiple, tal y como se hace en los modelos generales para predecir fatiga presentados en la Sección 2.7 de esta investigación.

Cuadro 26. Variables del modelo de desempeño a fatiga

Probeta	y Ciclos	x1 Esfuerzo (MPa)	x2 % Pas 3/8"	x3 % Pas #4	x4 % Pas #200	x5 Módulo dinámico (MPa)	x6 Contenido de asfalto (%)	x7 VAM (%)
MC-C-1	14843	4,55	80	52	5,7	10799	5,82	14,68
MC-C-2	15322	4,55	80	52	5,7	10799	5,82	14,68
MC-C-3	15623	4,55	80	52	5,7	10799	5,82	14,68
MC-M-1	2719	3,25	70	46	4,3	7708	6,0	12,6
MC-M-2	2197	3,25	70	46	4,3	7708	6,0	12,6
MC-C-4	4243	4,90	80	52	5,7	10799	5,82	14,68
MC-C-5	5487	4,90	80	52	5,7	10799	5,82	14,68
MC-C-6	5730	4,90	80	52	5,7	10799	5,82	14,68
MC-M-3	1070	3,5	70	46	4,3	7708	6,0	12,6
MC-M-4	1017	3,5	70	46	4,3	7708	6,0	12,6
MC-C-7	4380	5,25	80	52	5,7	10799	5,82	14,68
MC-C-8	3753	5,25	80	52	5,7	10799	5,82	14,68
MC-C-9	1926	5,25	80	52	5,7	10799	5,82	14,68
MC-M-5	726	3,75	70	46	4,3	7708	6,0	12,6
MC-M-6	433	3,75	70	46	4,3	7708	6,0	12,6

La primera iteración realizada muestra que solo las variables x_1 y x_5 aportan significativamente al modelo propuesto, por lo que se eliminan las demás variables independientes del Cuadro 26. Al solo existir dos configuraciones de mezcla asfáltica, estadísticamente con un 95% de confianza (es decir una $P < 0,05$) las variables independientes que no pudieron ser consideradas, tienen un efecto despreciable dentro del modelo (ver Anexo I y Cuadro 27).

Cuadro 27. Salida regresión lineal múltiple iteración 1

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Constante	-52,58	4,04	-13,01	1,95x10 ⁻⁸
Esfuerzo (MPa)	-10,75	1,12	-9,63	5,40x10 ⁻⁷
% Pas 3/8"	0	0	65535	0
% Pas #4	0	0	65535	0
% Pas #200	0	0	65535	0
Módulo dinámico (MPa)	15,82	1,18	13,38	1,43x10 ⁻⁸
Contenido de asfalto (%)	0	0	65535	0
Vacíos sobre el agregado mineral (%)	0	0	65535	0

Al linealizar nuevamente las variables x_1 y x_5 (Ecuación 21) y usar mismo nivel de significancia, se obtienen los resultados de la segunda regresión lineal múltiple (Cuadro 28). El coeficiente de determinación $R^2=0,95$ y el valor P de los parámetros indica que son estadísticamente significativos, es decir, que cambios en estas variables provocan cambios en la respuesta a fatiga (ver Anexo J).

$$N_f = k_1(\sigma^{k_2})(|E^*|^{k_3})$$

Ecuación 21

$$\log(N_f) = \log(k_1) + k_2 \log(\sigma) + k_3 \log(|E^*|)$$

Cuadro 28. Salida regresión lineal múltiple iteración 2

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Constante	-52,58	4,04	-13,01	1,95x10 ⁻⁸
Esfuerzo (MPa)	-10,75	1,12	-9,63	5,40x10 ⁻⁷
Módulo dinámico (MPa)	15,82	1,18	13,38	1,43x10 ⁻⁸

Cuadro 29. Constantes del modelo de deterior propuesto

Parámetro del modelo predictivo	k₁	k₂	k₃
Valor	2,63x10 ⁻⁵³	-10,74	15,82

En base a los resultados de la regresión lineal múltiple, se estimaron los parámetros "k_N" del modelo (ver Cuadro 29) y se propone la ecuación de laboratorio para predecir fatiga en carpetas asfálticas reforzadas con geomalla (Ecuación 22). Se destaca que las características físico-mecánicas de la geomalla son constantes en este estudio y es de importancia variar el tipo de este geosintético para determinar que variable de está tiene mayor significancia para refuerzo de

carpetas asfálticas, es decir, para aportar al desempeño a fatiga (resistencia a la tracción, deformabilidad, apertura de malla, gramaje, proceso de fabricación y/o otros).

$$N_f = 2,63 \times 10^{-53} (\sigma^{-10,75}) (|E^*|^{15,82}) \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde,

σ : esfuerzo a tensión en la última fibra de la carpeta asfáltica (MPa)

$|E^*|$: módulo dinámico sobrecapa de mezcla asfáltica (MPa)

Esta expresión matemáticamente equivalente a:

$$N_f = 7,59 \times 10^{-6} (\sigma^{-10,75}) \left(\frac{|E^*|}{1000} \right)^{15,82} \quad \text{Ecuación 23}$$

Finalmente se refleja de manera gráfica la dispersión de los datos del modelo predictivo respecto a los reales del ensayo. La Figura 52 muestra una relación con tendencia lineal entre estos.

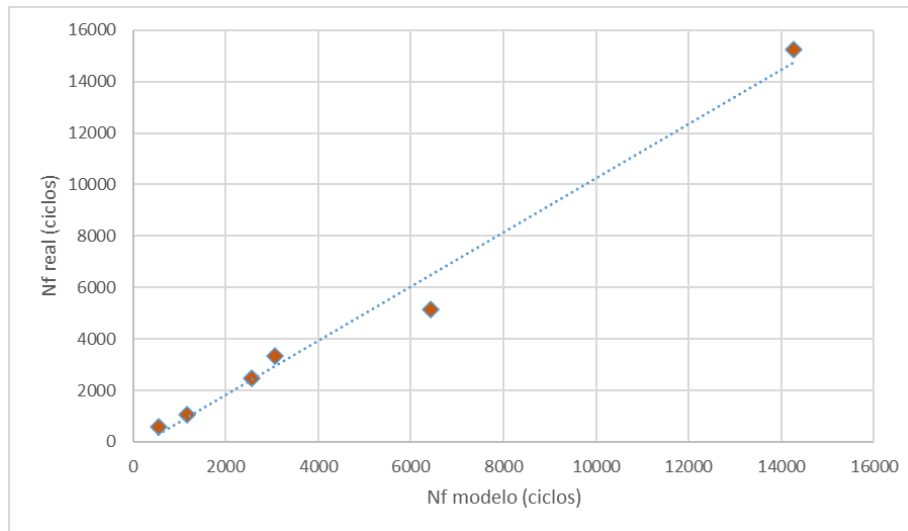


Figura 52. Fatiga real vs la estimada por el modelo

3.6. Análisis de sensibilidad

Con el fin de determinar el impacto que tiene sobre el modelo propuesto para laboratorio la variación de alguna de las variables independientes, se plantea una estructura de pavimento patrón que servirá como punto de referencia para comparar con diferentes escenarios. La estructura de pavimento flexible patrón se muestra en el Cuadro 30.

Cuadro 30. Estructura de pavimento patrón

Subrasante		Subbase granular		Base granular		Mezcla asfáltica	
E (MPa)	43	E (MPa)	103	E (MPa)	315	E (MPa)	3500
Espesor (cm)	∞	Espesor (cm)	23	Espesor (cm)	30	Espesor (cm)	15
Coefficiente de Poisson	0,45	Coefficiente de Poisson	0,4	Coefficiente de Poisson	0,35	Coefficiente de Poisson	0,35

Nota: el espesor de MAC ya incluye la capa existente y la sobrecapa y se asume un solo módulo. El módulo dinámico y parámetros volumétricos corresponden a la sobrecapa asfáltica a colocar.

Los parámetros por modificar se realizan de forma individual, de tal manera que detecte el impacto que tiene cada una de estas en el modelo de deterioro propuesto. A continuación, se presentan los casos de análisis:

- Caso 1: el espesor de MAC cambia a 10 cm
- Caso 2: el módulo dinámico MAC aumenta a 6000 MPa
- Caso 3: la base granular aumenta de espesor a 40 cm
- Caso 4: se coloca una base estabiliza con el mismo espesor que la base granular de la estructura patrón, pero con un módulo de 4482 MPa.

Con ello y mediante un programa de multicapa elástica para el análisis estructural de pavimentos flexibles (PITRA-PAVE), se determina el esfuerzo al que es sometido la última fibra en tensión de la MAC para todos los casos de estudio. La carga aplicada corresponde al peso por llanta doble del vehículo de diseño T3-S2, siendo esta 4500 lb con una presión de inflado de 90 psi y distancia de centro a centro de llanta 16 in (Sibaja, 2014). La respuesta mecánica de cada caso (para la ubicación debajo de llanta y a la profundidad de 15 cm) se presenta en el Cuadro 31.

Cuadro 31. Respuesta mecánica de los casos de estudios

Respuesta mecánica	Patrón	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Esfuerzo en la última fibra MAC (MPa)	0,64	0,89	0,86	0,60	-0,093

Nota: se asume que el módulo de la sobrecapa asfáltica es el del sistema intercapa (capa existente-geomalla-sobrecapa), el cálculo del módulo compuesto es parte de las recomendaciones de esta investigación.

Al realizar la comparativa en la predicción de ciclos a fatiga para todos escenarios (Cuadro 32), se determina que el modelo es más sensible a variaciones de módulo dinámico que de esfuerzo debido a la magnitud de la constante k_3 . Al comparar los resultados de los escenarios planteados dentro del modelo predictivo se tiene que:

- Disminuir el espesor de carpeta asfáltica provoca un aumento en el esfuerzo a tracción en la última fibra de esta. Debido a ello la capacidad en ciclos de carga decrece súbitamente a solo 2,88% de la capacidad de la estructura patrón.
- Aumentar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica provoca que aumente también el esfuerzo a tensión, sin embargo, en este caso hay una mejora en el desempeño a fatiga en dos órdenes de magnitud en comparación con la estructura patrón. Porcentualmente se incrementa a más de 20000%.
- Incrementar el espesor de la base granular provoca una menor concentración de esfuerzos a tensión en la carpeta asfáltica y un aumento de ciclos de carga de 200%.
- El cuarto caso de análisis no aplica dentro del modelo de deterioro propuesto, añadir una base estabilizada con una mayor rigidez que la mezcla asfáltica provoca que la carpeta asfáltica no trabaje en tensión, es decir, la ecuación calibrada no aplica para sistemas donde la carpeta asfáltica trabaje en compresión.

