

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**Evaluación de la resistencia a fatiga por reflejo de grietas en
sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos**

Proyecto de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Mauricio Picado Muñoz

Director del Trabajo de Graduación:

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

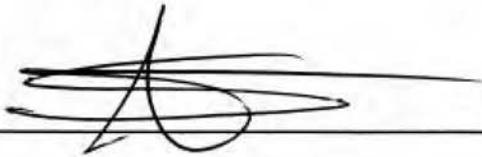
San José

Febrero, 2018

Tribunal de Graduación



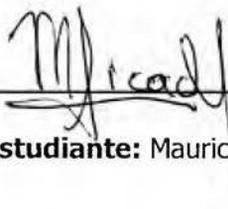
Director: Ing. Luis Guillermo Loría Salazar PhD.



Asesor: Ing. Sergio Guerrero Aguilera



Asesor: Ing. Mario Solano Rodríguez



Estudiante: Mauricio Picado Muñoz

Derechos de autor

Fecha: 2018, febrero, 19

El suscrito, **Mauricio Picado Muñoz**, cédula **1-1566-0631**, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B25124**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Evaluación de la resistencia a fatiga por reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos**, bajo la Dirección del **Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, 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 N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A mis padres, Greeven Picado Soto y Jeannette Muñoz Vivas, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

Agradecimientos

A mi comité asesor Ing. Luis Guillermo Loría, Ing. Mario Solano Rodríguez, Ing. Sergio Guerrero Aguilera e Ing. Paulina Leiva Padilla por la guía, apoyo y disposición que recibí de parte de ustedes en cada parte del proceso.

Al Ing. Carlos Andrés Borbón Vargas de Pavicen Ltda por su colaboración de brindar la mezcla asfáltica producida en planta utilizada en el proyecto.

A todo el personal profesional y técnico del LanammeUCR por su atenta ayuda durante la etapa experimental del proyecto, especialmente a José Sanabria por toda su ayuda en cada parte del proceso. Además, al Ing. Francisco Villalobos Ramírez por su ayuda durante la ejecución del ensayo a flexión.

A mis compañeros de la Unidad de Auditoria Técnica del LanammeUCR: Erick Acosta, Rose Cabalceta, Edgar Cubero, Víctor Cervantes, Francisco Fonseca, Sergio Guerrero, Diego Herra, Ana Hidalgo, José Rodríguez, Mauricio Salas y Wendy Sequeira, por todas sus enseñanzas que me han permitido crecer personal y profesionalmente durante estos años. En especial, quisiera agradecer a doña Wendy, por darme la confianza de ser parte de esta unidad durante los últimos años.

A mis compañero y amigos de toda la vida: Andy, Beto, Choco, Felipe, Félix, Frogger, Johnny, Jose D, Juan, Kevin, Naty, Pablo, Richard y Rudy, por todas las experiencias que hemos compartido y por brindarme siempre su apoyo.

Índice general

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Justificación.....	1
1.1.1. El problema específico	1
1.1.2. Importancia	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Antecedentes históricos y prácticos	4
1.4. Metodología.....	6
1.4.1. Fase de investigación.....	7
1.4.2. Fase de confección de especímenes.....	7
1.4.3. Fase de desarrollo del ensayo de laboratorio	10
1.4.4. Fase de análisis, conclusiones y recomendaciones	11
Capítulo 2. Marco teórico	12
2.1. Agrietamiento por fatiga.....	15
2.1.1. Agrietamiento por fatiga en pavimentos flexibles.....	19
2.1.2. Agrietamiento por fatiga producto del reflejo de grietas.....	22
2.2. Materiales geosintéticos para controlar el agrietamiento reflectivo	24
2.2.1. Geotextiles.....	25
2.2.2. Geomallas	26
2.2.3. Geocompuestos.....	27
2.3. Emulsiones asfálticas	28
2.4. Metodología constructiva para la rehabilitación con sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos como sistema intercapa.....	29
2.4.1. Trabajos preliminares a la colocación de la sobrecapa asfáltica	29

2.4.2. Preparación de la superficie	30
2.4.3. Aplicación de la emulsión asfáltica	30
2.4.4. Colocación del material geosintético	32
2.4.5. Colocación de la sobrecapa asfáltica	34
2.4.6. Compactación	35
2.5. Metodología de diseño de sobrecapas asfálticas con materiales geosintéticos como sistema intercapa	35
2.6. Ensayos para la evaluación del reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas.....	38
Capítulo 3. Etapa experimental y resultados.....	41
3.1. Materiales utilizados en el trabajo final de graduación	41
3.1.1. Mezcla asfáltica	41
3.1.2. Emulsión asfáltica.....	45
3.1.3. Geotextiles.....	46
3.1.4. Geomallas.....	47
3.2. Metodología de aplicación del riego de liga asfáltico	48
3.2.1. Ejemplo del cálculo de la dosificación necesaria para el primer riego de liga en la interfaz capa asfáltica – geotextil utilizada en esta investigación	49
3.3. Dosificación de ligante asfáltico residual	50
3.4. Diseño de la compactación de mezcla asfáltica utilizando el rodillo vibratorio manual y el molde a escala real elaborado en el LanammeUCR.....	50
3.5. Ensayo a flexión	52
3.5.1. Nomenclatura de las vigas ensayadas	55
3.5.2. Especímenes ensayados.....	55
3.5.3. Análisis del aporte a la resistencia a fatiga del material geosintético según el enfoque de la energía disipada	62
Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones	85
4.1. Conclusiones	85

4.2. Recomendaciones	87
Referencias Bibliográficas	89
Anexos	94

Índice de Figuras

Figura 1.1. Diagrama metodológico del proyecto de graduación	6
Figura 1.2. Equipo utilizado para la confección de los especímenes	8
Figura 1.3. Metodología para la confección de los especímenes	9
Figura 1.4. Esquema del montaje utilizado para realizar el ensayo a flexión en vigas de concreto asfáltico	10
Figura 2.1. Curvas del deterioro del pavimento según la estrategia de intervención	14
Figura 2.2. Curva de la Ley de Paris	16
Figura 2.3. Relación entre la razón de cambio de la energía disipada y el número de ciclos de carga.....	18
Figura 2.4. Agrietamiento longitudinal presente en la Avenida 7, Montes de Oca	20
Figura 2.5. Modos de rotura en un pavimento flexible.....	21
Figura 2.6. Geotextiles no tejidos	26
Figura 2.7. Geomallas biorientadas.....	26
Figura 2.8. Geocompuesto	27
Figura 2.9. Riego de liga uniforme sobre la superficie	31
Figura 2.10. Rompimiento de la emulsión asfáltica	32
Figura 3.1. Dimensiones del rodillo compactador y del molde a escala elaborado en el LanammeUCR	51
Figura 3.2. Porcentaje de vacíos contra cantidad de mezcla asfáltica colocada	52
Figura 3.3. Montaje del ensayo a flexión: Cara frontal de la viga a ensayar	53
Figura 3.4. Montaje del ensayo a flexión: Cara posterior de la viga a ensayar	54
Figura 3.5. Ciclos de carga y descarga para una de las vigas ensayadas	54
Figura 3.6. Viga C1 luego de ser ensayada.....	56
Figura 3.7. Viga C2 luego de ser ensayada.....	56
Figura 3.8. Viga C3 luego de ser ensayada.....	57
Figura 3.9. Viga GxI-1 luego de ser ensayada	57
Figura 3.10. Viga GxI-2 luego de ser ensayada	58
Figura 3.11. Viga GxI-3 luego de ser ensayada	58
Figura 3.12. Viga G1 luego de ser ensayada.....	59
Figura 3.13. Viga G2 luego de ser ensayada.....	59
Figura 3.14. Viga G3 luego de ser ensayada.....	60

Figura 3.15. Viga GxII-1 luego de ser ensayada	60
Figura 3.16. Viga GxII-2 luego de ser ensayada	61
Figura 3.17. Ciclos de carga y descarga, (a) al inicio del ensayo, (b) luego de 100s de ejecución del ensayo	63
Figura 3.18. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 10 ciclos de carga	67
Figura 3.19. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 100 ciclos de carga	67
Figura 3.20. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 500 ciclos de carga	68
Figura 3.21. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 800 ciclos de carga	68
Figura 3.22. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 1000 ciclos de carga	69
Figura 3.23. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 1200 ciclos de carga	69
Figura 3.24. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga C1	79
Figura 3.25. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga C2	79
Figura 3.26. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga C3	80
Figura 3.27. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga G1	80
Figura 3.28. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga G2	81
Figura 3.29. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga G3	81
Figura 3.30. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga GxI-1	82
Figura 3.31. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga GxI-2	82

Figura 3.32. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga GxI-3.....	83
Figura 3.33. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga GxII-1	83
Figura 3.34. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga GxII-2	84

Índice de Cuadros

Cuadro 2.1. Clasificación de la condición de la carretera según su PSI	14
Cuadro 2.2. Alternativas materiales geosintéticos a ser utilizados como sistema intercapa para retardar el reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas	23
Cuadro 2.3. Efectividad del sistema intercapa según el tipo de agrietamiento presente.....	24
Cuadro 2.4. Símbolos en la nomenclatura de emulsiones asfálticas.....	29
Cuadro 2.5. Soluciones a problemas durante la instalación de materiales geosintéticos.....	33
Cuadro 2.6. Factor de eficiencia para distintos tipos de geotextiles.....	37
Cuadro 2.7. Ensayos para la evaluación del reflejo de grietas en sobrecapas asfáltica	38
Cuadro 3.1. Resultados del ensayo de contenido de asfalto mediante ignición.....	42
Cuadro 3.2. Resultados del ensayo de granulometría.....	42
Cuadro 3.3. Comparación de los resultados obtenidos sobre la granulometría de la mezcla asfáltica	43
Cuadro 3.4. Resultados del ensayo determinación de la gravedad específica máxima teórica	44
Cuadro 3.5. Parámetros Marshall para el porcentaje óptimo de asfalto	45
Cuadro 3.6. Resultados de la caracterización de la emulsión asfáltica	46
Cuadro 3.7. Propiedades de los geotextiles MacTex N 27.1	47
Cuadro 3.8. Propiedades de la geomalla MacGrid AR 5.7	47
Cuadro 3.9. Cantidad de agua expulsada por la pistola de pintura a 22psi en 10s.....	49
Cuadro 3.10. Dosificación de ligante asfáltico residual	50
Cuadro 3.11. Nomenclatura de las vigas ensayadas.....	55
Cuadro 3.12. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen de control en los distintos escenarios de carga	64
Cuadro 3.13. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geomalla a un tercio de su altura en los distintos escenarios de carga	64
Cuadro 3.14. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geotextil a un tercio de su altura en los distintos escenarios de carga	64
Cuadro 3.15. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geotextil a dos tercios de su altura en los distintos escenarios de carga	65

Cuadro 3.16. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geomalla a un tercio de su altura en los distintos escenarios de carga, luego de excluir la viga G3.....	65
Cuadro 3.17. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geotextil a un tercio de su altura en los distintos escenarios de carga, luego de excluir la viga Gx1-1	66
Cuadro 3.18. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 10 ciclos de carga	70
Cuadro 3.19. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 100 ciclos de carga.....	71
Cuadro 3.20. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 500 ciclos de carga.....	71
Cuadro 3.21. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 800 ciclos de carga.....	71
Cuadro 3.22. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 1000 ciclos de carga.....	72
Cuadro 3.23. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 1200 ciclos de carga.....	72
Cuadro 3.24. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 10 ciclos de carga	73
Cuadro 3.25. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 100 ciclos de carga	73
Cuadro 3.26. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 500 ciclos de carga	74

Cuadro 3.27. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 800 ciclos de carga	74
Cuadro 3.28. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 1000 ciclos de carga	74
Cuadro 3.29. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 1200 ciclos de carga	75
Cuadro 3.30. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura. Escenario: 10 ciclos de carga	75
Cuadro 3.31. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura. Escenario: 100 ciclos de carga	76
Cuadro 3.32. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura. Escenario: 500 ciclos de carga	76
Cuadro 3.33. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil dos tercios de su altura. Escenario: 800 ciclos de carga	76
Cuadro 3.34. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil dos tercios de su altura. Escenario: 1000 ciclos de carga	77
Cuadro 3.35. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura. Escenario: 1200 ciclos de carga	77
Cuadro 3.36. Resumen de los análisis de varianza de un factor realizados	78

Picado Muñoz, Mauricio

Evaluación de la resistencia a fatiga por reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos.

Proyecto de graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

M. Picado M., 2018

92h.:il.- 48 refs.

Resumen

En esta investigación se busca analizar la resistencia a fatiga por reflexión de grietas en sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos, mediante el ensayo a flexión de vigas de concreto asfáltico.

Para realizar este análisis se confeccionaron tres vigas de concreto asfáltico reforzado con geomalla a un tercio de su altura, tres vigas de concreto asfáltico reforzado con geotextil a un tercio de su altura, dos vigas de concreto asfáltico reforzado con geotextil a dos tercios de su altura y tres vigas de concreto asfáltico de control (sin materiales geosintéticos de refuerzo), que fueron ensayadas según el esquema de montaje de la norma ASTM C78, pero bajo una configuración de frecuencia haversiana de 10Hz y esfuerzo controlado, con una carga que oscila entre 0,45kN y 9,0kN.