Cuadro 32. Análisis de sensibilidad de las variables independientes del modelo de desempeño

Modelo de deterioro	Patrón	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Ciclos a fatiga (Nf)	$3,72 \times 10^5$	$1,07 \times 10^4$	$7,84 \times 10^7$	$7,45 \times 10^5$	NA
% Ciclos respecto a la estructura patrón	NA	2,88	>20000	200	NA

Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

De la revisión bibliográfica:

- En base a investigaciones y la especificación de Caltrans (2018), para desarrollar el mecanismo de refuerzo o alivio de esfuerzos en sobrecapas asfálticas, se utilizan geomallas o geocompuestos con altos puntos de fusión y resistencia a tensión que superen los 50 kN.
- El proceso constructivo de sobrecapas asfálticas reforzadas con geosintéticos expuesto por Rubio (2021), resulta en una guía simplificada que ayuda a evitar malas prácticas en campo y da recomendaciones para mejorar la efectividad de la intervención.
- La tasa asfalto residual a dosificar (recomendada por diferentes autores) es de 0,4 l/m² sobre la primera capa o capa existente donde se coloca la geomalla. Se destaca que, dependiendo del contenido de asfalto en la emulsión asfáltica, la tasa de esta última será evidentemente mayor.
- El estado del arte muestra que, existen mejoras significativas en el desempeño a fatiga de la carpeta asfáltica, al incluir geosintéticos dentro de la matriz de este. Esto además beneficia el reflejo de grietas.
- Para rehabilitaciones o construcciones nuevas, la ubicación del geosintético que garantiza un refuerzo de la carpeta asfáltica, es a 1/3 de la última fibra a tensión. Otras ubicaciones ayudan sobre todo al alivio de esfuerzos y retardo en el reflejo de grietas.
- No existe aún un claro consenso sobre el tipo de señal, carga y frecuencia entre los ensayos de fatiga en mezcla asfáltica, lo que vuelve aún más difícil comparar resultados.
- Distintas ecuaciones de fatiga (para predecir el desempeño de la carpeta asfáltica) han sido calibradas por diferentes autores y centros de investigación y la distinta respuesta obtenida entre ellas, ejemplifica la complejidad y variabilidad que se tiene al modificar parámetros volumétricos y condiciones del ensayo.
- Los periodos de descanso permiten que el concreto asfáltico pueda "recuperarse" y aliviar el esfuerzo al que es sometido por cargas de tránsito (efecto viscoelástico). Además, el módulo de rigidez no sufre grandes cambios con esta condición (descanso de 0,9 s a 20 °C), pero sí ayuda a disipar energía dentro de la matriz de este. Se concluye una mayor

vida a fatiga bajo estas condiciones (Pugazhenti, Lakshmi, Padmarekha, & Murali Krishnan, 2019).

Del esquema experimental y el ensayo a flexión:

- La calibración de vacíos para los diferentes ensayos requiere de al menos 3 especímenes.
- Si se utiliza compactador de bloques "*Asphalt shear box compactor*" y se desea realizar dos capas, es aconsejable que a la primera capa compactada se le corte 0,5 cm en dos de sus bordes, esto con el fin de que la misma entre en el molde del compactador.
- La forma de compactación puede influir en la transmisión de cortante entre capas, esto es producto de un análisis visual entre la investigación realizada en comparación con Leiva (2017) y Picado (2018).
- Existe un mejor desempeño a fatiga en las probetas con sobrecapa asfáltica de mayor módulo dinámico para todos los niveles de esfuerzo.
- El sistema "capa existente-geomalla-sobrecapa asfáltica" actúa en su mayoría como un solo espesor, por lo que el esfuerzo cortante que da origen a las grietas no se traslada paralelamente a la interfaz donde se ubica el geosintético. Sólo en algunos de los casos se pudo observar que la grieta se desvía en dicha interfaz.
- Las grietas iniciales por tracción se presentan en promedio cuando el LVDT registra un 1 mm de deformación total en la última fibra a tensión, siendo estas grietas ya apreciables a la vista como se muestra en la Figura 44. Mientras que cuando la grieta alcanza 2/3 de altura o espesor de la carpeta asfáltica, el LVDT registra en promedio a 3,5 mm de deformación y la falla del espécimen es inminente.
- Cuando la grieta se traslada hasta la interfaz, esta se mantiene en esta ubicación hasta 370 ciclos de carga hasta que falla la geomalla, lo cual evidencia el efecto de refuerzo del sistema intercapa.
- Numéricamente para las vigas MC-C si el esfuerzo incrementa de 4,54 MPa a 4,89 MPa, la cantidad de ciclos que la grieta está en la interfaz se reduce a 24% y la tasa de deformación a tracción aumenta en un 386%. No obstante, al aumentar de 4,89 MPa a 5,24 MPa la cantidad de ciclos no se reduce y la tasa de deformación a tracción se mantiene en valores muy similares (a grandes esfuerzos no hay cambios apreciables).
- Aumentar el esfuerzo de 3,25 MPa a 3,5 MPa en las vigas MC-M se traduce en una reducción de 37% en que la grieta se mantiene en la interfaz y un aumento de 332% en

la tasa de deformación a tracción. Incrementar el esfuerzo de 3,5 MPa a 3,75 MPa reduce en 80% los ciclos y la deformación aumenta en 107,5%

- El modificante no asegura un mejor desempeño a fatiga, cada polímero tiene una función específica como aditivo para modificar el asfalto y depende la afinidad entre estos (el caso de estudio ejemplifico que el butonal fue empleado para mejorar deformación permanente y no fatiga). Es importante estudiar su afinidad química con el asfalto y agregado.
- La mezcla de graduación menos densa y modificada presenta menor capacidad a fatiga, sin embargo, no puede compararse de manera directa con la mezcla convencional ya que varían aspectos como: granulometría, diseño de mezcla, aditivo modificante, fuente de asfalto y el PG del asfalto.

De la fase de modelación y análisis

- Los parámetros de esfuerzo a tracción en última fibra de la carpeta asfáltica y módulo dinámico son las que aportan de forma significativa al modelo de desempeño propuesto (pues solo se tiene dos tipos de mezcla). Se recalca que se asume el módulo de la sobrecapa como el compuesto de carpeta existente-geomalla-sobrecapa.
- Los parámetros de granulometría, contenido de asfalto y vacíos sobre el agregado mineral no aportan significativamente al modelo pues solo se trabajó con dos tipos de mezcla asfáltica. El módulo dinámico es la excepción al tener magnitudes distintamente notables entre mezclas.
- El análisis de sensibilidad determina que el módulo dinámico tiene mayor impacto dentro del modelo que la variable de esfuerzo a tracción. Esto debido a que estadísticamente la constante de regresión lineal múltiple tiene mayor magnitud para este primer parámetro.
- El modelo de deterioro no puede aplicarse si la configuración de la estructura de pavimento provoca esfuerzos a compresión en la última fibra de la carpeta asfáltica.
- Bajos esfuerzos a tensión en la carpeta asfáltica resultan en una mayor cantidad de ciclos de carga antes de la falla.
- Incrementos en el módulo dinámico mejora el desempeño a fatiga según el modelo de deterioro propuesto y las mezclas analizadas, sin embargo, deben realizarse más análisis que permitan validar esta tendencia.

4.2. Recomendaciones

- En futuras investigaciones es de importancia poder variar el tipo de geomalla a utilizar e identificar la o las propiedades índices del geosintético que influye en la vida a fatiga del sistema intercapa. Estas pueden incorporarse en la predicción de la mejora en la vida útil de la estructura intervenida
- Realizar especímenes sin refuerzo y contemplar mezclas asfálticas con distintos módulos dinámicos con el fin de demostrar si el efecto de refuerzo de la geomalla es más alto en algún caso.
- Evaluar en la estimación de cantidad de material las pruebas necesarias para calibrar vacíos, verificación de la calidad, probetas de prueba, probetas de control y módulo dinámico.
- Muestrear asfalto base y/o modificado de cada tipo de mezcla con la que se trabaje para determinar su PG y determinar su influencia en la capacidad a fatiga de la mezcla asfáltica.
- Con el fin de asegurar una mayor esbeltez de la viga, se recomienda que exista una luz de al menos seis veces el ancho o altura de la probeta en futuras investigaciones. Tal y como lo establece la normativa europea UNE-EN 12697-24.
- Profundizar en la estimación de la carga a aplicar, esto bajo un escenario de cargas cíclicas y la respuesta del material ante estas. Una modelación en elemento finito resultaría en datos más precisos y mejoraría el cálculo del módulo compuesto (capa existente-geomalla-sobrecapa).
- Es recomendable realizar un estudio que compare el desempeño a fatiga que tienen distintas mezclas asfálticas "finas" y "gruesas", bajo diferentes condiciones de diseño.
- Extender el estudio a tramos de prueba donde se aplique sobrecapas asfálticas reforzadas con geomalla, esto con el fin de ver la influencia de todas las capas de la estructura de pavimento flexible en la disipación de cargas, agrietamiento reflectivo y pueda así calibrarse una ecuación bajo condiciones de campo.

Bibliografía

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2017). *AASHTO M288-17: Standard Specification for Geotextile Specification for Highway Applications*.
- AASHTO-T321. (2017). *AASHTO T321-17: Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending*.
- Ahmed Ebrahim , A.-M. (2012). *Fatigue and rutting lives in flexible pavement*. Shibben El-kom, Egypt: Ain Shams Engineering Journal.
- Alfaro, M., Flores, J., & Martinez, C. (2016). *Estudio comparativo de las leyes de fatiga en mezclas asfálticas convencionales haciendo uso de la viga de fatiga*. El Salvador: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de el Salvador.
- Alvarado , S. (2012). *Análisis técnico sobre el uso de geomallas de refuerzo para la pavimentación y repavimentación de carreteras*. Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Arias, B. E. (2020). *Propuesta para la guía de diseño mecanística-empírica para pavimentos flexibles y semi-rígidos de Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- ASTM. (2018). *ASTM-C78:Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.
- ASTM-D8044-16. (2016). *Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures*.
- ASTM-International. (2015). *ASTM D5262:Standard Practice for Determination of Long-Term Strength for Geosynthetic Reinforcement*.
- ASTM-International. (2020). *ASTM D4439-20, Standard Terminology for Geosynthetics*.
- Ávila, E., Badilla, V., & Aguiar, M. (2013). *Calibración del modelo de serviciabilidad de pavimentos flexibles de AASHTO para Costa Rica*. San José, Costa Rica: PITRA, LanammeUCR.

- Barksdale, R. (1971). *Comprehensive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic test*. School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Caltrans, C. D. (2018). *Standard Specifications*. California, USA.
- Christopher, T., Tania, Á., José Pablo, A., & Luis Guillermo, L. (2018). *Costa Rica's Mechanical Empirical Design Software for Flexible*. San José Costa Rica: LanammeUCR.
- Cicero, S., Gutierrez-Solana, F., Madrazo, V., & Álvarez, J. (2015). *Una aproximación a la propagación de fisuras por fatiga a través de la integral J*. Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria.
- Coronado, I. (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Secretaría de Integración Económica Centroamerica.
- Díaz, G., Escobar, V., & Olivo, M. (2009). *Aplicación de los geosintéticos en la estructura de los pavimentos y en obras de drenaje para carreteras*. Salvador: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de el Salvador.
- Geomatrix. (2015). *Guía de instalación geomallas fortgrid asphalt*. Bogotá, Colombia.
- Ghuzlan, K., & Carpenter, S. (2000). *Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue*. Washington, D.C.: Journal of the Transportation Research Board, No. 1723, National Research Council.
- Guerrero, S. (2015). *Buenas prácticas constructivas en la aplicación de riego de liga para la colocación de sobrecapas asfálticas*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- Guerrero, S., Herra, L., Loría, L., Salas, M., Sequeira, W., & Zuñiga, A. (2019). *Guía para Inspectores: Aplicación de Riego de Liga*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- Katiyar, Q. I. (2018). *Análisis de desempeño de geosintéticos como sistemas intercapa en pavimentos flexibles*. Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- Koerner, R. (2005). *Designing with geosynthetics*. New Jersey, United States of America: Prentice Hall.

- LanammeUCR. (2019). *Informe de evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Leiva, F. (2004). *Módulo dinámico de mezclas asfálticas*. San José: LanammeUCR. Universidad de Costa Rica.
- Leiva, P. (2013). *Herramienta de cálculo de la curva maestra de módulo dinámico*. San José: LanammeUCR. Universidad de Costa Rica.
- Leiva, P. P. (2011). *Cuantificación del efecto de confinamiento de un geosintético en estructuras de pavimento*. San José, Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- Leiva, P. P. (2016). *Utilización de geosintéticos en pavimentos como estrategia contra el reflejo de grietas*. Costa Rica: Trabajo Final de Graduación en Maestría. Universidad de Costa Rica.
- Leiva-Villacorta, F., Vargas-Nordcbeck, A., Aguiar-Moya, J., & Loria-Salazar, L. (2016). *Calibration of a Mechanistic-Empirical Fatigue Model Using the PaveLab Heavy Vehicle Simulator*. Transportation Research Board 95th Annual Meeting (No. 16-3509).
- Loría, G., Arce, M., Elizondo, F., & Aguiar, J. (2004). *Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas asfálticas en caliente*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- Loría, L. G. (2008). *Reflective Cracking of Flexible Pavements: Literature, Review, Analysis Models, and Testing Methods*. Nevada: ProQuest Information and Learning Company.
- Loría, L. G. (2013). *Breve resumen sobre los conceptos más importantes de la mecánica de la fractura*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- Loría, S. L. (2013). *Desarrollo de la guía de diseño de pavimentos de Costa Rica: CR_ME*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR.
- Lytton, R. (1989). *Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete*. Geotextiles and Geomembranes , Vol. 8, 217-237.

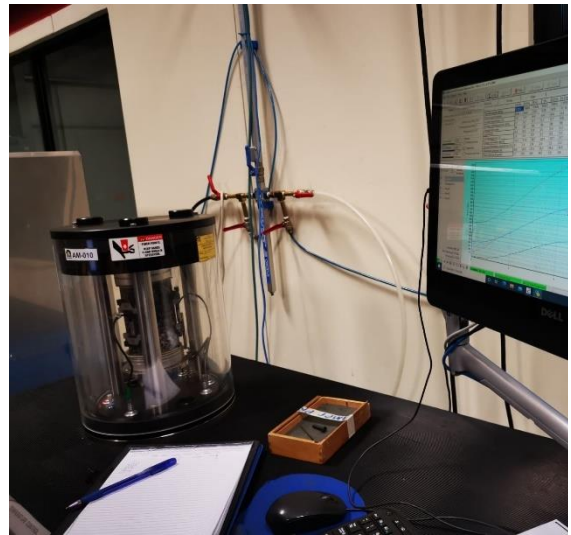
- MOPT. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR.2010*. San José, Costa Rica.
- MOPT. (2016). *Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica: Guía para Técnicos*. Costa Rica.
- Nithin, S., Rajagopal, K., & Veeraragavan, A. (2015). *State-of-the Art Summary of Geosynthetic Interlayer Systems*. Indian Geotechnical Society.
- País, J. P., & Minhoto, M. (2010). *The Prediction of fatigue life of asphalt mixtures using four-point bending tests*. Melbourne, Australia: ARRB Conference – Building on 50 years of road and transport research.
- Paris, P., Gomez, M., & Anderson, W. (1961). *Rational Analytic Theory of Fatigue*. The Trend in Engineering 13.
- PAVCO. (2016). *Geomallas coextruídas y de fibra de vidrio*.
- Pereira, A. (2002). *Utilización de Geotextiles en el Refuerzo de un Pavimento aplicado en un Tramo Experimental*. Universidad Federal de Río de Janeiro: COPPE.
- Picado, M. M. (2018). *Evaluación de la resistencia a fatiga por reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos*. Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- Presidencia de la Republica de Costa Rica. (2019). *Proyectos que impactaron el desarrollo vial de Costa Rica en 2019*. San José, Costa Rica. Retrieved from <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2019/12/decenas-de-proyectos-impactaron-el-desarrollo-vial-de-costa-rica-en-2019/#:~:text=Decenas%20de%20proyectos%20impactaron%20el%20desarrollo%20vial%20de%20Costa%20Rica%20en%202019,-Inicio&text=Destacan%20obra>
- Pugazhenti, A., Lakshmi, S., Padmarekha, A., & Murali Krishnan, J. (2019). *Influence of Rest Period on the Fatigue Response of Bituminous Mixture at Low Temperature*. India: Chinese Society of Pavement Engineering: International Journal of Pavement Research and Technology.

- R.M, A., & R.A, B. (2001). *INFLUENCE OF VOIDS IN THE MINERAL AGGREGATE (VMA) ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF COARSE AND FINE ASPHALT MIXTURES*. Clearwater Beach, Florida: White Bear Lake, MN : Association of Asphalt Paving Technologists.
- Rubio, J. (2021). *Uso de materiales geosintéticos en Costa Rica para el refuerzo de sobrecapas asfálticas. ¿Dónde estamos y hacia dónde vamos? Sección I: Aspectos generales*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- Salvador, W. (2012). *Análisis del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas a partir del nuevo procedimiento de ensayo EBADE 722-TFM-326*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña: Que para optar por el título de maestría en Infraestructura del Transporte y del Territorio.
- SHELL. (1978). *SHELL pavement design manual: asphalt pavement and overlays for road traffic*. London: SHELL INTERNATIONAL.
- Sibaja, L. (2014). *Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica San Pedro.: Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.
- Solano, R. M. (2016). *Estimación de la dosificación apropiada de ligante asfáltico en la rehabilitación de pavimentos flexibles con uso de geosintéticos*. San José, Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- Solatiyan, E., Bueche, N., & Carter, A. (2020). *Una revisión sobre el comportamiento mecánico y las consideraciones de diseño para pavimentos bituminosos reforzados y rehabilitados*. Elsevier Ltd.
- Solórzano , M., Salas, C., Sequeira, R., & Loria, S. (2015). *Guía para inspectores para la colocación de sobrecapas asfálticas*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- TENSAR. (2016). *Geomalla TENSAR TriAx (TX)*.
- Terhi K, P., Donald W, C., Geoffrey M, R., & Mark, S. (2004). *Fatigue-Transfer Functions: How Do They Compare?* Transportation Research Record.

- UNE-EN-12697-24. (2019). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 24: Resistencia a fatiga*. España, Madrid: Asociación Española de la Carretera.
- Vargas Nordbeck, A. (2014). *Evaluación de resistencia al agrietamiento por fatiga de mezclas asfálticas mediante el enfoque de energía disipada*. San José, Costa Rica: Unidad de Materiales y Pavimentos, LanammeUCR.
- Vial. (2016, octubre 12). Refuerzo de bases granulares con geosintéticos. *Vial*.
- Witzack, M. (2002). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, NCHRP 1-37A*. Washington DC: AASHTO.
- Wu, R., Harvey, J., Buscheck, J., & Mateos, A. (2017). *Mechanistic-Empirical (ME) Design: Mix Design Guidance for Use with Asphalt Concrete Performance-Related Specifications*. University of California Pavement Research Center Department of Civil and Environmental Engineering, UC Davis.