Posteriormente, se determinó la energía disipada por ciclo y se realizó un análisis de varianza de energía acumulada en cada uno de los siguientes escenarios: 10, 100, 500, 800, 1000 y 1200 ciclos de carga.

Se determinó que las vigas de los especímenes reforzados con geomalla y geotextil a un tercio de su altura brindan un aporte estadísticamente significativo a la resistencia a fatiga por reflejo de grietas. En contraparte, las vigas de los especímenes reforzados con geotextil a dos tercios de su altura no brindan un aporte estadísticamente significativo a la resistencia a fatiga por reflejo de grietas.

PALABRAS CLAVE: RESISTENCIA A FATIGA, MATERIALES GEOSINTÉTICOS, ENSAYO A FLEXIÓN, REFLEJO DE GRIETAS, ENERGÍA DISIPADA

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.

Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo 1. Introducción

1.1. Justificación

Históricamente, las carreteras de Costa Rica no han sido sometidas a un proceso correcto de mantenimiento preventivo y rutinario necesario para evitar su deterioro. Por ello, algunas de las vías costarricenses se han deteriorado en gran medida y ha sido necesario someterlas a trabajos de rehabilitación, y en algunos casos de reconstrucción, para recuperar la condición del pavimento previa al deterioro.

La colocación de sobrecapas asfálticas en pavimentos deteriorados es una actividad típica de los trabajos de rehabilitación antes mencionados. Sin embargo, en Costa Rica estas intervenciones no se han realizado de la mejor manera, pues no se toman las precauciones necesarias para retardar la propagación de las grietas presentes en el pavimento deteriorado para poner la nueva sobrecapa. Esto, adicionado a que la aplicación de riegos de liga ha sido ejecutada de la forma inadecuada, puede provocar que el deterioro se propague a la sobrecapa asfáltica recién colocada. Actualmente, como alternativa para solucionar este problema, se han utilizado materiales geosintéticos como estrategia para retardar el reflejo de las grietas de la carpeta existente a la nueva sobrecapa.

En vista del reciente uso que se le ha dado a los materiales geosintéticos en los trabajos de rehabilitación, es importante determinar el aporte que estos materiales pueden generar en la resistencia a fatiga por reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas, para la predicción de su deterioro y posible desempeño a largo plazo en su diseño.

El presente documento pretende analizar el aporte a la resistencia a fatiga por reflexión de grietas que brinda el uso de materiales geosintéticos en sobrecapas asfálticas para comprender el funcionamiento mecánico de la estructura de pavimento resultante.

1.1.1. El problema específico

Cuando se coloca una sobrecapa asfáltica para rehabilitar un pavimento agrietado y no se toman las precauciones necesarias, en la sobrecapa ocurre un fenómeno conocido como agrietamiento reflexivo. En este fenómeno, las grietas existentes en el pavimento a restaurar se propagan a través de la sobrecapa asfáltica hasta aparecer en la superficie del pavimento (Delbono, 2016).

Uno de los mayores problemas que se pueden presentar en una sobrecapa asfáltica es el agrietamiento por fatiga. La presencia de grietas en la sobrecapa asfáltica facilita la entrada de agua al pavimento, acelera su proceso de deterioro y provoca una pérdida innecesaria de los recursos y materiales invertidos. De igual manera, esto puede ocasionar daños en las capas de base y subrasante, disminuyendo considerablemente la vida útil del pavimento.

Si bien es cierto que la propagación de grietas es un problema que no se puede prevenir por completo, existen métodos que permiten retardar este fenómeno y ampliar la vida de servicio de la carpeta asfáltica, tal es el caso del uso de materiales geosintéticos.

En Costa Rica, el empleo de materiales geosintéticos en los trabajos de rehabilitación ha aumentado en los años recientes. Sin embargo, el conocimiento de la mecánica desarrollada por estos materiales y la interacción de éstos con las carpetas asfálticas es muy limitado y no se ha estudiado a profundidad. Además, en nuestro país no se han desarrollado especificaciones técnicas sobre el uso de materiales geosintéticos como refuerzo de pavimentos deteriorados, ni existe una normativa que reglamente su uso y proceso constructivo.

Todos estos problemas generan la necesidad de estudiar más a fondo las características mecánicas de los materiales geosintéticos, con el fin de definir metodologías para el diseño y construcción de este tipo de sistemas.

1.1.2. Importancia

Según los resultados del Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica Años 2014-2015 (2015), un total de 210,36 km de la Red Vial Nacional de Costa Rica necesitan una rehabilitación menor para recuperar su capacidad estructural. Por este motivo, es importante realizar estudios que caractericen los materiales utilizados en este tipo de trabajos, así como desarrollar ensayos de laboratorio que permitan evaluar la resistencia de los materiales y de las estructuras de pavimento resultantes. Esto permite mejorar la comprensión de los mecanismos que gobiernan el empleo de la técnica y prolongar la vida útil de la carretera rehabilitada.

Por lo tanto, este trabajo de graduación es un aporte importante en la caracterización mecánica de los materiales utilizados en la rehabilitación de pavimentos y de las estructuras de pavimento resultantes.

En específico, es importante determinar la resistencia a fatiga por reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas, para comprender el funcionamiento mecánico de la estructura de pavimento resultante y obtener la información necesaria para la implementación de nuevas y mejores metodologías de diseño de los pavimentos flexibles en Costa Rica, así como mejorar los procesos constructivos de estos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar experimentalmente la resistencia a fatiga por reflexión de grietas en sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos, mediante el ensayo a flexión de vigas de concreto asfáltico.

1.2.2. Objetivos específicos

- Verificar el diseño de la compactación de mezcla asfáltica utilizando un rodillo vibratorio manual y el molde a escala real elaborado en el LanammeUCR, para la confección de especímenes de mezcla asfáltica reforzados con materiales geosintéticos.
- Establecer los lineamientos básicos para la selección del material geosintético adecuado en la rehabilitación de pavimentos con sobrecapas asfálticas, dependiendo de la realidad del proyecto
- Determinar el aporte estructural de los geotextiles y geomallas, comercializados en Costa Rica, a la resistencia a fatiga por reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas.
- Verificar la repetitividad y reproducibilidad del ensayo a fatiga para mezcla asfáltica reforzada con geosintético, para complementar la implementación del ensayo a flexión en pavimentos flexibles, como metodología para determinar experimentalmente la resistencia a fatiga por reflexión de grietas en mezclas asfálticas.

1.3. Antecedentes históricos y prácticos

Como antecedentes teóricos y prácticos, se ha encontrado varias investigaciones nacionales que guardan relación con el proyecto desarrollado:

- "Cuantificación del efecto de confinamiento de un geosintético en estructuras de pavimento": Es un proyecto de graduación elaborado por la Ing. Paulina Leiva Padilla (2011), donde se evalúa la influencia del efecto de confinamiento en las estructuras de pavimento reforzadas a nivel de la subrasante con geosintéticos.
- "Desarrollo de modelos de agrietamiento por fatiga para el concreto asfáltico en Costa Rica": Es un proyecto de graduación elaborado por el Ing. Pablo Chavarría Salas (2005), donde se determinó la capacidad de las mezclas asfálticas nacionales para resistir fatiga.
- "Diseño de sobrecapas asfálticas anti-reflejo de grietas calibradas para Costa Rica": Es un artículo desarrollado por el Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD. y el Ing. Fabián Elizondo Arrieta (2010), donde se determinó el modelo óptimo analítico para predecir la resistencia de sobrecapas de mezcla asfálticas anti-reflejo de grietas.
- "Estimación de la dosificación apropiada de ligante asfáltico en la rehabilitación de pavimentos flexibles con el uso de geosintéticos": Es un proyecto de graduación elaborado por el Ing. Mario Solano Rodríguez (2016), donde se estimó experimentalmente la dosificación apropiada de ligante asfáltico a utilizar en la rehabilitación de pavimentos flexibles con sobrecapa asfáltica y materiales geosintéticos.
- "Revisión de las consideraciones básicas del diseño actual de pavimentos flexibles con refuerzo geosintético": Es un proyecto de graduación elaborado por el Ing. Ronald Naranjo Ureña (2003), donde se estudia la función de membrana del geosintético en el refuerzo de pavimentos a nivel de la subrasante.

Además, se encontraron algunas normas y artículos internacionales relacionados con el empleo de materiales geosintéticos para evitar la reflexión de grietas en sobrecapas asfálticas:

- AASHTO M288-06. (2006). Especificación para geotextiles de uso en carreteras. Designación AASHTO.

- AASHTO T 321 IT-ED-06. (2006). Método de ensayo para la determinación de la vida de fatiga de mezclas asfálticas en caliente compactadas (MAC) sujetas a carga dinámica a flexo-compresión. Designación AASHTO.
- *American Society for testing and Materials (ASTM)*. (2011). Normas referentes a geosintéticos.
- ASTM C78/C78M. (2013). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a flexión del concreto (utilizando una viga simple con carga en los tercios del claro). Se definen los pasos para el desarrollo de la prueba a flexión de vigas de concreto.
- **“Efectos del refuerzo geosintético en la propagación del agrietamiento por reflexión en sobrecapas asfálticas”**: Es un artículo desarrollado por Khodaii & Fallah (2009), donde se determinó el aporte del refuerzo mediante materiales geosintéticos para mitigar la reflexión de grietas en sobrecapas asfálticas.
- **“Propagación de grietas por fatiga en pavimentos bituminosos reforzados con materiales geosintéticos”**: Es un artículo desarrollado por Lugmayr, Jamek & Tschegg (2012), donde se ensayaron tres sistemas de geotextiles intercapa mediante el método de apertura de Tschegg para determinar la resistencia a fatiga

1.4. Metodología

Para la elaboración de este proyecto de graduación se desarrollaron cuatro fases principales: fase de investigación, fase de confección de especímenes, fase de desarrollo del ensayo de laboratorio y finalmente fase de análisis, conclusiones y recomendaciones (ver Figura 1.1).

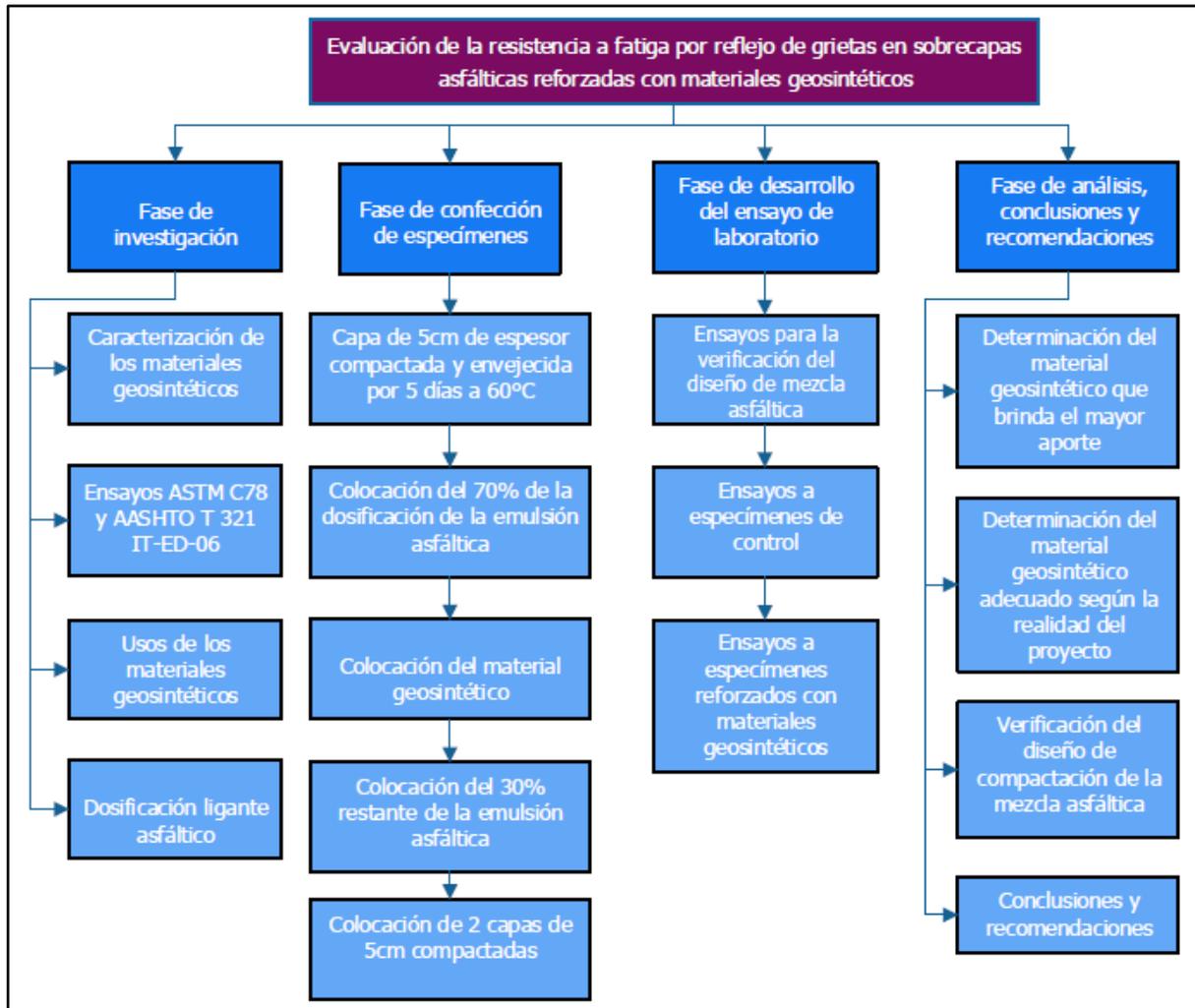


Figura 1.1. Diagrama metodológico del proyecto de graduación

1.4.1. Fase de investigación

En esta primera etapa del proyecto, se realizó una revisión bibliográfica sobre los materiales geosintéticos. En ella se encontraron las características generales, usos, propiedades mecánicas, componentes químicos y resistencia de cada material geosintético utilizado.