Anexos

Anexo A. Ensayo módulo dinámico



Anexo B. Salida ensayo módulo dinámico mezcla asfáltica convencional

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo Dinámico (MPa)	Ángulo de Fase (°)
4.47	25.00	18534.00	6.11
4.47	10.00	17426.00	6.62
4.47	5.00	16581.33	7.14
4.43	1.00	14569.33	8.43
4.50	0.50	13665.00	9.17
4.43	0.10	11613.33	11.08
21.13	25.00	11948.67	11.75
21.17	10.00	10587.00	13.08
21.20	5.00	9567.00	14.16
21.17	1.00	7396.33	17.10
21.13	0.50	6521.00	18.38
21.10	0.10	4675.00	22.10
37.80	25.00	5225.00	23.05
37.80	10.00	4196.33	24.87
37.83	5.00	3507.67	26.03
37.83	1.00	2172.33	28.86
37.80	0.50	1729.00	29.52
37.80	0.10	959.97	30.85
54.30	25.00	1945.67	54.30
54.40	10.00	1364.00	54.33
54.40	5.00	1023.70	54.37
54.40	1.00	487.70	54.37
54.40	0.50	358.83	54.33

Anexo C. Salida ensayo módulo dinámico mezcla asfáltica modificada

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo Dinámico (MPa)	Ángulo de Fase (°)
4.3	25	14870.00	6.38
4.3	10	13787.33	7.99
4.3	5	12979.00	8.53
4.3	1	11106.00	10.03
4.4	0.5	10324.67	10.66
4.4	0.1	8436.00	13.00
21.2	25	8707.67	14.03
21.1	10	7604.33	15.36
21.1	5	6812.33	16.37
21.1	1	5084.00	19.11
21.1	0.5	4432.33	20.24
21.1	0.1	3064.33	23.49
37.8	25	3756.67	24.45
37.8	10	2977.67	25.96
37.8	5	2471.00	26.71
37.8	1	1511.00	28.51
37.8	0.5	1211.67	28.74
37.8	0.1	684.83	29.47
54.4	25	1458.33	30.56
54.4	10	1037.93	30.51
54.4	5	797.40	29.99
54.4	1	398.40	29.48
54.4	0.5	302.23	28.52
54.4	0.1	168.20	26.11

Anexo D. Resumen diseño de mezcla asfáltica Superpave (MAC modificada con Butanol NX 1129)

Con base en el estudio de los valores obtenidos, curvas Volumétricas y criterios de diseño establecidos en nuestro país, se define un valor óptimo de 6,00 % de asfalto sobre la mezcla, este asfalto debe ser modificado con 3.57 % (líquido total) de polímero Butonal NX 1129. Aplicándose el criterio de cumplimiento de propiedades volumétricas (Vacíos de aire, VMA y VFA).

Con este porcentaje óptimo se tienen las siguientes características de la Fórmula de Trabajo de la mezcla, la cual cumple con las especificaciones propuestas para el proyecto:

GRANULOMETRÍA OPTIMA DE DISEÑO Y TOLERANCIA DE ESPECIFICACIONES

TAMIZ	% PASANDO Graduación 19,1 mm	TOLERANCIA DEL DISEÑO	TOLERANCIA CR-2010 SEC 402 DG-20 Tabla N°703-09
25 mm	100	100	100
19,1 mm	100	95-100	80-100
12,5 mm	80	75-85	60-85
9,5 mm	63	58-68	50-75
Nº 4	48	44-52	30-53
Nº 8	32	28-35	18-35
Nº 16	22	18-24	12-24
Nº 30	16	12-17	8-17
Nº 50	12	8-12	5-12
Nº100	8	6-9	3-9
Nº 200	6,0	3,0-7,0	2-8

PARÁMETROS DE LA MEZCLA CON RANGO DE ASFALTO ESPECIFICACIÓN.

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN	RANGO DE TRABAJO		
Contenido de asfalto sobre mezcla	%	5,50	6,00	6,50
GBS Pastillas	-	2,326	2,359	2,386
GEMT	-	2,466	2,457	2,449
Vacíos de aire	3,0%-5,0%	5,7	4,0	2,6
VMA	13% mínimo	14,3	13,6	13,0
VFA (ESALs >30X10 ⁶)	65% - 75%	60,6	70,6	80,1
Razón polvo / asfalto	0,6 - 1,3	1,30	1,19	1,10
% Asfalto efectivo	%	3,82	4,18	4,53

Solicitado por: Dagma, Process
R# registros: 188

Procedencia: Planta Moja
Fecha Muestra: 2018-01-10
Fecha de Reporte: 2018-01-18

Código de Proyecto: 0104018-01-01-0113
Código de Plant: 1000
Volumen por m³: 2.93234

Tipo de muestra: ASFALTO AC-10

Método de ensayo (1)	Prueba	Resultado	Límites de especificación	ASFA 10 (2018)
**ISO 1171	Densidad a 15°C	2.386 (2.386) g/cm ³	Min.	F.W.1
**ASTM D-95	Temperatura de inflamación	270.0 (2.4) °C	Min.	G.S.2
**ASTM D-2170	Viscosidad a 115°C	100 (4) mPa.s	Min. 100	F.W.2
**ASTM D-2170	Viscosidad a 145°C	11.7 (0.3) mPa.s	Min. 10	G.S.3
**ASTM D-2170	Viscosidad a 175°C	2.9 (0.1) mPa.s	Min. 1.0	F.W.3
**ASTM D-3	Penetración (a 25°C, carga 100g, 10s)	276 (2.1) mm	Min. 270 mm	G.S.4
**ASTM D-502	Estabilidad en condiciones de ensayo como fricción entre de asfalto	25.4 (0.5) %	Min. 20.0 %	G.S.5
**ASTM D-1754	Cambio en fricción entre partículas de asfalto y arena	10.1 (0.1) %	Min. 0.0 %	G.S.6
**ASTM D-1771	Viscosidad post-pavida a 145°C	176.2 (7) Pa.s	Min. 150.0 Pa.s	G.S.7
**ASTM D-1113	Densidad post-pavida a 25°C	2.332 (0.006) g/cm ³	Min. 2.290 g/cm ³	G.S.8
**Cálculo	Índice de Sangre de la Termost. V15	1.1 unidades	Min. 1.0 unidades	F.W.4
**Cálculo	Separación de Viscosidad Absoluta	1 unidades	Min. 0.5 unidades	G.S.9
**ASTM D-670	Muestra de Muestra para análisis de Densidad	Samples	Min. 100g	F.W.5

REGULACION: RESOLUCION 12 DE 2001 (MERCADOPT, 0011, MERCADOPT, 1011, 111), Decreto 27, 2012 (CONSEJO NACIONAL DE CONTROL DE CALIDAD) y Reglamento Técnico de Control de Calidad.

OBJETIVO: "Ensayo de densidad bajo vacuum", "Ensayo de viscosidad", Aplicación de ensayos a la norma INTE-TECHNICAL 1928-2005. Para obtener un nuevo ensayo. Los valores de punto de referencia para ensayos a 115°C y 145°C son 100 mPa.s y 11.7 mPa.s respectivamente. El ensayo de fricción entre partículas de asfalto y arena se realizó a 175°C para el ensayo de fricción de asfalto y arena. El ensayo de fricción entre partículas de asfalto y arena se realizó a 175°C para el ensayo de fricción de asfalto y arena.

Calidad de los puntos de trabajo:

Comprobación	Resultado
Muestra	100
Temperatura	115

Los ensayos se realizaron de acuerdo a ASTM D-1754, se realizaron ensayos de fricción entre partículas de asfalto y arena.

Responsable Técnico: **Dr. Diego Carrillo Latorre**
Nombre: **Latorre**



2018-01-18
Prueba por laboratorio controlado

Dirección de la Planta Moja: Dagma, Process

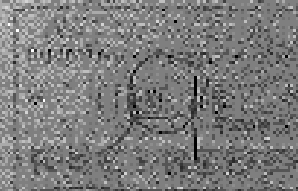
Los resultados de los ensayos de laboratorio se reportan en este informe de laboratorio. Los resultados de los ensayos de laboratorio se reportan en este informe de laboratorio. Los resultados de los ensayos de laboratorio se reportan en este informe de laboratorio.

Código: Sistema
Aplicación:

Código: Laboratorio, Departamento de Control de Calidad

Teléfono: (02) 2902444

Código: Proyecto, Muestra de Laboratorio



Prueba Control



Galapagos - Laboratorios - Ushuaia - Uspallata - Central de Unidad



INFORME ANÁLISIS DE MEZCLA ASFÁLTICA SUPERPAVE

(Los resultados se refieren únicamente a los objetos del ensayo)

Laboratorio:	Vieta, Central.	Ubicado en:	San Luis, Heredia.
Informe No:	21-PCN-0275-7058	Fecha:	08 abril del 2021

Información del cliente

Señor (a):	Marilyn Sola Montenegro	Código:	7058
Cliente:	OFICINA DE LAS NACIONES UNIDAS DE SERVICIOS PARA PROYECTOS UNOPS	Colización:	CON-CRPC-2019-04
Dirección:	San José, Puyo	Orden de compra:	Boleta No. 454

Información del proyecto

Proyecto:	Circunvalación Norte RN 30	Fecha producción:	30/03/2021
Fabricante:	H Sols.	Hora:	08:30:00
Localización del muestreo:	Transporte en: Campo	Bitácona:	---
Agregados procedentes de:	Quebrador Guápiles	Gradación de la mezcla:	10,00 mm
Tamaño muestra:	1 Caja	Temperatura de muestreo:	170 °C
Diseño de mezcla utilizado:	40-265-2018		
Fecha de ingreso de muestra al laboratorio:	05-04-21		
Fecha de inicio ejecución de los ensayos:	05-04-21		
Fecha en que se terminaron los ensayos:	07-04-21		

Métodos de Ensayo Utilizados

Plan de muestreo según orden de trabajo y siguiendo INS-L-007 (INTE C12, ASTM D679, AASHTO T166)*

Método estándar para reducir muestras de mezcla asfáltica al tamaño de ensayo INS-L-068 (AASHTO R47)*

Contenido bitumen de mezclas asfálticas por NCAT INS-L-010 (INTE C9, ASTM D6307, AASHTO T306)*

El valor Smp para este ensayo es de 0,00%, con un nivel de confianza de 90% y factor de cobertura de 1,4333

Granulometría agregados extraídos de mezcla asfáltica INS-L-015 (INTE C13, ASTM D6444, AASHTO T307)*

El valor Smp para este ensayo se muestra en el cuadro adjunto

Gravedad específica máxima teórica INS-L-002 (INTE C3, ASTM D2041, AASHTO T269)*

El valor Smp para este ensayo es de 3,000 con un nivel de confianza de 98% y nivel de cobertura de 1,0211

Gravedad específica mezclas asfálticas INS-L-006 (INTE C1, ASTM D2726, AASHTO T166)*

El valor Smp para este ensayo es de 4,300 con un nivel de confianza de 98% y nivel de cobertura de 1,2200

Preparación y determinación de densidad relativa HMA por medio del Compactador Giratorio Superpave INS-L-112 (AASHTO T312)*

El valor Smp para este ensayo es de 0,7% con un nivel de confianza de 98% y factor de cobertura de 1,077

Contenido de humedad INS-L-152 (AASHTO T329)*

El valor Smp para este ensayo es de 2,70% con un nivel de confianza de 98% y factor de cobertura de 1,0214

Contenido de Vacíos INS-L-017 (INTE C4, ASTM D3203, AASHTO T269)*

El valor Smp para este ensayo es de 1,12 % con un nivel de confianza de 98% y factor de cobertura de 1,4333

Nota: La densidad máxima experimental (Smp) reportada, se debió tomar la densidad máxima estándar de la mezcla multiplicada por un factor de cobertura k que corresponde a la probabilidad de cobertura aproximadamente del 95%.



Resultados de ensayos

Contenido bitumen de mezclas asfálticas por NCAT INS-L-010 (INTE C9, ASTM D 6307, AASHTO T308)

Peso inicial de muestra:	1723,7 g		
Peso de pérdida:	115,0 g		
Factor de calibración agregado:	0,49		
Factor de compensación:	0,17		
Temperatura de ensayo:	540 °C		
% Humedad:	0,07 %		
% BITUMEN / MEZCLA:	6,00 %	ESP:	5,5 - 6,5 %
% BITUMEN / AGREGADO:	6,38 %		

Granulometría Agregados Extraídos de mezcla Asfáltica INS-L-015 (INTE C13, ASTM D6444, AASHTO T30)

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
TAMIZ	Pasando %	Eq. Con tolerancia	Incertidumbre (Uexp; k al 95%)
25,4 mm	100	100	-
19,0 mm	98	95 - 100,0	Uexp = 4,303%; k= 1,00
12,7 mm	81	75 - 85	Uexp = 4,300%; k= 1,00
9,5 mm	70	58 - 88	Uexp = 4,300%; k= 1,00
No 4	45	44 - 52	Uexp = 4,300%; k= 1,00
No 8	30	28 - 38	Uexp = 4,300%; k= 1,00
No 16	21	18 - 24	Uexp = 4,303%; k= 0,20
No 30	15	12 - 17	Uexp = 1,950%; k= 0,20
No 60	10	8 - 12	Uexp = 1,950%; k= 0,20
No 100	7	5 - 9	-
No 200	4,3	3 - 7	Uexp = 1,950%; k= 0,30

Gravedad específica máxima teórica INS-L-002 (INTE C3, ASTM D2041, AASHTO T208)

GRAVEDAD ESPECÍFICA AG-30:	1,033
GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA DE LOS AGREGADOS:	2,565
Numero de muestras:	2
Peso promedio de las muestras:	1591 g
PROMEDIO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁX. TEÓRICA @MM a 25 °C:	2,471
GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA	2,712
ASFALTO ABSORBIDO:	2,18 %
ASFALTO EFECTIVO:	3,82 %

Resultados de ensayos

Gravedad específica mezclas asfálticas INS-L-006 (INTE 1, ASTM D 2728, AASHTO T188)

ESPECIMEN	PESO EN GRAMOS			VOLUMEN cm ³	GSI a 25 °C	DENSIDAD kg/m ³	% ABS	M _d 125 g/m ² mm	% Compactación
	EN AIRE	EN AGUA	SUP. SAT. SECA						
1	4735,7	3758,3	4742,7	1888,4	2,384	2384	0,35	115,8	98,5
2	4735,4	3757,8	4745,5	1887,8	2,382	2382	0,51	115,8	98,4
3	4738,5	3763,7	4748,1	1885,4	2,387	2387	0,38	115,8	98,8
PROMEDIO	—	—	—	—	2,384	2384	0,41	115,8	98,5

Contenido de vacíos INS-L-017 (INTE C4, ASTM D3203, AASHTO T288)

Vacíos en la mezcla:	3,5 %	3,0 a 5,0 %
Vacíos en agregado mineral:	12,6 %	13 % mínimo
Vacíos llenos de asfalto:	72 %	65 - 75 %

Especificación:

Observaciones:

La mezcla asfáltica analizada, no cumple por presentar gradación fuera de la tolerancia en la malla 0,5 mm y VAM por debajo del porcentaje mínimo especificado.

 Ing. Yvan Infante
Verificación de calidad

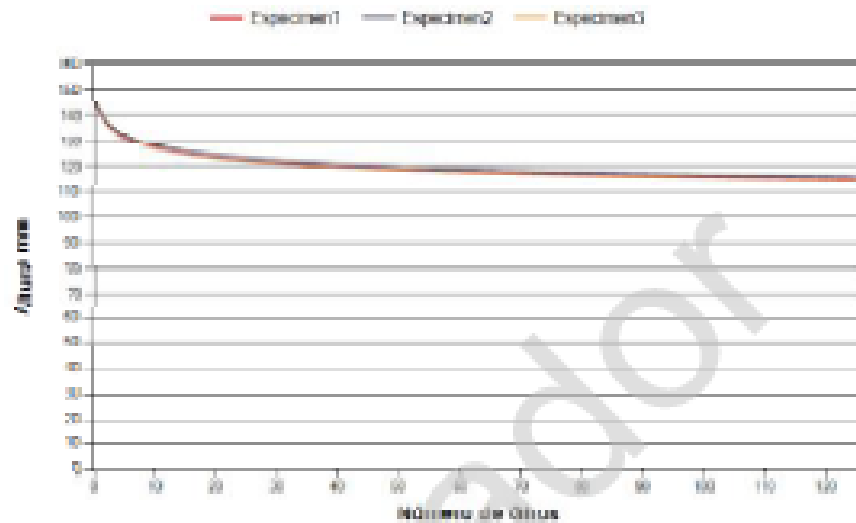
 Ing. Ezequiel Viato
Verificación de calidad

C.c Archivo

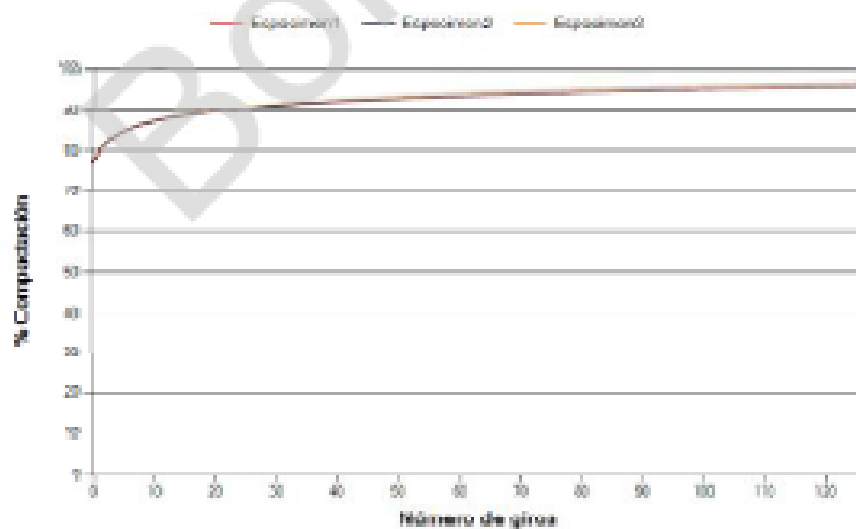
 Nos complace informarle que Vieta y Asociados ha alcanzado la acreditación ECA, alcance LE-023 bajo la norma INTE-ISO/IEC 17025:2017, cumpliendo con la ley 8279 del Sistema Nacional de Calidad, para mayor información sobre nuestro alcance visitar la página: www.eca.or.cr

Gráficas Superpave

Gráfica giro vs altura



Gráfica giro vs % compactación



* Ensayo acreditado, ver alcance en www.vieto.com.ar ** Ensayo no acreditado

21-PCN-0275-2006 Pág. 4 de 4

Documento Propiedad Intelectual de Vieto & Asociados, S.A. Prohibida su reproducción no autorizada