Además, se indagó sobre el método de ensayo ASTM C78 - Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a flexión del concreto (utilizando una viga simple con carga en los tercios del claro), para conocer los lineamientos, limitaciones y procedimiento del ensayo realizado. De igual manera, se revisó la norma AASHTO T 321 - Método de ensayo para la determinación de la vida de fatiga de mezclas asfálticas en caliente compactadas (MAC) sujetas a carga dinámica a flexo-compresión.

También se investigó sobre los distintos usos que se le han dado a los geosintéticos en Costa Rica y se recolectaron las características de los proyectos donde fueron utilizados.

Para finalizar esta etapa, se determinó la dosificación de ligante asfáltico necesaria para la fabricación de los especímenes con materiales geosintéticos superpuestos, con base en las especificaciones establecidas por el fabricante y el estudio realizado por el Ing. Mario Solano Rodríguez (2016).

1.4.2. Fase de confección de especímenes

En esta etapa, se confeccionaron cuatro especímenes de concreto asfáltico, con la intención de determinar la configuración (tipo y posición del geosintético) que brinda el mayor aporte a la resistencia a fatiga por reflejo de grietas. Los especímenes confeccionados fueron:

- Un espécimen de concreto asfáltico reforzado con geomalla a un tercio de su altura.
- Un espécimen de concreto asfáltico reforzado con geotextil a un tercio de su altura.
- Un espécimen de concreto asfáltico reforzado con geotextil a dos tercios de su altura.
- Un espécimen de concreto asfáltico de control (sin materiales geosintéticos de refuerzo).

De cada uno de los especímenes obtenidos se extrajeron tres vigas de 150mm x 120mm x 530mm que fueron ensayadas.

La geomalla utilizada es la gama MacGRid AR 5.7 de Maccaferri y el geotextil utilizado es MacTex N 27.1, también de Maccaferri. Estos materiales se seleccionaron pues, como se

observa en el Anexo A, son los de uso más frecuente en las intervenciones realizadas en Costa Rica.

Para elaborar estas vigas se emplearon la rampa, el molde y el rodillo compactador que se muestran en Figura 1.2, disponibles en el LanammeUCR.

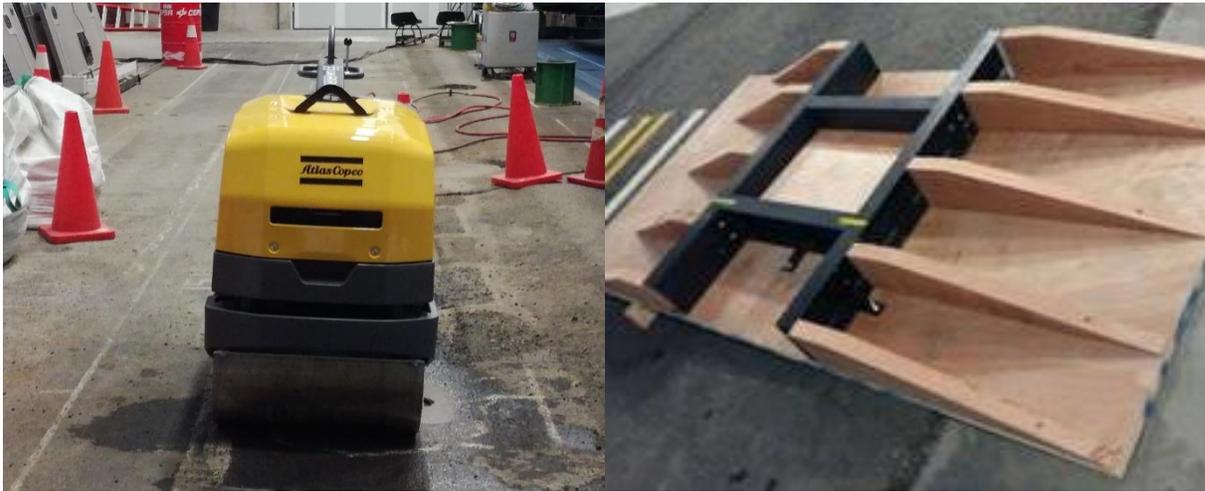


Figura 1.2. Equipo utilizado para la confección de los especímenes

Para la confección de los especímenes, se siguió el procedimiento recomendado por Leiva (2011)¹:

- Colocación de una capa asfáltica compactada de cinco centímetros de espesor que ha sido envejecida por cinco días a 60°C. Esta capa debe tener un porcentaje de vacíos del 4% (ver Figura 1.3.a).
- Colocación del 70% de la dosificación de emulsión asfáltica para la adherencia entre la capa asfáltica y el material geosintético² (ver Figura 1.3.b).
- Colocación del material geosintético (ver Figura 1.3.c).
- Colocación del 30% restante de la emulsión asfáltica (ver Figura 1.3.d).
- Colocación de dos capas asfálticas compactadas de cinco centímetros como sobrecapas asfálticas. Estas capas deben tener un porcentaje de vacíos del 7% (ver Figura 1.3.e).

¹ En el caso del espécimen reforzado con geotextil a dos tercios de su altura, el geotextil se coloca entre la primera y segunda sobrecapa.

² En el caso del espécimen reforzado con geomalla, el 100% de la dosificación de la emulsión asfáltica se aplica antes de colocar la geomalla.

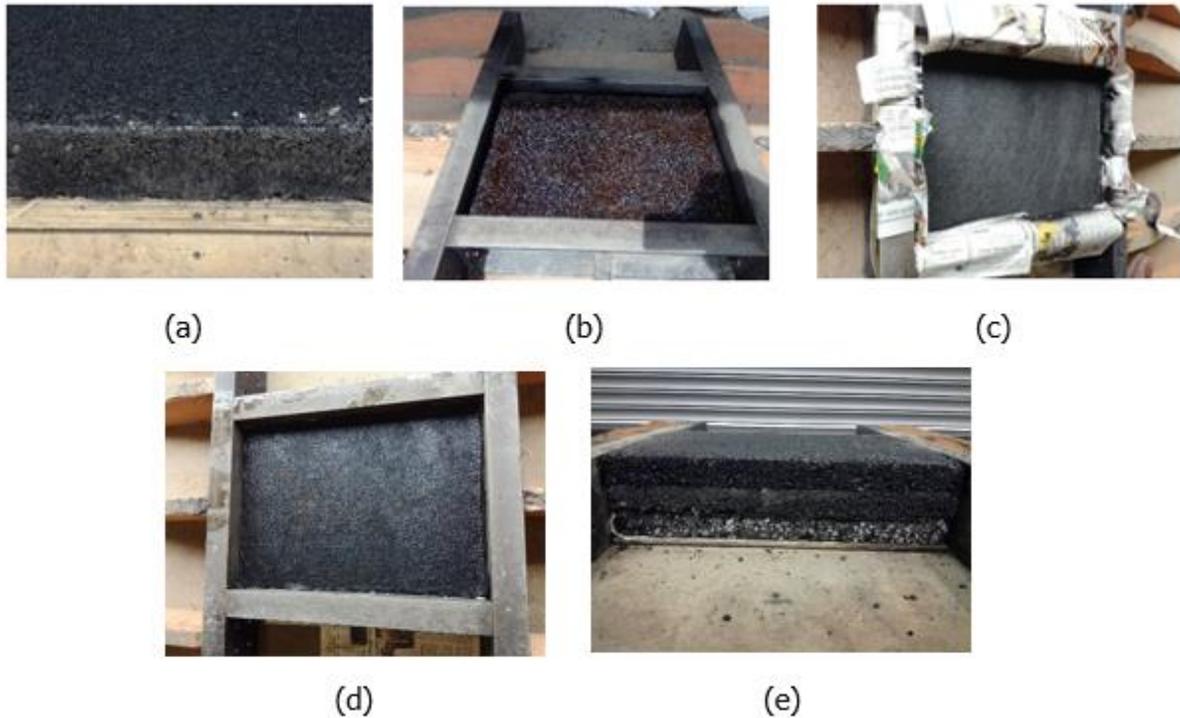


Figura 1.3. Metodología para la confección de los especímenes

La primera capa fue envejecida para representar la oxidación que presenta un pavimento viejo antes de colocar una sobrecapa asfáltica. Además, esta capa posee un menor porcentaje de vacíos respecto a la sobrecapa asfáltica para representar la post-compactación que sufre la carpeta asfáltica en campo producto de las cargas de tránsito.

Cada capa asfáltica debe cumplir con las especificaciones de diseño y compactación establecidas. La compactación se verificó mediante el porcentaje de vacíos en cada capa asfáltica. Para ello, se elaboraron paños de prueba de 5cm de altura para determinar la cantidad de mezcla asfáltica necesaria para lograr el porcentaje de vacíos establecido. A estos paños de prueba se les realizó el ensayo AASHTO T166 - Procedimiento para determinar la gravedad específica bruta para especímenes compactados de mezcla asfáltica, para verificar el porcentaje de vacíos en cada paño de prueba.

1.4.3. Fase de desarrollo del ensayo de laboratorio

Para iniciar esta etapa del proyecto fue necesario capacitarse en el uso de los equipos de laboratorio y en los ensayos necesarios para la ejecución del proyecto.

Debido a que no existe un ensayo normado para el ensayo de vigas de concreto asfáltico, se realizó una adaptación de la norma ASTM C78 - Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a flexión del concreto (utilizando una viga simple con carga en los tercios del claro). En la Figura 1.4, se muestra un esquema del montaje utilizado para realizar el ensayo a flexión.

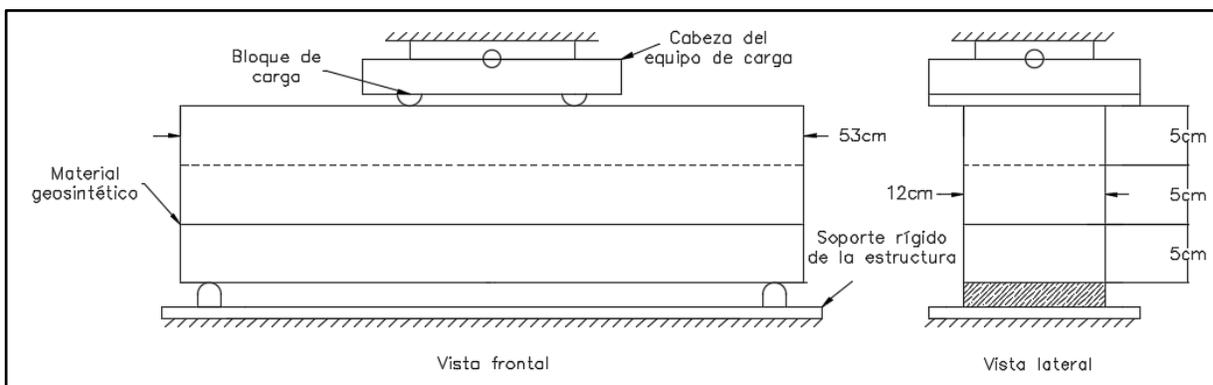


Figura 1.4. Esquema del montaje utilizado para realizar el ensayo a flexión en vigas de concreto asfáltico

Una de las adaptaciones realizadas a la norma ASTM C78 es que se ensayaron las vigas confeccionadas en el laboratorio bajo una configuración de frecuencia haversiana de 10Hz y esfuerzo controlado, con una carga que oscila entre 0,45kN y 9,0kN y no con una carga a tasa constante como lo establece la norma ASTM C78. Además, se modificó la sección transversal de las vigas a 150mm x 120mm, esto por las dimensiones del molde a escala disponible en el LanammeUCR.

Posteriormente, se determinó la energía disipada por ciclo, que se define como el área bajo la curva de los círculos histeréticos.

En esta fase también se realizaron los ensayos a la mezcla asfáltica obtenida de la planta de la Constructora Pavicen LTDA: ASTM D 95/D 6307 - Ensayo de contenido de asfalto mediante ignición, ASTM D 5444 - Ensayo de granulometría y ASTM D 2041 - Determinación de la gravedad específica máxima teórica, esto con el fin de verificar algunos parámetros que se encuentran en el informe del diseño de mezcla.

1.4.4. Fase de análisis, conclusiones y recomendaciones

En esta etapa, se analizaron los resultados obtenidos en la fase previa para determinar el aporte que brindan los materiales geosintéticos empleados a la resistencia a fatiga por reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas. Esto se realizó mediante un análisis de varianza de energía acumulada en cada uno de los siguientes escenarios: 10, 100, 500, 800, 1000 y 1200 ciclos de carga.

Mediante investigación bibliográfica, se determinó el material geosintético adecuado en la rehabilitación de pavimentos con sobrecapas asfálticas, dependiendo de la realidad del proyecto.

Además, se verificó el diseño de la compactación de mezcla asfáltica utilizando un rodillo vibratorio manual y un molde a escala real elaborado en el LanammeUCR, para la confección de especímenes de mezcla asfáltica reforzados con materiales geosintéticos.

Finalmente, se establecieron las conclusiones del estudio y las recomendaciones pertinentes que resultaron de este.

Capítulo 2. Marco teórico

Hoy en día, las carreteras constituyen el medio más importante para la movilidad de personas, bienes y servicios en el país. Además, impulsan el desarrollo de las comunidades a su alrededor y facilitan la comunicación entre ciudades, por lo que juegan un papel importante en el progreso del país y su crecimiento económico. Es por esto que todo país debe impulsar la construcción de nuevas y mejores carreteras, así como velar por el mantenimiento y la preservación de las carreteras existentes en el mejor estado y por el mayor tiempo posible.

En Costa Rica, la entidad encargada de ejecutar y controlar la conservación y construcción de la Red Vial Nacional es el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI). El CONAVI realiza seis tipos de trabajos: mantenimiento rutinario, mantenimiento preventivo, reconstrucción, mejoramiento, rehabilitación y obras nuevas. Según la Ley 7798 Ley de Creación del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) (1998), estos trabajos se definen como:

➤ Mantenimiento periódico: **"Conjunto de actividades programables cada cierto período, tendientes a renovar la condición original de los pavimentos mediante la aplicación de capas adicionales de lastre, grava, tratamientos superficiales o recarpeteos asfálticos o de secciones de concreto, según el caso, sin alterar la estructura de las capas del pavimento subyacente. El mantenimiento periódico de los puentes incluye la limpieza, pintura y reparación o cambio de elementos estructurales dañados o de protección"**.

➤ Mantenimiento rutinario: **"Conjunto de labores de limpieza de drenajes, control de vegetación, reparaciones menores y localizadas del pavimento y la restitución de la demarcación, que deben efectuarse de manera continua y sostenida a través del tiempo, para preservar la condición operativa, el nivel de servicio y seguridad de las vías. Incluye también la limpieza y las reparaciones menores y localizadas de las estructuras de puentes"**.

➤ Mejoramiento: **"Mejoras o modificaciones de estándar horizontal o vertical de los caminos, relacionadas con el ancho, el alineamiento, la curvatura o la pendiente longitudinal, a fin de incrementar la capacidad de la vía, la velocidad de circulación y aumentar la seguridad de los vehículos. También se incluyen dentro de esta categoría, la ampliación de la calzada, la elevación del estándar del tipo de superficie ("upgrade") de tierra a lastre o de lastre a asfalto, entre otros, y la construcción de estructuras tales como alcantarillas grandes, puentes o intersecciones"**.

➤ Obras nuevas: "**Construcción** de todas las obras viales que se incorporen a la red nacional existente".

➤ Reconstrucción: "**Renovación** completa de la estructura del camino, con previa demolición parcial o total de la estructura del pavimento o las estructuras de puente".

➤ Rehabilitación: "**Reparación** selectiva y refuerzo del pavimento o la calzada, previa demolición parcial de la estructura existente, con el objeto de restablecer la solidez estructural y la calidad de rueda originales. Además, por una sola vez en cada caso, podrá incluir la construcción o reconstrucción del sistema de drenaje que no implique construir puentes o alcantarillas mayores. Antes de cualquier actividad de rehabilitación en la superficie de rueda, deberá verificarse que el sistema de drenaje funcione bien. La rehabilitación de puentes se refiere a reparaciones mayores, tales como el cambio de elementos o componentes estructurales principales o el cambio de la losa del **piso**".

Para lograr que la Red Vial Nacional se encuentre en las mejores condiciones posibles, los trabajos realizados por el CONAVI deben seguir los principios de eficiencia y eficacia de la inversión, es por ello que se debe seguir el siguiente orden de prioridades en cuanto a los trabajos a realizar:

1. Conservación
2. Mantenimiento rutinario
3. Mantenimiento periódico
4. Mejoramiento
5. Rehabilitación
6. Construcción de obras viales nuevas

Para determinar cuál es el tipo de intervención a realizar, se debe evaluar la condición del pavimento y según su estado, se establece la inversión que genere los mejores resultados a nivel de red. Para evaluar la condición del pavimento existen diversos métodos, uno de ellos es el índice de serviciabilidad o PSI (por sus siglas en inglés). El índice de serviciabilidad es un indicador de la capacidad de la carretera de servir al tipo de tránsito para el cual fue diseñado y proveer, al usuario, un manejo seguro y confortable (Rodríguez, 2012). En el Cuadro 2.1, se muestra clasificación del estado de la carretera según su PSI.

Cuadro 2.1. Clasificación de la condición de la carretera según su PSI

Índice de serviciabilidad	Clasificación
0-1	Muy malo
1-2	Malo
2-3	Regular
3-4	Bueno
4-5	Muy bueno

Fuente: AASHTO, 1993

A diferencia de la mayoría de estructuras civiles que fallan inmediatamente o duran por muchos años, los pavimentos se deterioran gradualmente durante su periodo de diseño hasta llegar a la falla. Es por ello, que el índice de serviciabilidad va decayendo con el paso de los años. En la Figura 2.1, se observa como baja el índice de serviciabilidad según la estrategia de intervención. La Curva 1 está caracterizada por una mala inversión en la construcción de la carretera, lo que conlleva un deterioro prematuro de esta. La Curva 2 está regida por una mala inversión en mantenimiento de la carretera, lo que conlleva a un deterioro acelerado al final de la vida útil de la carretera. Por su parte, la Curva 3 muestra una estrategia de inversión que consiste en dar un buen mantenimiento a la carretera para alargar su vida útil y reducir los costos de las intervenciones (Ulloa, 2015).

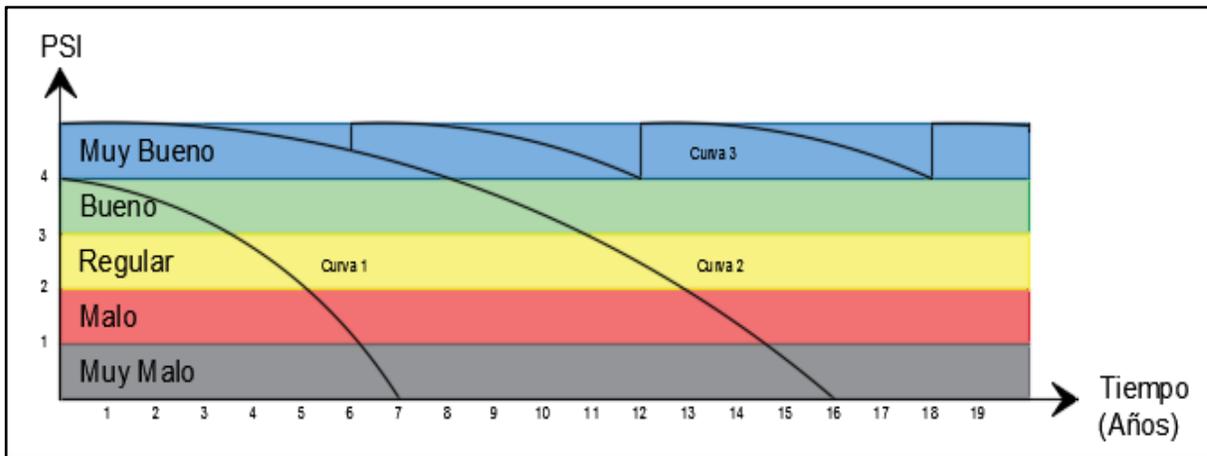


Figura 2.1. Curvas del deterioro del pavimento según la estrategia de intervención

Fuente: Ulloa, 2015

Cuando el índice de serviciabilidad se reduce a menos de un 2-2.5, se determina la falla de la estructura de pavimento (AASHTO, 1993) y son necesarios trabajos mayores como las intervenciones de reconstrucción o rehabilitación mayor.

Una intervención del tipo rehabilitación mayor o reconstrucción implica una inversión entre 7.6 y 10 veces mayor a la inversión necesaria para los trabajos de mantenimientos propuestos en la Curva 3 (Rodríguez & Chaverri, 2012).

No obstante, en caso de ser necesarios los trabajos de rehabilitación, éstos se deben realizar de manera adecuada y procurando que sus resultados perduren por el mayor tiempo posible. De allí, la importancia de conocer las técnicas adecuadas para este tipo de intervenciones y las posibles fallas que pueden sufrir, entre ellas: el agrietamiento por fatiga, el daño por humedad, la deformación permanente y la socavación. Este estudio se enfoca en el agrietamiento por fatiga.

2.1. Agrietamiento por fatiga

La fatiga es el proceso de desgaste estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones variables. Ante la aplicación de cargas cíclicas, en los materiales aparecen microgrietas que experimentan un crecimiento lento, a raíz de cada ciclo de carga, hasta que se alcanza un tamaño crítico de la grieta en el que el material no es capaz de soportar las cargas y se produce la ruptura (ASTM, 2010).

El inicio y la propagación de la grieta dependen fundamentalmente de las características resistentes del material, de su estructura cristalina y del tratamiento a que se somete en su proceso de fabricación. El estudio de la propagación del agrietamiento puede ser descrito mediante los siguientes enfoques:

- Enfoque de la mecánica de la fractura - Ley de Paris

Este enfoque sugiere que la tasa de propagación de la grieta por fatiga (da/dN) depende de un factor de intensidad de esfuerzos (K) que representa la severidad de la distribución de tensiones alrededor de la grieta. En la Ecuación 2.1, se muestra la ley empírica potencial de la mecánica de la fractura desarrollada por Paris y Erdogan (1963).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \text{ (Ecuación 2.1)}$$

Donde,

a: longitud de la grieta.

N: número de ciclos.

m y C: constantes del material que dependen de la razón de esfuerzos y de las condiciones medioambientales.

ΔK : cambio en el factor de intensidad de esfuerzos, que se puede obtener por medio de la Ecuación 2.2.

$$\Delta k = Y\Delta\sigma_n\sqrt{\pi a} \text{ (Ecuación 2.2)}$$

Donde,

Y: es función del tamaño y forma de la grieta.

$\Delta\sigma_n$: cambio en el esfuerzo nominal aplicado.

La Ley de Paris establece una variación lineal entre $\log(da/dN)$ y $\log(\Delta K)$ (ver Figura 2.2). Sin embargo, esta relación sólo se cumple para un rango de factores de intensidad de esfuerzos (Zona II).

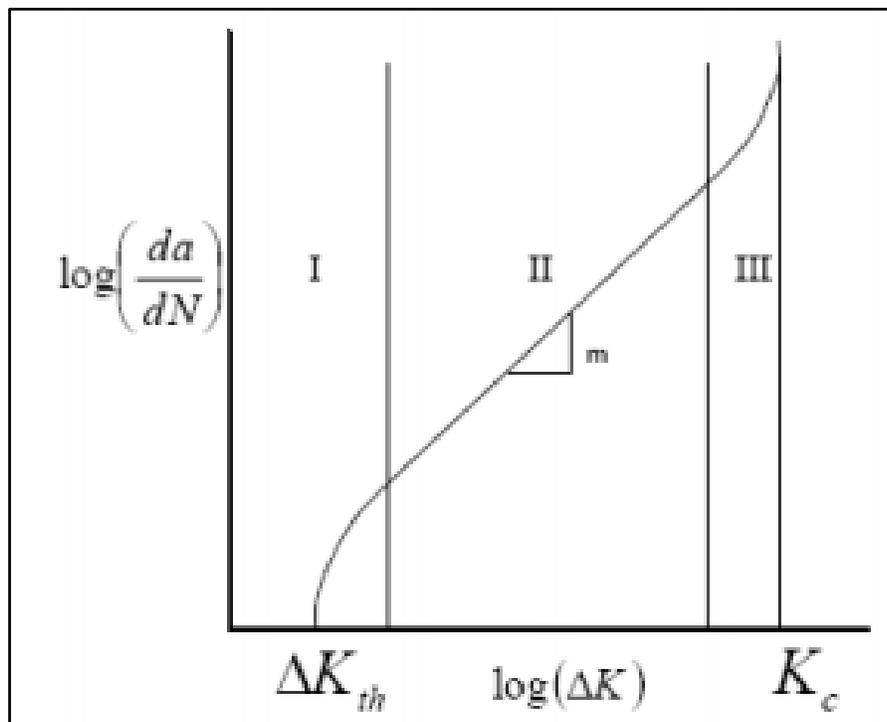


Figura 2.2. Curva de la Ley de Paris

Fuente: López & Torres, 2011

Como se observa en la Figura 2.2, la curva de la Ley de Paris define tres zonas:

- Zona I o régimen próximo al umbral

La propagación de la grieta está relacionada con agrietamientos no continuos, donde el incremento en la longitud de la grieta es menor a 10^{-6} mm/ciclo. La tasa de crecimiento aumenta muy rápidamente con ΔK desde un cambio del factor de intensidad de esfuerzo umbral (ΔK_{th}) por debajo del cual la grieta no crece o la velocidad de crecimiento es indetectable (López & Torres, 2011).