tel.: (506) 2268-8297 • info@vieto.com • www.vieto.com

Anexo F. Resumen diseño de mezcla asfáltica convencional

CONSTRUCTORA MECO S.A.																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
DISEÑO No. 8. AGREGADOS DEL QUEBRADOR MECO EN TARCOLES Y GUAPILES																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
COMBINACION DE MATERIALES PARA MEZCLA ASFALTICA GRADUACION DE 12,7 MM (DISEÑO CON AC-30, PROYECTOS CONAVI) <i>Convencional</i>																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
PLANTA ASTEC DE CONSTRUCTORA MECO EN LA URUGUA jueves, 27 de febrero de 2020																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
PARA PRODUCCION CORRESPONDIENTE AL																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
<table border="0"> <tr> <td>A=</td> <td>POLVO DE PIEDRA GUAPILES, NAIVE # 3, COSTADO ESTE</td> <td>FECHA GRANUL</td> <td>PERIODO</td> </tr> <tr> <td>B=</td> <td>POLVO DE PIEDRA TARCOLES, NAIVE # 0, COSTADO NORTE</td> <td>26/02/2020</td> <td>TARDE</td> </tr> <tr> <td>C=</td> <td>PIEDRA QUINTA GUAPILES, CENTRO DEL PATIO, COSTADO SUR</td> <td>26/02/2020</td> <td>TARDE</td> </tr> <tr> <td>D=</td> <td>PIEDRA CUARTILLA GUAPILES, FRENTE A LABORATORIO, COSTADO OESTE</td> <td>26/02/2020</td> <td>TARDE</td> </tr> </table>													A=	POLVO DE PIEDRA GUAPILES, NAIVE # 3, COSTADO ESTE	FECHA GRANUL	PERIODO	B=	POLVO DE PIEDRA TARCOLES, NAIVE # 0, COSTADO NORTE	26/02/2020	TARDE	C=	PIEDRA QUINTA GUAPILES, CENTRO DEL PATIO, COSTADO SUR	26/02/2020	TARDE	D=	PIEDRA CUARTILLA GUAPILES, FRENTE A LABORATORIO, COSTADO OESTE	26/02/2020	TARDE																																																																																																																																																																																																																																																																														
A=	POLVO DE PIEDRA GUAPILES, NAIVE # 3, COSTADO ESTE	FECHA GRANUL	PERIODO																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
B=	POLVO DE PIEDRA TARCOLES, NAIVE # 0, COSTADO NORTE	26/02/2020	TARDE																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
C=	PIEDRA QUINTA GUAPILES, CENTRO DEL PATIO, COSTADO SUR	26/02/2020	TARDE																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
D=	PIEDRA CUARTILLA GUAPILES, FRENTE A LABORATORIO, COSTADO OESTE	26/02/2020	TARDE																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="13">EMBONAR:</th> </tr> <tr> <th colspan="13">TOLVA 1: POLVO GUAPILES (A) TOLVA 2: VACIA TOLVA 3: QUINTA GUAPILES (C) TOLVA 4: CUARTA GUAPILES (D)</th> </tr> <tr> <td>14</td> <td>% DOSIF. DIS</td> <td>36</td> <td>20</td> <td>22</td> <td>22</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>5,70%</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>PERCENTAJES</td> <td>41</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>25</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>OPTIMO= 5,70%</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>TOLVA</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>E</td> <td>F</td> <td>G</td> <td>COMBO</td> <td colspan="2">TOLERANCIAS</td> <td>ESPEC.: 5,20% - 6,20%</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>MALLA</td> <td colspan="2">A</td> <td colspan="2">C</td> <td colspan="2">D</td> <td colspan="2">E</td> <td colspan="2">DISEÑO ITP-1184-19</td> <td>GRANULOMETRIA DE DISEÑO ITP-1184-19</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td></td> <td colspan="2">DIS</td> <td colspan="2">DIS</td> <td colspan="2">DIS</td> <td colspan="2">DIS</td> <td colspan="2">100</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td></td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>100</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>25,4</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>100</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>19</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>100</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>12,7</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>81</td> <td>57</td> <td>0</td> <td>90</td> <td>96</td> </tr> <tr> <td>23</td> <td>9,5</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>84</td> <td>89</td> <td>16</td> <td>18</td> <td>0</td> <td>76</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>No4</td> <td>79</td> <td>84</td> <td>83</td> <td>88</td> <td>12</td> <td>14</td> <td>3</td> <td>6</td> <td>0</td> <td>49</td> <td>56</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>No8</td> <td>54</td> <td>55</td> <td>55</td> <td>60</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>0</td> <td>32</td> <td>38</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>No15</td> <td>37</td> <td>37</td> <td>37</td> <td>40</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>0</td> <td>22</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>27</td> <td>No30</td> <td>26</td> <td>25</td> <td>27</td> <td>27</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>16</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>No60</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>19</td> <td>23</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>11</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>29</td> <td>No200</td> <td>7,5</td> <td>7,6</td> <td>10,5</td> <td>10,6</td> <td>2,0</td> <td>2,1</td> <td>1,1</td> <td>1,8</td> <td>0,0</td> <td>5,4</td> <td>3,7</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>5,7</td> </tr> <tr> <td>31</td> <td>HUMEDAD</td> <td>2,34%</td> <td></td> <td>4,39%</td> <td></td> <td>3,90%</td> <td></td> <td>2,30%</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2,93%</td> </tr> <tr> <td>32</td> <td>% ABS. DIS</td> <td>2,44%</td> <td></td> <td>2,95%</td> <td></td> <td>2,31%</td> <td></td> <td>2,66%</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>33</td> <td>% ABS. ACT</td> <td>2,78%</td> <td></td> <td>3,37%</td> <td></td> <td>2,17%</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </thead></table>													EMBONAR:													TOLVA 1: POLVO GUAPILES (A) TOLVA 2: VACIA TOLVA 3: QUINTA GUAPILES (C) TOLVA 4: CUARTA GUAPILES (D)													14	% DOSIF. DIS	36	20	22	22	100	100	100	100	100	100	5,70%	15	PERCENTAJES	41	16	16	25	0	0	0	0	0	0	OPTIMO= 5,70%	16	TOLVA	1	1	3	4	E	F	G	COMBO	TOLERANCIAS		ESPEC.: 5,20% - 6,20%	17	MALLA	A		C		D		E		DISEÑO ITP-1184-19		GRANULOMETRIA DE DISEÑO ITP-1184-19	18		DIS		DIS		DIS		DIS		100		100	19		100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100	20	25,4	100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100	21	19	100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100	22	12,7	100	100	100	100	100	100	81	57	0	90	96	23	9,5	100	100	100	100	84	89	16	18	0	76	85	24	No4	79	84	83	88	12	14	3	6	0	49	56	25	No8	54	55	55	60	5	5	2	3	0	32	38	26	No15	37	37	37	40	4	4	2	3	0	22	26	27	No30	26	25	27	27	3	3	2	2	0	16	19	28	No60	16	16	19	23	3	3	2	2	0	11	16	29	No200	7,5	7,6	10,5	10,6	2,0	2,1	1,1	1,8	0,0	5,4	3,7	30												5,7	31	HUMEDAD	2,34%		4,39%		3,90%		2,30%				2,93%	32	% ABS. DIS	2,44%		2,95%		2,31%		2,66%					33	% ABS. ACT	2,78%		3,37%		2,17%						
EMBONAR:																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
TOLVA 1: POLVO GUAPILES (A) TOLVA 2: VACIA TOLVA 3: QUINTA GUAPILES (C) TOLVA 4: CUARTA GUAPILES (D)																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
14	% DOSIF. DIS	36	20	22	22	100	100	100	100	100	100	5,70%																																																																																																																																																																																																																																																																																														
15	PERCENTAJES	41	16	16	25	0	0	0	0	0	0	OPTIMO= 5,70%																																																																																																																																																																																																																																																																																														
16	TOLVA	1	1	3	4	E	F	G	COMBO	TOLERANCIAS		ESPEC.: 5,20% - 6,20%																																																																																																																																																																																																																																																																																														
17	MALLA	A		C		D		E		DISEÑO ITP-1184-19		GRANULOMETRIA DE DISEÑO ITP-1184-19																																																																																																																																																																																																																																																																																														
18		DIS		DIS		DIS		DIS		100		100																																																																																																																																																																																																																																																																																														
19		100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100																																																																																																																																																																																																																																																																																														
20	25,4	100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100																																																																																																																																																																																																																																																																																														
21	19	100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100																																																																																																																																																																																																																																																																																														
22	12,7	100	100	100	100	100	100	81	57	0	90	96																																																																																																																																																																																																																																																																																														
23	9,5	100	100	100	100	84	89	16	18	0	76	85																																																																																																																																																																																																																																																																																														
24	No4	79	84	83	88	12	14	3	6	0	49	56																																																																																																																																																																																																																																																																																														
25	No8	54	55	55	60	5	5	2	3	0	32	38																																																																																																																																																																																																																																																																																														
26	No15	37	37	37	40	4	4	2	3	0	22	26																																																																																																																																																																																																																																																																																														
27	No30	26	25	27	27	3	3	2	2	0	16	19																																																																																																																																																																																																																																																																																														
28	No60	16	16	19	23	3	3	2	2	0	11	16																																																																																																																																																																																																																																																																																														
29	No200	7,5	7,6	10,5	10,6	2,0	2,1	1,1	1,8	0,0	5,4	3,7																																																																																																																																																																																																																																																																																														
30												5,7																																																																																																																																																																																																																																																																																														
31	HUMEDAD	2,34%		4,39%		3,90%		2,30%				2,93%																																																																																																																																																																																																																																																																																														
32	% ABS. DIS	2,44%		2,95%		2,31%		2,66%																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
33	% ABS. ACT	2,78%		3,37%		2,17%																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
DATOS TECNICOS A CONSIDERAR:																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
<table border="0"> <tr> <td>34</td> <td>ASFALTO DISPONIBLE: AC-30</td> <td>VISCOSIDAD 309 Pa.s</td> <td>VISCOSIDAD DE DISEÑO: 289 Pa.s</td> <td>DENSIDAD: 8,603 lbs/gal (1,031 Kg/m³)</td> <td>DENSIDAD DISEÑO: 1034,4 KG/M3</td> </tr> <tr> <td>35</td> <td>TEMPERATURA DE MEZCLADO: 315 °F - 220 °F</td> <td>157 °C - 160 °C</td> <td>TEMPERATURA COMPACTACION: 145 °C 150 °C</td> <td>MAXIMA TEORICA DISEÑO: 2466</td> <td></td> </tr> </table>													34	ASFALTO DISPONIBLE: AC-30	VISCOSIDAD 309 Pa.s	VISCOSIDAD DE DISEÑO: 289 Pa.s	DENSIDAD: 8,603 lbs/gal (1,031 Kg/m ³)	DENSIDAD DISEÑO: 1034,4 KG/M3	35	TEMPERATURA DE MEZCLADO: 315 °F - 220 °F	157 °C - 160 °C	TEMPERATURA COMPACTACION: 145 °C 150 °C	MAXIMA TEORICA DISEÑO: 2466																																																																																																																																																																																																																																																																																			
34	ASFALTO DISPONIBLE: AC-30	VISCOSIDAD 309 Pa.s	VISCOSIDAD DE DISEÑO: 289 Pa.s	DENSIDAD: 8,603 lbs/gal (1,031 Kg/m ³)	DENSIDAD DISEÑO: 1034,4 KG/M3																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
35	TEMPERATURA DE MEZCLADO: 315 °F - 220 °F	157 °C - 160 °C	TEMPERATURA COMPACTACION: 145 °C 150 °C	MAXIMA TEORICA DISEÑO: 2466																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
MUESTREO DE LA JORNADA: VIAJE ALEATORIO DE MEZCLA NUEVA PARA LA CARPETA O BACHEO CONAVI (ITP / CT) Y UN VIAJE INTERMEDIO DE MEZCLA NUEVA PARA LA CARPETA ASFALTICA DE LA MUNICIPALIDAD DE ACOSTA (SOLO ITP)																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
VERIFICAR VISCOSIDAD DEL GASOLEO CADA MEDIA HORA MINIMO Y REPORTAR A CABINA DE INMEDIATO.																																																																																																																																																																																																																																																																																																										