- Zona II o región intermedia

Región donde aplica la linealidad establecida en ley empírica potencial de la mecánica de la fractura de París.

- Zona III o zona de rápida propagación de la grieta

La tasa de crecimiento de la grieta aumenta rápidamente con ΔK hasta llegar a un valor crítico del factor de intensidad de esfuerzo (K_c) donde alcanza la ruptura del material (López & Torres, 2011).

- Enfoque de la energía disipada

El enfoque de la energía disipada establece una relación entre la energía disipada acumulada y el punto de falla, creando una relación única, pues no considera el modo de carga, el nivel de esfuerzos, la frecuencia o el período de descanso.

La energía acumulada es el área bajo la curva esfuerzo-deformación del material. En materiales viscoelásticos, como la mezcla asfáltica, las curvas esfuerzo-deformación son ciclos histeréticos y el área dentro de cada ciclo corresponde a la energía disipada en forma de calor y daño (Shen & Carpenter, 2005). La Ecuación 2.3, muestra la forma de calcular la energía disipada.

$$\text{Energía disipada} = \pi * \sigma_i * \varepsilon_i * \text{sen}\varphi_i \text{ (Ecuación 2.3)}$$

Donde,

σ_i : amplitud del esfuerzo en el ciclo i.

ε_i : amplitud de la deformación en el ciclo i.

φ_i : ángulo de fase entre el esfuerzo y la deformación en el ciclo i.

Carpenter (2003) establece que la falla a fatiga ocurre cuando los valores de la razón de cambio de la energía disipada (RDEC) dejan de ser constantes e incrementan súbitamente (ver Figura 2.3)

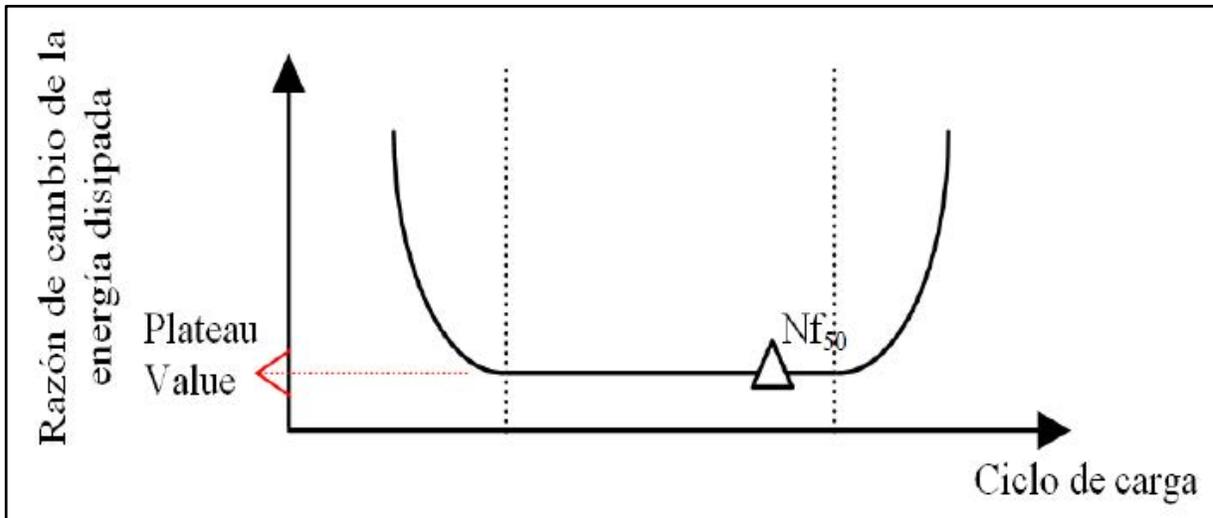


Figura 2.3. Relación entre la razón de cambio de la energía disipada y el número de ciclos de carga

Fuente: Leiva, 2016

La razón de cambio de la energía disipada, como su nombre lo indica, es la razón existente entre el cambio de la energía disipada del ciclo de carga a al ciclo de carga b y la energía disipada en el ciclo original (ver Ecuación 2.4).

$$RDEC_a = \frac{DE_a - DE_b}{DE_a * (b - a)} \text{ (Ecuación 2.4)}$$

Donde,

RDEC_a: Razón de cambio de la energía disipada promedio al ciclo a.

DE_a, DE_b: energía disipada en el ciclo a y b.

Como se observa en la Figura 2.3, inicialmente, la curva RDEC-número de ciclos de carga empieza a descender debido a un reajuste microestructural interno. Posteriormente, la razón de cambio se mantiene constante en un valor denominado *Plateau Value* (ver Ecuación 2.5) hasta alcanzar un número de ciclos de carga que generan una reducción del 50% de la rigidez inicial (N_{f50}) y que define la falla del material. Finalmente, la razón de cambio incrementa súbitamente una vez que la falla ocurre.

$$Plateau\ value = \frac{\left[1 - \left(1 + \frac{100}{N_{f50}}\right)^f\right]}{100} \quad (Ecuación\ 2.5)$$

Donde,

N_{f50} : número de ciclos a una reducción del 50% de la rigidez.

f: pendiente de regresión de la relación entre el DE y el número de ciclos sobre el N_{f50} .

2.1.1. Agrietamiento por fatiga en pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles son estructuras de varias capas compuestas por sub-base, base y carpeta asfáltica que se diseñan con el fin de distribuir los esfuerzos provocados por las solicitaciones del tránsito en la superficie y que llegan a la subrasante, de manera que cada capa reciba las cargas de la capa que se extiende sobre ella. Por lo tanto, la capa inferior de la estructura del pavimento es la capa que recibe la menor carga. Con el fin de aprovechar al máximo esta propiedad, las capas de la estructura de pavimento son dispuestas en orden descendente de capacidad de carga, de manera que la capa superior sea la capa con mayor capacidad estructural y la capa inferior sea la de menor capacidad y generalmente la más barata (Sánchez, 2006). Se denomina flexible pues se deflecta o flexiona ante la aplicación de cargas de tránsito.

La fatiga en un pavimento asfáltico es un deterioro que ocurre producto de la aplicación de cargas repetitivas que inducen esfuerzos o deformaciones de tensión en la fibra inferior del pavimento. Estos esfuerzos o deformaciones ocasionan una grieta que se propaga hasta reflejarse en la superficie del pavimento (Elizondo, 2017). El fenómeno descrito anteriormente se conoce como agrietamiento de abajo hacia arriba, esto debido a que el agrietamiento por fatiga también puede ocurrir desde la superficie del pavimento y propagarse hacia la fibra inferior de la carpeta asfáltica. En la Figura 2.4, se muestra un ejemplo de este tipo de deterioro.



Figura 2.4. Agrietamiento longitudinal presente en la Avenida 7, Montes de Oca

Existen diversas variables que afectan la susceptibilidad de la estructura de pavimento al deterioro por fatiga (Elizondo, 2017), entre ellas:

- Clima
- Granulometría
- Paquete estructural
- Propiedades de los materiales
- Tipo de asfalto
- Tránsito

Las condiciones del clima varían la temperatura y humedad que rodea la estructura de pavimento. Esto es importante de considerar pues debido al comportamiento viscoelástico del asfalto, las variaciones de temperatura y humedad puede variar considerablemente la rigidez de la mezcla asfáltica y con ello su susceptibilidad al deterioro por fatiga.

En cuanto al paquete estructural, cuando se mantienen constantes las propiedades de los materiales de la estructura de pavimento, a mayor espesor de la carpeta asfáltica, menor es la susceptibilidad al agrietamiento de abajo hacia arriba debido a que los esfuerzos y deformaciones a tensión en la fibra inferior son menores.

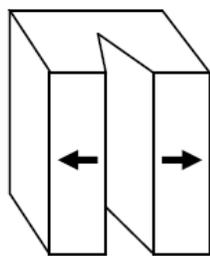
Las propiedades de los materiales como su módulo de rigidez también afectan considerablemente este fenómeno. En términos generales, a mayor módulo de rigidez,

mayor susceptibilidad a la fatiga. La granulometría de los agregados varía el módulo de la mezcla asfáltica y con ello su resistencia a fatiga. Otro aspecto a considerar es el contenido de *filler*, a mayor contenido de *filler*, mayor susceptibilidad a este tipo de deterioro (Elizondo, 2017). De igual manera, el tipo y contenido de asfalto pueden afectar la rigidez de la mezcla asfáltica. Esto ocurre principalmente cuando se utiliza asfalto modificado con polímeros.

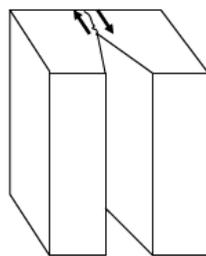
Finalmente, el tipo, número y frecuencia de las cargas de tránsito varían los esfuerzos a los que se ve sometida la carpeta asfáltica y cuanto mayor sea el esfuerzo, mayor es la posibilidad que se supere la capacidad de la carpeta asfáltica de soportar esfuerzos de tensión y termine por agrietarse.

Un pavimento flexible puede experimentar los siguientes modos de rotura (Uzan, 1997):

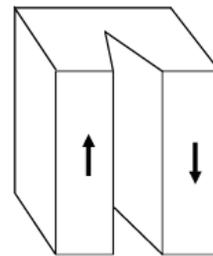
- Modo de rotura I o modo de apertura: se presenta ante la aplicación de cargas de tránsito o debido a movimientos bajo variaciones térmicas (ver Figura 2.5.a.).
- Modo de rotura II o modo de deslizamiento: ocurre debido a esfuerzos de cortante vertical que aparecen en el pavimento debido a la aplicación de cargas de tránsito (ver Figura 2.5.b.).
- Modo de rotura III o modo de rasgado: se genera por el paso de la carga de tránsito a lo largo de una fisura longitudinal. Este modo de rotura es insignificante en pavimentos flexibles (ver Figura 2.5.c.).



(a) Modo de apertura



(b) Modo de deslizamiento



(c) Modo de rasgado

Figura 2.5. Modos de rotura en un pavimento flexible

Fuente: Loría et al., 2010

En la Ecuación 2.6, se muestra la ecuación general de fatiga que determina el número de ciclos de carga necesarios para producir la falla del pavimento.

$$N = k_1 \varepsilon_t^{k_2} MR^{k_3} \text{ (Ecuación 2.6)}$$

Donde N es el número de ciclos de carga para el agrietamiento por fatiga del material, ϵ_t es la deformación unitaria a tracción en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, MR es el módulo de rigidez de la carpeta asfáltica y los coeficientes k_1 , k_2 y k_3 son constantes que describen el comportamiento a fatiga del material. Los coeficientes k_2 y k_3 son negativos, por lo tanto, a mayor módulo de rigidez o a mayor deformación a tensión, menor es la capacidad de la carpeta asfáltica de resistir los esfuerzos de tensión producto de las cargas repetitivas.

2.1.2. Agrietamiento por fatiga producto del reflejo de grietas

El agrietamiento reflectivo es un fenómeno que ocurre cuando se coloca una sobrecapa asfáltica sobre un pavimento severamente agrietado y las grietas existentes en la carpeta asfáltica se propagan a la carpeta nueva en un lapso de tiempo relativamente corto. El agrietamiento ocurre debido a esfuerzos inducidos a la sobrecapa producto de las cargas de tránsito y los efectos climáticos.

Cuando se reflejan las grietas de pavimento deteriorado en la sobrecapa recién colocada, se facilita el flujo del agua a las capas inferiores de la estructura de pavimento y se reduce considerablemente la vida útil de ésta. Por lo tanto, el desempeño a largo plazo de las sobrecapas asfálticas dependerá en gran medida de su habilidad para resistir el reflejo de grietas.

Es por ello, que se utilizan sistemas intercapa, como los materiales geosintéticos para retardar el tiempo que le toma a la grieta en propagarse a la superficie. En el Cuadro 2.2, se muestran algunas alternativas de materiales geosintéticos que han sido utilizados para retardar el reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas.

Cuadro 2.2. Alternativas materiales geosintéticos a ser utilizados como sistema intercapa para retardar el reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas

Material	Descripción
Geotextiles de polipropileno	Material no tejido, de baja rigidez. Se debe colocar el contenido de riego de liga adecuado para garantizar la saturación del material antes de la colocación de la sobrecapa.
Geotextiles de fibra de vidrio y poliéster (Esteras)	Material de fibra de vidrio o su híbrido con poliéster, no tejido y de alta rigidez. Se debe colocar el contenido de riego de liga adecuado para garantizar la saturación del material antes de la colocación de la sobrecapa.
Geogrillas o geomallas	Material de geopolímeros para la formación de grillas o mallas con aberturas mayores a 1/2", con la finalidad de permitir el bloqueo de los agregados de la mezcla asfáltica. Este se aplica utilizando su propia adhesividad o entretejido, colocando riego de liga previo a la sobrecapa.
Membranas compuestas	Tiras de 12", 18", 24 " o 36" de espesor de asfalto con caucho o polímero y materiales geosintéticos. Se aplica tanto con su propia adhesividad como con el riego de liga antes del sobrecapado.
Geocompuestos	Combinación de geomallas con geotextiles. Se debe colocar el contenido de riego de liga adecuado para garantizar la saturación del material antes de la colocación de la sobrecapa.

Fuente: Leiva, 2017

La selección del material geosintético a utilizar como sistema intercapa depende de la condición del pavimento existente. El Cuadro 2.3 ofrece pautas como referencia en la selección del material a utilizar como sistema intercapa.

Cuadro 2.3. Efectividad del sistema intercapa según el tipo de agrietamiento presente

Sistema intercapa	Cuero de lagarto			Arietamiento en bloque, longitudinal y transversal (no térmico)	
	Relacionado con fatiga	Oxidación baja a media	Oxidación media a alta	Bajo a medio (ancho de grieta < 1/2 in)	Alto (1/2 in < ancho de grieta < 1 in)
Geotextil	N	E	A	A	A (2)
Estera	N	E	E (1)	B	B (2)
Geogrilla	N	E (1)	E (1)	E (1)	E (1)
Geocompuesto	N	E	E (1)	E	E (2)

Fuente: Leiva, 2017

Donde,

N: No se recomienda

E: Excelente

A: Adecuado

B: Bien

1: Intercapa con una nivelación previa

2: Intercapa con sello de grietas previo

2.2. Materiales geosintéticos para controlar el agrietamiento reflectivo

En los últimos años, con el fin de retardar el proceso de deterioro por reflexión de grietas, se han utilizado materiales geosintéticos en la superposición de capas del pavimento.

Los materiales geosintéticos están formados por polímeros interconectados entre sí que permiten minimizar la intensidad del esfuerzo en las capas inferiores del pavimento flexible, previenen que el material fino de la subrasante migre a la base granular, incrementan la resistencia de la subrasante, reducen el asentamiento diferencial del pavimento y alargan la vida útil de la estructura del pavimento (Berg, 2000).

En pavimentos flexibles, los materiales geosintéticos cumplen dos mecanismos de funcionamiento: alivio de esfuerzos y refuerzo a tensión.

Según Leiva (2017): "El alivio de esfuerzos se da cuando el sistema intercapa absorbe parte de los movimientos verticales y horizontales de las grietas, reduciendo el esfuerzo de corte en la interfaz, aumentando con ello el tiempo de propagación de la grieta. El refuerzo por otro lado ocurre cuando las propiedades de adherencia y tensión del sistema intercapa absorben los esfuerzos en la punta de la grieta, retardando el tiempo de propagación. El primer mecanismo es de uso en sistemas de sobrecapa delgada, donde el sistema como tal no está trabajando en tensión, mientras que el segundo caso, debido a la configuración de tensión en refuerzo requerido, es comúnmente utilizado en sobrecapas gruesas".

2.2.1. Geotextiles

Son materiales flexibles y permeables fabricados con fibras de poliéster o polipropileno entrelazadas entre sí que se presentan en forma de lámina. Según su proceso de fabricación, los geotextiles se clasifican en tejidos y no tejidos (Naranjo, 2003).

Los geotextiles tejidos son aquellos fabricados en máquinas de tejido de punto que confeccionan cintas entrelazadas de urdimbre en el sentido longitudinal y de trama en el sentido transversal. Por su parte, los geotextiles no tejidos están hechos por fibras o filamentos superpuestos en forma laminar, para que se forme la estructura del material. Este tipo de geotextil es el grupo de uso más extendido (PAVCO, 2012).

En la Figura 2.6, se muestran unos ejemplares de geotextiles no tejidos que se disponen en el mercado nacional.



Figura 2.6. Geotextiles no tejidos

Fuente: Solano, 2016

2.2.2. Geomallas

Son estructuras tridimensionales fabricadas de polietileno de alta densidad mono o biorientadas. Se fabrican mediante un proceso de extrusión seguido de un estiramiento mono direccional en el caso de las mono-orientadas o longitudinal y transversal en el caso de las biorientadas (koerner, 2005).

En la Figura 2.7, se muestra un ejemplo de un tipo de geomallas biorientadas.

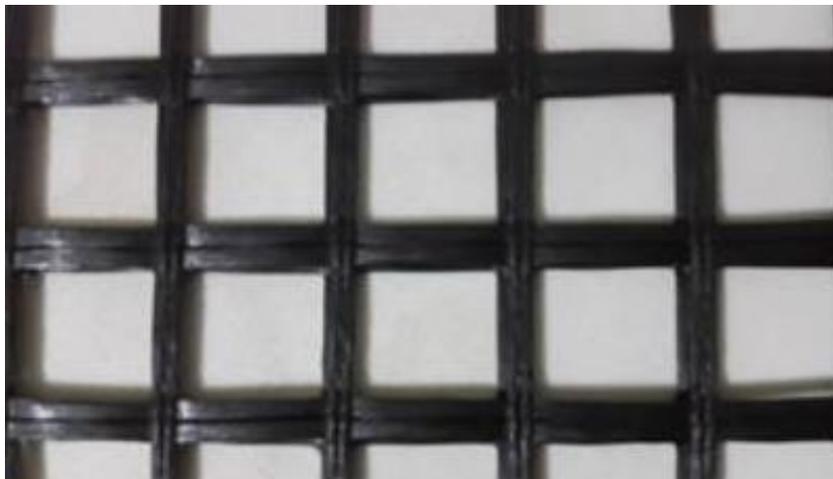


Figura 2.7. Geomallas biorientadas

Fuente: Solano, 2016

2.2.3. Geocompuestos

Son compuestos formados por la combinación de dos o más tipos de materiales geosintéticos. La función de los geocompuestos depende de los geosintéticos utilizados para su fabricación (koerner, 2005).

En la Figura 2.8, se muestra un ejemplo de un tipo de geocompuesto: combinación de geotextil y geomalla.



Figura 2.8. Geocompuesto

Fuente. Solano, 2016

2.3. Emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas son dispersiones compuestas de asfalto, agua y un agente emulsivo, estas también pueden contener aditivos para distintos fines, como estabilizantes, mejoradores de rendimiento, mejoradores de adherencia, o agentes de control de rotura (Instituto del Asfalto, 2010).

Dependiendo de las cargas eléctricas que rodean a las partículas de asfalto, las emulsiones asfálticas se clasifican en tres categorías: aniónicas, catiónicas y no iónicas. Cuando las partículas de asfalto están cargadas negativamente, la emulsión es aniónica. En contra parte, cuando las partículas de asfalto están cargadas positivamente, la emulsión es catiónica. Por su parte, cuando las partículas de asfalto poseen carga neutra la emulsión se denomina no iónica.

La selección del tipo de emulsión a utilizar depende de la carga en el agregado y se basa en el principio de electricidad de que las cargas iguales se repelen, mientras que cargas opuestas se atraen. Por ello, si el agregado tiene carga negativa se debe utilizar una emulsión catiónica y si el agregado tiene una carga positiva se debe utilizar una emulsión aniónica.

En Costa Rica, el agregado más abundante es silíceo y tiende a cargarse negativamente cuando circula una corriente eléctrica a través de un líquido. Por ende, cuando se utiliza agregado silíceo se debe utilizar una emulsión asfáltica catiónica. Es por ello, que las emulsiones asfálticas producidas en la planta de la Refinadora Costarricense de Petróleo S.A. (RECOPE) son catiónicas.

Otra clasificación de las emulsiones asfálticas depende del tiempo de rompimiento que estas posean. El tiempo de rompimiento o cura de una emulsión asfáltica es el tiempo que tarda esta en evaporar toda el agua y reactivar toda la capacidad adhesiva del residuo asfáltico.

Dependiendo de su tiempo de rompimiento, las emulsiones se clasifican en: rompimiento rápido (RS), rompimiento medio (MS), rompimiento lento (SS) y rompimiento muy rápido (QS).

Otros símbolos utilizados en la nomenclatura de emulsiones asfálticas son: la letra **"h"** que hace alusión a una consistencia de la base asfáltica bastante rígida, la letra **"s"** que indica que la base asfáltica es blanda, las letras **"HF"** que se utilizan en emulsiones aniónicas para

indicar una alta flotación y las letras "PM" que hace alusión a la inclusión de un polímero en la emulsión asfáltica. El número "1" utilizado en la nomenclatura de emulsiones asfálticas indica que la emulsión tiene una viscosidad baja. Por su parte, el número "2" indica que la emulsión tiene una viscosidad alta.

El Cuadro 2.4, muestra los símbolos que se utilizan típicamente en la nomenclatura de emulsiones asfálticas.

Cuadro 2.4. Símbolos en la nomenclatura de emulsiones asfálticas

Nomenclatura	Significado
SS	Rompimiento lento
RS	Rompimiento rápido
QS	Rompimiento muy rápido
LM	Modificado con látex
HF	Alta flotación
PM	Modificado con polímeros
1	Baja viscosidad
2	Alta viscosidad
h	Asfalto de baja penetración

Fuente: División de Construcción Departamento de Transporte de California, 2009

La emulsión asfáltica producida por RECOPE es la CRS-1. Según su nomenclatura, esta emulsión es catiónica de rompimiento rápido y de baja viscosidad.

2.4. Metodología constructiva para la rehabilitación con sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos como sistema intercapa

El desempeño de una sobrecapa asfáltica está directamente relacionado con su proceso constructivo. A continuación, se presentan algunas recomendaciones del proceso constructivo de una sobrecapa asfáltica reforzada con materiales geosintéticos para garantizar su desempeño óptimo.

Las recomendaciones presentadas se basan en los aspectos señalados en la Guía de colocación de sobrecapas asfálticas para inspectores desarrollada por el LanammeUCR.

2.4.1. Trabajos preliminares a la colocación de la sobrecapa asfáltica

- Corregir cualquier tipo de imperfección, depresiones o deformaciones en la huella de las ruedas en la superficie de trabajo. En caso de ser necesario, y de acuerdo a un criterio técnico adecuado, se puede realizar un perfilado de la superficie para eliminar

deterioros existentes y proveer una regularidad adecuada previa a la colocación de la sobrecapa. La profundidad a perfilar será definida por el ingeniero encargado.

- Se debe sellar toda grieta mayor a los 6mm.
- Colocar un espesor mínimo de 2cm de concreto asfáltico para la nivelación de la superficie.

2.4.2. Preparación de la superficie

- Se debe realizar la limpieza de la capa descubierta, asegurándose de eliminar cualquier material suelto, polvo, tierra u otras sustancias deletéreas o degradables que impidan o disminuyan una adecuada adherencia.
- La superficie debe estar libre de humedad y el sistema nunca debe ser colocado bajo la lluvia, ya que esto también podría afectar la adherencia.

2.4.3. Aplicación de la emulsión asfáltica

- Asegurarse que la emulsión asfáltica se encuentre dentro del rango de temperaturas de 55°C y 70°C en la aplicación, para una mejor trabajabilidad.
- Se debe determinar la cantidad óptima de emulsión asfáltica a utilizar para evitar problemas de exudación o de adherencia. Se recomienda utilizar las tasas de aplicación de ligante asfáltico que dé el fabricante del material geosintético.
- Realizar un paño de prueba para calibrar el ángulo, abertura, alineación y altura de las barras de distribución de asfalto.
- Aplicar emulsión asfáltica en toda el área, tanto en las paredes verticales como en el fondo. Asegurarse que la distribución de la emulsión se aplique de manera continua y uniforme (ver Figura 2.9).



Figura 2.9. Riego de liga uniforme sobre la superficie

Fuente: Loria et al, 2015

- Cuando se utilizan geotextiles se debe colocar de un 70% a un 80% de la tasa de aplicación de ligante asfáltico previo a la colocación del geotextil y el restante posterior a la instalación del geosintético. En caso de las geomallas, se aplica toda la dotación de ligante asfáltico antes de la instalación del geosintético.
- Distribuir la emulsión en un ancho que exceda en 150mm el ancho del geosintético.
- Evitar que circulen vehículos sobre la emulsión, previo a la colocación del sistema intercapa.
- Asegurarse que la emulsión **"rompa"** (**pierda agua** por evaporación) por completo, para evitar que esta quede en las llantas del camión colocador del geotextil o la pavimentadora (ver Figura 2.10). El tiempo de ruptura está directamente relacionado con las condiciones climáticas (viento, humedad y temperatura ambiente). Este puede tardar de 30min a 4h según el tipo de ligante utilizado.