TABLA No. 17: PARAMETROS DE LA MEZCLA CON EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO

PARÁMETRO	VALOR OPTIMO MENOS 0,5 %	VALOR OPTIMO DE DISEÑO	VALOR OPTIMO MAS 0,5 %	ESPECIFICACION
Contenido de Asfalto	5,20	5,70	6,20	±0,50%
Vacios de aire	5,1	4,0	3,0	3.0% - 5.0%
VMA	14,77	14,73	14,75	14,0% MINIMO
Gravedad específica	2353	2368	2380	---
Gravedad específica máxima teórica	2478	2466	2454	---
Estabilidad	1500	1510	1475	800 kg MINIMO
Flujo	30,4	32,1	33,6	(20 - 35) cm/100
VFA	66	73	79	65% - 75%
% Asfalto Efectivo	4,00	4,36	4,70	---
Razón polvo/asfalto	1,42	1,30	1,20	(0.6 - 1.6) %

Solicitado por: Depto. Proceso
No. registro: 0893
Tipo de muestra: ASFALTO AC-30

Procedencia: Plantel Moín
Fecha Muestreo: 2020-02-22
Fecha de Recepción: 2020-02-22

Lote No.: A:(14)2020-0223-7511
Tanque No.: 7511
Volumen (en m³): 1 538,00

Método de ensayo (1)	Prueba	Resultado	Límites de especificación	Analista y fecha	
*ASTM D-92	Temperatura de inflamación	(352,0 ± 0,4) °C	Mínimo 232 °C	C.R.S.	2020-02-22
**ASTM D-2170	Viscosidad a 135 °C	(495 ± 47) mm ² /s	Mínimo 350 mm ² /s	RBS	2020-02-22
**ASTM D-2170	Viscosidad a 165 °C	(140 ± 13) mm ² /s	No aplica	C.W.W.	2020-02-04
*ASTM D-2171	Viscosidad a 60 °C	(282 ± 18) Pa s	(300 ± 60) Pa s	RBS	2020-02-22
*ASTM D-5	Penetración (a 25 °C, carga 100 g 5 s)	(52 ± 1,2) 1/10 mm	Mínimo 50 1/10 mm	C.R.S.	2020-02-22
**ASTM D-2042	Solubilidad en tricloroetileno expresado como fracción masa de asfalto	(99,5 ± 0,3) %	Mínimo 99,0 %	C.R.S.	2020-02-22
*ASTM D-1754	Cambio en fracción masa por efecto del calor y aire	(-0,23 ± 0,048) %	Máximo 1,0 %	C.R.S.	2020-02-22
**ASTM D-2171	Viscosidad post-pérdida 60 °C	(744 ± 18) Pa s	Máximo 1500 Pa s	F.W.J.	2020-02-22
**ASTM D-113	Ductilidad post-pérdida a 25 °C	(150 ± 20) cm	Mínimo 40 cm	F.W.J.	2020-02-22
**Cálculo	Índice de Suceptibilidad Térmica, VTS	3,5 unidades	(3,3 a 3,9) unidades	RBS	2020-02-22
**Cálculo	Relación de Viscosidades Absolutas	3 unidades	Máximo 3 unidades	FWJ	2020-02-22
*ASTM D4057	Manual de Muestreo para petróleo y Derivados	No Aplica	No Aplica	PHM	2020-02-22

REGULACIÓN: RTCA 75.01.22-04, 26501-MEIC-MOPT, 30911-MEIC-MOPT, Tabla 1B. Decreto N° 32812-COMEX-MINAE-MEIC. □
Los resultados de los análisis ejecutados cumplen con el Reglamento Técnico Centroamericano. Regla de decisión LA = S+(0,255*U*D) para una probabilidad de aceptación del 50 %.

OBSERVACIONES: *Ensayo acreditado bajo norma. **Ensayo no acreditado. Acreditación de acuerdo a la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance en www.eca.or.cr. Los valores de punto de inflamación son corregidos a 101,3 kPa. El plan de muestreo se ejecuta de acuerdo al "Instructivo para la recepción de muestras" AS-08-03-017. El dato de la viscosidad a 165°C setoma del informe 409M20, corresponde a este lote de importación.

Cálculo de temperaturas de trabajo

	Compactación	Mezcla
Máxima	151	163
Mínima	146	157

Las temperaturas se calculan de acuerdo a ASTM 1559, se informan como referencia para aplicaciones en diseños de mezcla



Responsable Técnico: Licda. Ana Isabel Alfaro Murillo
Nombre: ANA ISABEL ALFARO MURILLO (FIRMA)
Motivo: Estoy aprobando este documento
Ubicación: Control Calidad Moín
Fecha: 2020.02.23 15:25:24 -06'00'
Fecha finalización de análisis: 2020-02-22

Dirección: km 150 Ruta 32 Sandoval, Moín Limón

Los resultados de los análisis no podrán ser reproducidos parcialmente sin previa autorización del laboratorio
Se informa la incertidumbre expandida, con un factor de cobertura k=2, para un 95% de confianza

Original: Solicitante Copia: Laboratorio, Departamento Control de Calidad
Apartado: 1315-Limón Tel-Fax: (506) 2550-3737 e-mail: CallCenter.Recope@recope.go.cr

Anexo G. Estructura de pavimento flexible típica para el cálculo teórico de la carga (basado en el proyecto de Circunvalación Norte, pero con base granular)

Capa	E (psi)
Carpeta asfáltica	450 000
Base granular	30 000
Subbase	17 000
Capa de préstamo	11 500
Subrasante	4650

Anexo H. Respuesta mecánica estructura pavimento flexible típica para el cálculo teórico de la carga

Archivo Análisis Opciones Ayuda

Circunvalación norte.dat

Capas de la estructura de pavimento

Introduzca las propiedades de las capas:

Número: 5

#	Módulo E (psi)	Poisson v(1)	Espesor h (in)	Descripción
1	450000.0	0.3	11.02	MAC
2	30000.0	0.35	13.78	BE
3	17000.0	0.4	11.811	SB
4	11500.0	0.3	11.811	PRESTAMO
5	4650.0	0.3		SR

Cargas sobre el pavimento

Introduzca las propiedades de las cargas circulares:

Número: 2

#	Carga P (lb)	Presión q (psi)	X (in)	Y (in)
1	4500.0	90.0	0.0	-8.0
2	4500.0	90.0	0.0	8.0

Puntos de medición en el pavimento

Introduzca las propiedades de los puntos:

Número: 29

#	X (in)	Y (in)	Z (in)	Capa #
1	0.0	-8.0	0.0	1
2	0.0	-8.0	0.004	1
3	0.0	-8.0	0.39	1
4	0.0	-8.0	0.79	1
5	0.0	-8.0	1.18	1
6	0.0	-8.0	1.57	1
7	0.0	-8.0	1.97	1
8	0.0	-8.0	2.36	1
9	0.0	-8.0	3.15	1
10	0.0	-8.0	3.54	1
11	0.0	-8.0	3.94	1
12	0.0	-8.0	4.33	1
13	0.0	-8.0	4.72	1
14	0.0	-8.0	5.12	1
15	0.0	-8.0	5.51	1
16	0.0	-8.0	5.91	1
17	0.0	-8.0	6.3	1
18	0.0	-8.0	6.69	1
19	0.0	-8.0	7.05	1
20	0.0	-8.0	7.08	1
21	0.0	-8.0	7.13	1
22	0.0	-8.0	7.87	1
23	0.0	-8.0	9.84	1
24	0.0	-8.0	11.02	1
25	0.0	-8.0	13.78	2
26	0.0	-8.0	15.75	2
27	0.0	-8.0	10.67	1
28	0.0	-8.0	17.71	2
29	0.0	-8.0	17.72	2