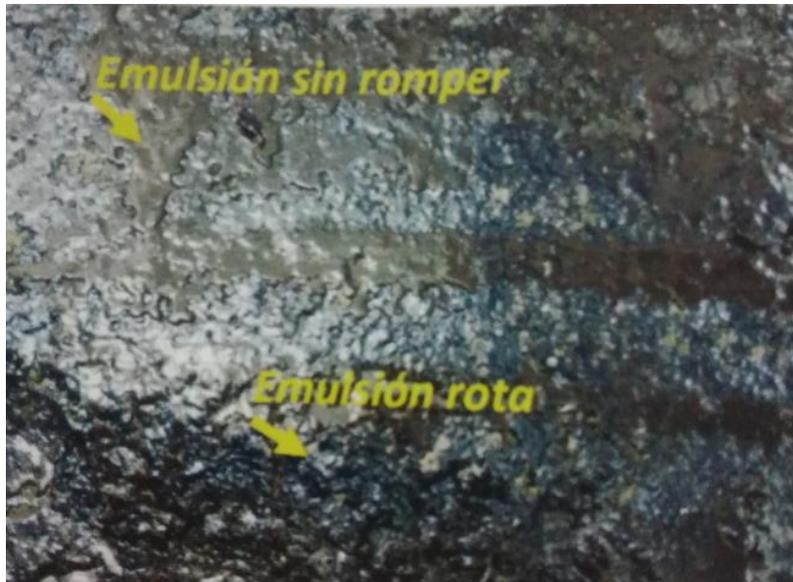


Figura 2.10. Rompimiento de la emulsión asfáltica

Fuente: Loría et al, 2015

2.4.4. Colocación del material geosintético

- Colocar el material geosintético sobre la emulsión, de manera que no se formen arrugas en su extendido y que se maximice el contacto con la superficie de apoyo.
- Suprimir, aplanar o nivelar, todas las arrugas o corrugaciones.
- Proveer traslapes de 150 mm en la dirección transversal y 100 mm en la dirección longitudinal. El traslape en las juntas transversales, se deberá realizar en la dirección de la pavimentación, para prevenir el desplazamiento o levantamiento de los bordes en las juntas por efecto de la pavimentadora. Evitar áreas de superposición en las regiones de sollicitación de cargas de tráfico.
- Aplicar emulsión asfáltica adicional sobre los traslapes, para asegurar la adherencia de la doble colocación en tales áreas, evitando excesos en áreas adyacentes.
- Cuando se está instalando el material en zona de curva, se debe de cortar en pequeñas secciones en forma rectangular como si se estuviera armando la curva por segmentos.

En el Cuadro 2.5, se muestran algunas soluciones para los posibles problemas que pueden surgir durante la instalación de los materiales geosintéticos.

Cuadro 2.5. Soluciones a problemas durante la instalación de materiales geosintéticos

Problema	Causas	Soluciones
Arrugas	<ul style="list-style-type: none"> • Colocación del equipo sin alineamiento o tan lejos del rollo que este no esté en tensión • Giro del equipo sin parar y cortar el geosintético • Giros del equipo sobre el geosintético 	<ul style="list-style-type: none"> • Asegurarse que el equipo de colocación se mantiene en línea recta, cualquier desvío puede ocasionar la generación de arrugas • Revisar que el equipo genere la tensión y alineamiento correcto • Minimizar el tránsito de equipo sobre la intercapa
Llantas de los vehículos están recogiendo, dejando o desgarrando el material de la intercapa	<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 	<ul style="list-style-type: none"> • No reducir la tasa de emulsión por debajo de la dada por especificación • Reparar las áreas dañadas • Limitar el paso de equipo sobre la emulsión
Burbujas formadas bajo la intercapa	<ul style="list-style-type: none"> • El pavimento está húmedo o saturado 	<ul style="list-style-type: none"> • El rollo de geosintético tiene caucho de la llanta adherido, cambiar el material y limpiar las llantas • Secar el pavimento antes de colocar el geosintético • Instalar drenaje si la subrasante está saturada y no se seca
Encogimiento del geosintético cuando se coloca la emulsión	<ul style="list-style-type: none"> • Riego de liga muy caliente 	<ul style="list-style-type: none"> • Enfriar o esperar que se enfríe el riego de liga antes de aplicar el geosintético • Revisar la temperatura de colocación de la emulsión asfáltica

Fuente: Leiva, 2017

Problema	Causas	Soluciones
La intercapa no está pegada al pavimento	<ul style="list-style-type: none"> • Emulsión muy fría • Insuficiente emulsión • Superficie del fresado muy rugosa • El material se coloca con el lado incorrecto para abajo • La emulsión no ha sido absorbida por la capa de nivelación 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar la temperatura del ligante y la tasa de aplicación • Agregar capa de nivelamiento o bacheo • Asegurar que la calidad del material colocado es la adecuada
Emulsión no está pegada al pavimento	<ul style="list-style-type: none"> • El pavimento está húmedo o sucio • La emulsión está muy fría 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpiar y secar el pavimento • Revisar y ajustar la temperatura de la emulsión

Fuente: Leiva, 2017

2.4.5. Colocación de la sobrecapa asfáltica

- Si se realizó una segunda aplicación de emulsión asfáltica después de la instalación del material geosintético, se debe esperar a que esta rompa.
- **No se debe colocar "traba"** (actividad que consiste en extender una capa delgada de mezcla asfáltica menor a 4cm en el área a bachear una vez que se ha aplicado y roto el riego de liga).
- Verificar la temperatura de la mezcla asfáltica.
- Colocar una sobrecapa de concreto asfáltico en un plazo no mayor a 48h posterior a la colocación del sistema intercapa. El espesor de la sobrecapa no debe ser menor a los 40mm. El proceso se realiza de igual forma que en cualquier proceso de instalación y compactación de mezcla asfáltica, con la precaución de no realizar maniobras bruscas que puedan rasgar el material geosintético.

2.4.6. Compactación

- Compactar la sobrecapa mediante medios convencionales para garantizar la calidad de la mezcla asfáltica y la adherencia necesaria entre capas.
- La temperatura de la mezcla no debe exceder los 160°C para evitar ocasionar daño al geosintético. No se deben colocar sobrecapas a temperaturas de la mezcla menores a 125°C.
- La compactación se debe realizar en capas inferiores a 10cm y superiores a 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado de la mezcla asfáltica.
- La compactación deseada oscilará entre los 92% y 97% de la densidad máxima teórica (3% a 8% de vacíos).

2.5. Metodología de diseño de sobrecapas asfálticas con materiales geosintéticos como sistema intercapa

La metodología propuesta está basada en el procedimiento establecido por Koerner (2005) y la guía de diseño para el refuerzo y control de agrietamiento de capas asfálticas con geosintéticos de Geomatrix.

1. Determinar el valor de la resistencia de la subrasante del suelo. Este valor se determina mediante el *California Bearing Ratio* (CBR).
2. Determinar el número de ejes equivalentes de carga iniciales del proyecto (NTT_i) (número de ejes equivalentes de carga a la fecha de la intervención).
3. Determinar la tasa de crecimiento anual del tráfico de la ruta a intervenir y el periodo de diseño adecuado para la intervención.
4. Obtener el número de ejes equivalentes de carga para el periodo de diseño (DTN_n) según la tasa de crecimiento anual.
5. Utilizando la Ecuación 2.7 (AASTHO, 1993), determinar el espesor total del pavimento (t_{An}) necesario para que el paquete estructural del pavimento soporte las cargas a las que es sometido durante el periodo de diseño.

$$\log(DTN_n) = 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[\frac{(4.2 - p_t)}{(4.2 - 3.5)} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07 \text{ (Ecuación 2.7)}$$

Donde,

DTN_n = número de ejes equivalentes de carga para el periodo de diseño.

SN = número estructural del pavimento.

p_t = nivel de servicio final.

M_R = módulo resiliente de la subrasante.

6. Determinar el espesor efectivo del pavimento existente (t_e) antes de la colocación de la sobrecapa³.
7. El espesor de la sobrecapa asfáltica requerida (t) se determina según la Ecuación 2.8.

$$t = t_{An} - t_e \text{ (Ecuación 2.8)}$$

En el caso de que se refuerce la sobrecapa asfáltica con materiales geosintéticos, se puede modificar el número de ejes equivalentes de carga para el periodo de diseño del proyecto (DTN_n) por un factor de eficiencia del material geosintético (FEF) (Koerner, 2005). La Ecuación 2.9 muestra cómo obtener el número de ejes de carga modificado por el factor de eficiencia del material geosintético.

$$DTN_r = \frac{DTN_n}{FEF} \text{ (Ecuación 2.9)}$$

Donde,

DTN_n es el número de ejes equivalentes de carga para el periodo de diseño del proyecto.

DTN_r es el número de ejes de carga modificado por el factor de eficiencia.

FEF es el factor de eficiencia del material geosintético, el cual se obtiene de la razón existente entre el número de ciclos que causan la falla cuando la sobrecapa está reforzada con materiales geosintéticos y el número de ciclos que causan la falla cuando la sobrecapa no está reforzada (Koerner, 2005). En la Ecuación 2.10 se muestra cómo se calcula el valor de FEF.

$$FEF = \frac{N_r}{N_n} \text{ (Ecuación 2.10)}$$

Donde,

FEF es el factor de eficiencia del material geosintético.

³ En caso de que se efectúe un proceso de perfilado para eliminar la superficie agrietada, t_e es el espesor del pavimento posterior al proceso de perfilado.

N_r es el número de ciclos que causan la falla si la sobrecapa está reforzada con materiales geosintéticos.

N_n es el número de ciclos que causan la falla si la sobrecapa no está reforzada.

El valor de FEF se determina por medio de ensayos de laboratorio. En el Cuadro 2.6, se muestran los valores de FEF para distintos tipos de geotextiles obtenidos por medio de ensayos experimentales.

Cuadro 2.6. Factor de eficiencia para distintos tipos de geotextiles

Geotextil	Gramaje	FEF
Sin geotextil	-	1
Geotextil no tejido punzado de polipropileno	150	2.1
Geotextil no tejido punzado de poliéster	200	4.8
Geotextil tejido punzado de polipropileno	200	6.8
Geotextil tejido punzado de poliéster	170	5.8
Geotextil no tejido termofijado de poliéster	108	15.9

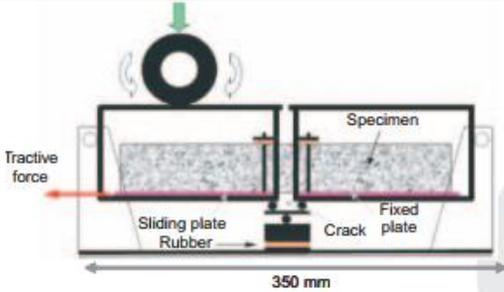
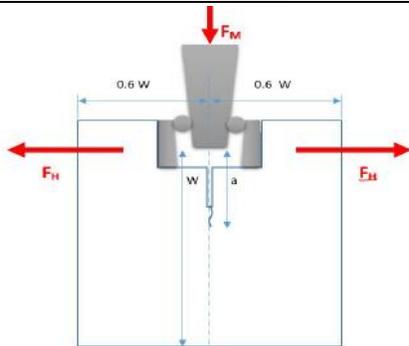
Fuente: Koerner, 2005

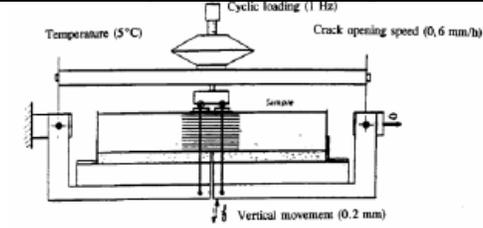
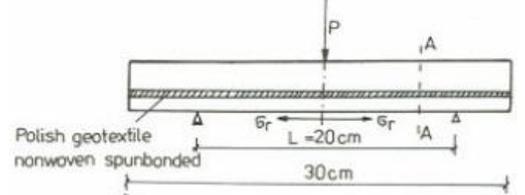
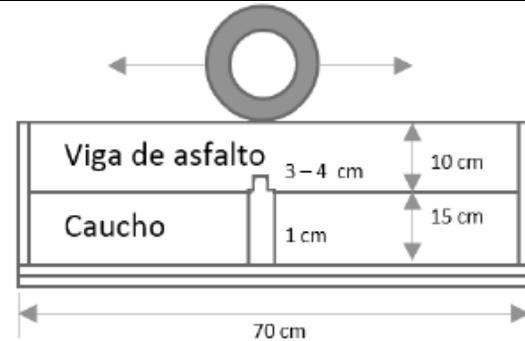
Una vez que se ha obtenido el valor de DTN_r se repiten los pasos 5, 6 y 7 y se obtiene un nuevo valor del espesor de la sobrecapa a colocar (t').

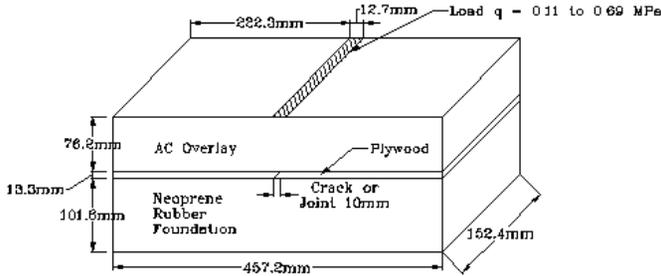
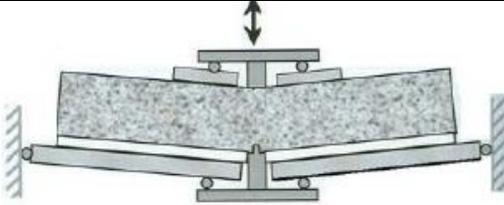
2.6. Ensayos para la evaluación del reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas

El Cuadro 2.7 muestra una recopilación de ensayos que se han desarrollado para evaluar la resistencia de los pavimentos flexibles al efecto de fatiga por reflexión de grietas.