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Syz (psi)	Syz (psi)
1	1.0790e+02	9.9993e+01	8.9766e+01	-1.4523e-15	1.8236e-31	9.9274e-16
2	1.0777e+02	9.9883e+01	8.9766e+01	-1.4497e-15	2.8782e-19	1.5688e-03
3	9.3873e+01	8.6890e+01	9.0251e+01	-1.2717e-15	-6.3153e-17	-3.4379e-01
4	7.9695e+01	7.3557e+01	8.9441e+01	-1.1275e-15	-1.5552e-16	-8.4664e-01
5	6.7214e+01	6.1815e+01	8.7465e+01	-9.9167e-16	-2.3249e-16	-1.2656e+00
6	5.6113e+01	5.1426e+01	8.4915e+01	-8.6099e-16	-3.0103e-16	-1.6388e+00
7	4.6233e+01	4.2240e+01	8.1143e+01	-7.3356e-16	-3.6523e-16	-1.9882e+00
8	3.8011e+01	3.4652e+01	7.6673e+01	-6.1526e-16	-4.2255e-16	-2.3002e+00
9	2.4969e+01	2.2824e+01	6.5198e+01	-5.1989e-16	-5.2295e-16	-2.8468e+00
10	1.9918e+01	1.8325e+01	6.0790e+01	-2.9256e-16	-5.6456e-16	-3.0733e+00
11	1.5433e+01	1.4380e+01	5.5324e+01	-1.9342e-16	-6.0159e-16	-3.2749e+00
12	1.1580e+01	1.1031e+01	5.0189e+01	-1.0088e-16	-6.3201e-16	-3.4405e+00
13	8.1124e+00	8.0480e+00	4.5316e+01	-1.1827e-17	-6.5697e-16	-3.5747e+00
14	4.8496e+00	5.2662e+00	4.0629e+01	7.8537e-17	-6.7579e-16	-3.6788e+00
15	1.8710e+00	2.7445e+00	3.6375e+01	1.6047e-16	-6.8828e-16	-3.7468e+00
16	-1.0453e+00	2.8853e+01	3.2336e+01	2.4501e-16	-6.9406e-16	-3.7812e+00
17	-3.8074e+00	-2.0289e+00	2.8705e+01	3.2659e-16	-6.9432e-16	-3.7977e+00
18	-6.5338e+00	-4.3105e+00	2.5361e+01	4.0841e-16	-6.8754e-16	-3.7428e+00
19	-9.0516e+00	-8.4137e+00	2.2516e+01	4.8458e-16	-6.7545e-16	-3.6770e+00
20	-9.2623e+00	-6.5896e+00	2.2289e+01	4.9098e-16	-6.7419e-16	-3.6701e+00
21	-9.6141e+00	-8.8831e+00	2.1914e+01	5.0167e-16	-6.7200e-16	-3.6582e+00
22	-1.4833e+01	-1.1317e+01	1.6841e+01	6.9425e-16	-6.2671e-16	-3.4116e+00
23	-3.1458e+01	-2.5068e+01	7.4758e+00	1.1737e-15	-3.8908e-16	-2.1181e+00
24	-4.4627e+01	-3.6087e+01	5.1743e+00	1.5688e-15	-1.6930e-16	-9.2164e-01
25	-6.3254e+01	-2.0129e+01	3.9381e+00	7.9218e-17	-1.5245e-16	-8.2991e-01
26	-7.3989e+01	-3.7790e+01	3.3155e+00	6.6469e-17	-1.3875e-16	-7.5532e-01
27	-4.0344e+01	-3.2491e+01	5.5306e+00	1.4456e-15	-2.4010e-16	-1.3070e+00
28	-8.7473e+01	-5.6809e+01	2.8246e+00	5.6328e-17	-1.2444e-16	-6.7745e-01
29	-8.7549e+01	-5.6910e+01	2.8223e+00	5.6283e-17	-1.2437e-16	-6.7704e-01

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	1.6569e-04	1.2229e-04	2.4762e-05	-1.5944e-20	4.5911e-37	2.4933e-21
2	1.6539e-04	1.2207e-04	2.4989e-05	-1.5916e-20	-1.1970e-24	-6.5161e-09
3	1.3372e-04	9.8356e-05	5.0080e-05	-1.3725e-20	-6.2451e-22	-3.3997e-06
4	1.0333e-04	7.1376e-05	7.1636e-05	-1.1740e-20	-1.3821e-21	-7.5240e-06
5	7.7051e-05	5.0168e-05	8.7789e-05	-9.8766e-21	-2.0013e-21	-1.0895e-05
6	5.4064e-05	3.2078e-05	9.9319e-05	-8.0775e-21	-2.5264e-21	-1.3753e-05
7	3.3875e-05	1.6737e-05	1.0645e-04	-5.2963e-21	-2.9811e-21	-1.6228e-05
8	1.7174e-05	4.5158e-06	1.0940e-04	-4.6136e-21	-3.3455e-21	-1.8212e-05
9	-9.8277e-06	-1.3434e-05	1.0596e-04	-1.3250e-21	-3.8441e-21	-2.0926e-05
10	-2.0967e-05	-2.0254e-05	1.0346e-04	2.6185e-22	-3.9710e-21	-2.1617e-05
11	-3.1644e-05	-2.6527e-05	9.9411e-05	1.8802e-21	-4.0187e-21	-2.1877e-05
12	-4.1803e-05	-3.2384e-05	9.5679e-05	3.4606e-21	-3.9852e-21	-2.1694e-05
13	-5.2136e-05	-3.8377e-05	9.2708e-05	5.9552e-21	-3.8730e-21	-2.1063e-05
14	-6.3321e-05	-4.5039e-05	9.0959e-05	8.7172e-21	-3.6770e-21	-2.0017e-05
15	-7.5186e-05	-5.2390e-05	9.1000e-05	8.3752e-21	-3.4084e-21	-1.8554e-05
16	-8.8757e-05	-6.1195e-05	9.3359e-05	1.0126e-20	-3.0550e-21	-1.6631e-05
17	-1.0380e-04	-7.1427e-05	9.8496e-05	1.1893e-20	-2.6365e-21	-1.4353e-05
18	-1.2113e-04	-8.3760e-05	1.0712e-04	1.3730e-20	-2.1475e-21	-1.1691e-05
19	-1.3968e-04	-9.7499e-05	1.1891e-04	1.5497e-20	-1.6259e-21	-8.9056e-06
20	-1.4135e-04	-9.8763e-05	1.2009e-04	1.5647e-20	-1.5907e-21	-8.6596e-06
21	-1.4107e-04	-9.8406e-05	3.4356e-04	1.5655e-20	-2.4615e-20	-1.3400e-04
22	-1.3107e-04	-8.9759e-05	3.1230e-04	1.5177e-20	-2.4413e-20	-1.3290e-04
23	-1.1265e-04	-7.5447e-05	2.5205e-04	1.3957e-20	-2.3308e-20	-1.2688e-04
24	-1.0248e-04	-6.8370e-05	2.1350e-04	1.2166e-20	-2.1507e-20	-1.1708e-04
25	-9.8269e-05	-6.8305e-05	1.8851e-04	1.1008e-20	-1.9125e-20	-1.0411e-04
26	-9.9464e-05	-7.0971e-05	1.7399e-04	1.0468e-20	-1.6194e-20	-8.8157e-05
27	-1.0754e-04	-7.2127e-05	2.3377e-04	1.3012e-20	-2.2625e-20	-1.2317e-04
28	-1.0674e-04	-7.2856e-05	1.6917e-04	1.0821e-20	-1.2678e-20	-6.9018e-05
29	-1.0576e-04	-7.7304e-05	2.1527e-04	1.0821e-20	-2.3174e-20	-1.2616e-04

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	dx (in)	dy (in)	dz (in)
1	7.5200e-20	4.0981e-04	1.5252e-02
2	7.5220e-20	4.0948e-04	1.5252e-02
3	6.9467e-20	3.7816e-04	1.5225e-02
4	6.3632e-20	3.4639e-04	1.5189e-02
5	5.8090e-20	3.1623e-04	1.5149e-02
6	5.2684e-20	2.8680e-04	1.5105e-02
7	4.7299e-20	2.5732e-04	1.5057e-02
8	4.2105e-20	2.2921e-04	1.5010e-02
9	3.1954e-20	1.7395e-04	1.4915e-02
10	2.7075e-20	1.4739e-04	1.4872e-02
11	2.2148e-20	1.2057e-04	1.4829e-02
12	1.7409e-20	9.4768e-05	1.4790e-02
13	1.2722e-20	6.9254e-05	1.4754e-02
14	7.9580e-21	4.3321e-05	1.4719e-02
15	3.3440e-21	1.8204e-05	1.4688e-02
16	-1.3691e-21	-7.4529e-06	1.4658e-02
17	-5.9574e-21	-3.2431e-05	1.4630e-02
18	-1.0551e-20	-5.7437e-05	1.4605e-02
19	-1.4809e-20	-8.0011e-05	1.4583e-02
20	-1.5162e-20	-8.2537e-05	1.4581e-02
21	-1.5755e-20	-8.5765e-05	1.4578e-02
22	-2.4605e-20	-1.3394e-04	1.4535e-02
23	-4.9352e-20	-2.6866e-04	1.4431e-02
24	-6.5494e-20	-3.5653e-04	1.4362e-02
25	-6.5142e-20	-3.5402e-04	1.3925e-02
26	-6.5028e-20	-3.5400e-04	1.3665e-02
27	-6.0576e-20	-3.2976e-04	1.4384e-02
28	-6.5455e-20	-3.5632e-04	1.3436e-02
29	-6.5459e-20	-3.5634e-04	1.3435e-02

Anexo I. Salida regresión lineal múltiple iteración 1

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.97759986
Coefficiente de determinación R ²	0.95570148
R ² ajustado	0.53165173
Error típico	0.10972895
Observaciones	15

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	suma de cuadrados	F	valor crítico de F
Regresión	7	3.11714328	0.44530618	129.444703
Residuos	12	0.14448532	0.01204044	7.2382E-07
Total	19	3.2616286		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	superior 95.0%
Intercepción	-52.5825304	4.04105762	-13.0120714	1.9521E-08	-61.3872386	-43.7778222	-61.3872386	-43.7778222
Variable X 1	-10.7466661	1.11643199	-9.6258985	5.3985E-07	-13.1791573	-8.31416465	-13.1791573	-8.31416465
Variable X 2	0	0	65535	#¡NUM!	0	0	0	0
Variable X 3	0	0	65535	#¡NUM!	0	0	0	0
Variable X 4	0	0	65535	#¡NUM!	0	0	0	0
Variable X 5	15.8153171	1.18196578	13.3805203	#¡NUM!	13.2400349	18.3905993	13.2400349	18.3905993
Variable X 6	0	0	65535	#¡NUM!	0	0	0	0
Variable X 7	0	0	65535	#¡NUM!	0	0	0	0

Anexo J. Salida regresión lineal múltiple iteración 2

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.97759986
Coefficiente de determinación R ²	0.95570148
R ² ajustado	0.94831839
Error típico	0.10972895
Observaciones	15

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	2	3.11714328	1.55857164	129.444703	7.5568E-09
Residuos	12	0.14448532	0.01204044		
Total	14	3.2616286			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-52.5825304	4.04105762	-13.0120714	1.9521E-08	-61.3872386	-43.7778222	-61.3872386	-43.7778222
Variable X 1	-10.746661	1.11643199	-9.6258985	5.3985E-07	-13.1791573	-8.31416465	-13.1791573	-8.31416465
Variable X 2	15.8153171	1.18196578	13.3805203	1.4246E-08	13.2400349	18.3905993	13.2400349	18.3905993