Cuadro 2.7. Ensayos para la evaluación del reflejo de grietas en sobrecapas asfáltica

Ensayo	Descripción del ensayo	Resultados	Esquema del montaje
<p><i>Wheel Reflective Cracking</i> (WRC) (Prieto, Gallego, & Pérez, 2007)</p>	<p>El ensayo consiste en aplicar una carga cíclica con una llanta a una tasa de 43 ciclos/min en una viga de 305mm x 75mm x 60mm. El ensayo termina cuando se alcanza un valor máximo de 0.2mm.</p>	<p>Longitud vertical de la grieta y desplazamiento vertical en el tiempo, movimiento relativo entre ejes de grieta</p>	
<p>Cuña de separación (Tschegg, Stanzl-Tschegg, & Litzka, 1993)</p>	<p>El ensayo consiste en aplicar una carga estática a una razón de 0,05mm/min, para separar dos placas: una constituye la capa existente y la otra la capa nueva. Los especímenes a ensayar son cúbicos y sus dimensiones son 150mm x 120mm x 150mm.</p>	<p>Curva fuerza horizontal contra desplazamiento, máxima fuerza vertical contra temperatura, energía de fractura contra temperatura</p>	

Ensayo	Descripción del ensayo	Resultados	Esquema del montaje
<p>Ensayo de contracción-flexión del Laboratorio Público de Caminos de Autum, Francia (Dumas & Vecoven, 1993)</p>	<p>El ensayo consiste en aplicar una carga estática horizontal de 0.024in/h y una carga cíclica vertical de 1Hz en una viga de 24x2.8x2.8in.</p>	<p>Tiempo de inicio de la fractura y longitud, tiempo de propagación de la grieta y longitud, tiempo de rotura.</p>	
<p>Ensayo de flexión y corte de la Universidad Tecnológica de Cracow, Polonia (Grzybowska, Wojtowicz, & Fonferko, 1993)</p>	<p>El ensayo consiste en aplicar una carga estática en flexión a una tasa de 0,47in/min, carga dinámica en flexión bajo un pulso haversiano de 5Hz o carga estática de corte a una razón de carga de 4×10^{-2} in/min; a vigas de 12x3x3in</p>	<p>Flexión estática: tiempo de agrietamiento, fuerza máxima, esfuerzo de flexión. Flexión dinámica: Número de repeticiones de carga. Corte estático: Máxima fuerza de corte y esfuerzo.</p>	
<p>Dispositivo de carga de llanta del Instituto Tecnológico Technion-Israel (Livneh, Ishai, & Kief, 1993)</p>	<p>El ensayo consiste en aplicar una carga cíclica de una llanta a especímenes de 28x4x4 in</p>	<p>Número de repeticiones de carga de la llanta a la falla, longitud de la grieta con respecto al número de repeticiones y tiempo de ensayo</p>	

Ensayo	Descripción del ensayo	Resultados	Esquema del montaje
<p>Ensayo de sobrecapas de la Universidad de Atlantic Florida (Sobhan, Crooks, Tandon, & Mattingly, 2004)</p>	<p>El ensayo consiste en aplicar una carga estática o cíclica (sinusoidal) a 2 Hz de frecuencia en forma de flexión en un solo punto, a vigas de 18x6x7.5 in</p>	<p>Carga o número de repeticiones para que la primera grieta sea reflejada, hasta la propagación de la grieta a la mitad de la sobrecapa y hasta que alcanza la superficie</p>	
<p>Ensayo de sobrecapas de Pont et Chaussées (Tamagny, Wendling, & Piau, 2004)</p>	<p>El ensayo consiste en aplicar una carga estática en la dirección horizontal y cíclica sinusoidal de 10Hz en la dirección vertical, a vigas de 2x2x26in</p>	<p>Número de repeticiones contra fuerza vertical o energía disipada, número de repeticiones contra la longitud de la grieta</p>	

Fuente: Vera, 2012 & Leiva, 2016

Capítulo 3. Etapa experimental y resultados

En el presente capítulo, se recopilan los resultados obtenidos durante el desarrollo del esquema experimental para el estudio del fenómeno de reflexión de grietas en sobrecapas asfálticas.

3.1. Materiales utilizados en el trabajo final de graduación

3.1.1. Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica empleada para esta investigación fue proporcionada por la empresa Constructora Pavicen LTDA, con un diseño de mezcla asfáltica de tamaño máximo nominal de **12,7 mm**. El "Informe de ensayo INF. 5340-2016 - Control de Calidad de la Mezcla Asfáltica", elaborado por el Laboratorio de la Compañía Asesora en Construcción e Ingeniería (CACISA S.A.), correspondiente a este diseño de mezcla en el mes de abril de 2016 se presenta en el Anexo B. En el Anexo C, se muestra el "Informe de ensayo INF.LCP-152-2017 - Control de Calidad de la Mezcla Asfáltica", elaborado en el mes de junio de 2017 por la empresa CACISA S.A, correspondiente a la revisión del diseño de la mezcla asfáltica empleada en esta investigación.

Con el fin de verificar algunos parámetros que se encuentran en el informe del diseño de mezcla anterior, se realizaron los siguientes ensayos: Ensayo de contenido de asfalto mediante ignición (AASHTO T 308 y ASTM D 95/D 6307), Ensayo de granulometría (AASHTO T 24/ T 11 y ASTM D 5444) y Determinación de la gravedad específica máxima teórica (ASTM D 2041).

En el Cuadro 3.1, se muestran los resultados del ensayo de contenido de asfalto mediante ignición realizado a la mezcla asfáltica empleada en esta investigación. Por su parte, en el Cuadro 3.2 se muestran los resultados del ensayo de granulometría desarrollado en el LanammeUCR. En el Cuadro 3.4, se presentan los resultados del ensayo determinación de la gravedad específica máxima teórica.

Cuadro 3.1. Resultados del ensayo de contenido de asfalto mediante ignición

Ensayo	Método de ensayo		Resultados			Unidades
	AASHTO	ASTM	n=2			
Contenido de agua	-	D 95	0.27	±	0.08	%
Factor de corrección	T 308	D 6307		±		%
Contenido de asfalto sobre la mezcla	T 308	D 6307	6.2	±	0.4	%
Contenido de asfalto sobre el agregado	T 308	D 6307	6.4	±	0.4	%

Los valores del contenido de asfalto reportados en el "Informe de ensayo del Control de Calidad de la Mezcla Asfáltica" para este diseño de mezcla son de 6,00% de asfalto sobre el peso de la mezcla y de 6,36% sobre el peso de los agregados, estos valores son menores que los obtenidos en la prueba realizada para la caracterización de la mezcla asfáltica en el LanammeUCR, pero se encuentran dentro del rango de aceptación.

Cuadro 3.2. Resultados del ensayo de granulometría

Malla	Método de ensayo		Resultados n=2 % Pasando			Tolerancias y Especificaciones para Tamaño Máx. Nominal 12,7 mm
	AASHTO	ASTM				
1" (25 mm)	T 24/T11	D 5444	100.0	±	0.0	100
3/4" (19 mm)	T 24/T11	D 5444	100.0	±	0.0	100
1/2" (12,7 mm)	T 24/T11	D 5444	98.3	±	0.2	90-100 (±5)
3/8" (9,5 mm)	T 24/T11	D 5444	89.6	±	0.4	70-90 (±5)
N°4 (4,75 mm)	T 24/T11	D 5444	58.9	±	1.2	45-65 (±4)
N°8 (2,36 mm)	T 24/T11	D 5444	39.4	±	0.8	28-39 (±4)
N°16 (1,18 mm)	T 24/T11	D 5444	26.2	±	0.7	16-26 (±4)
N°30 (600 µm)	T 24/T11	D 5444	18.7	±	0.6	9-19 (±4)
N°50 (300 µm)	T 24/T11	D 5444	12.7	±	0.7	5-16 (±4)
N°100 (150 µm)	T 24/T11	D 5444	8.4	±	0.5	-
N°200 (75 µm)	T 24/T11	D 5444	5.5	±	0.3	2-8 (±2)

En el Cuadro 3.3, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en el LanammeUCR (ver Cuadro 3.2) y los reportados en el Informe de Ensayo INF. 5340-2016 de CACISA S.A (ver Anexo B).

Cuadro 3.3. Comparación de los resultados obtenidos sobre la granulometría de la mezcla asfáltica

Malla	Método de ensayo		Resultados n=2 % Pasando			Diseño de mezcla % Pasando	Tolerancias y Especificaciones para Tamaño Máx. Nominal 12,7 mm
	AASHTO	ASTM					
1" (25 mm)	T 24/T11	D 5444	100.0	±	0.0	100	100
3/4" (19 mm)	T 24/T11	D 5444	100.0	±	0.0	100	100
1/2" (12,7 mm)	T 24/T11	D 5444	98.3	±	0.2	95	90-100 (±5)
3/8" (9,5 mm)	T 24/T11	D 5444	89.6	±	0.4	84	70-90 (±5)
N°4 (4,75 mm)	T 24/T11	D 5444	58.9	±	1.2	55	45-65 (±4)
N°8 (2,36 mm)	T 24/T11	D 5444	39.4	±	0.8	35	28-39 (±4)
N°16 (1,18 mm)	T 24/T11	D 5444	26.2	±	0.7	22	16-26 (±4)
N°30 (600 µm)	T 24/T11	D 5444	18.7	±	0.6	15	9-19 (±4)
N°50 (300 µm)	T 24/T11	D 5444	12.7	±	0.7	12	5-16 (±4)
N°100 (150 µm)	T 24/T11	D 5444	8.4	±	0.5	-	-
N°200 (75 µm)	T 24/T11	D 5444	5.5	±	0.3	5.7	2-8 (±2)

Como se muestra en el Cuadro 3.3, los valores obtenidos de la granulometría para la mezcla asfáltica en estudio, se encuentran dentro del rango de tolerancias y especificaciones para el tamaño máximo nominal de 12,7 mm.

Cuadro 3.4. Resultados del ensayo determinación de la gravedad específica máxima teórica

No. Espécimen	Peso contenedor (g)	Peso contenedor sumergido (g)	Peso contenedor + muestra seca (g)	Peso muestra (g)	Peso contenedor + muestra sumergida (g)	Temperatura (°C)	Gmm	Peso bandeja + muestra (g)	Peso bandeja (g)	Gmm corregido
	A	B	C	D = C - A	E		$F = D / (D + B - E)$	G	H	$I = D / (G - H + B - E)$
1	2367.4	1493	4430	2062.6	2717.7	25.4	2.462	3076.2	1012.2	2.458
2	2367.4	1493	4429.8	2062.4	2717.8	25.4	2.462	3075.9	1013.3	2.462
Promedios	2367.4	1493	4429.9	2062.5	2717.75		2.462			2.460

La gravedad específica máxima teórica de la mezcla asfáltica (Gmm) reportada en el informe de ensayo INF. 5340-2016 es de 2.461 (ver Anexo B). Por su parte, el Gmm promedio obtenido en el LanammeUCR es de 2.460. La diferencia obtenida es despreciable.

En el Cuadro 3.5 se presentan los parámetros Marshall para el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica empleada en esta investigación.

Cuadro 3.5. Parámetros Marshall para el porcentaje óptimo de asfalto

Parámetros Marshall	Valores	Especificación (CR-2010)
Estabilidad (kg)	1950	800 mínimo
Flujo (1/100 cm)	33.3	20 - 35
Densidad	2.362	-
Máxima teórica	2.461	-
% Vacíos	4.0	3.0% - 5.0%
% VMA	14.7	14.0 mínimo
%VFA	72.6	65 - 78
Relación polvo / asfalto	1.2	0.6 - 1.3

Fuente: CACISA S.A., 2016

3.1.2. Emulsión asfáltica

La emulsión asfáltica empleada es del tipo CRS-1 (catiónica de rompimiento rápido y de baja viscosidad).

Con el fin de verificar algunos parámetros de la emulsión asfáltica utilizada, se realizó una caracterización completa de la emulsión. El Cuadro 3.6 muestra los resultados obtenidos de los ensayos.

Cuadro 3.6. Resultados de la caracterización de la emulsión asfáltica

Ensayo	Método de ensayo		Resultados			Unidades	Límites de la especificación
	AASHTO	ASTM					
Viscosidad Saybol Furol a 50°C	T 72	D 88	28.9519	±	0.8219	sFs	20 - 100
Prueba de malla N°20	T 59	D 244	0.0030	±	0.0010	%	max 0.1
Estabilidad al almacenamiento a 24h	T 59	D 244	0.2121	±	0.0782	%	max 1
Asfalto residual	T 59	D 6997	66.6083	±	0.5843	%	mín 60
Destilado	T 59	D 6997	0.3299	±	0.5843	%	max 3.0
Fase acuosa	T 59	D 6997	32.7418	±	0.7563	%	-
Fase orgánica	T 59	D 6997	0.2499	±	0.7563	%	-
Penetración (asfalto residual) a 25 °C	T 49	D 5	139.000	±	1.3962	1/10mm	100 - 250
Ductilidad (asfalto residual) a 25°C	T 51	D 113	100.000	±	0.1600	cm	min 40
Solubilidad en tricloroetileno (asfalto residual)	T 44	D 2042	99.8634	±	0.0279	%	mín 97.5
Insolubilidad en tricloroetileno (asfalto residual)	T 44	D 2042	0.1366	±	0.0279	%	-
Carga de partícula de emulsiones asfálticas	T 59	D 244	Catiónica			Tipo de carga	Catiónica
Demulsibilidad a 25°C	-	D 6936	46.6908	±	0.91	%	mín 40

Fuente: LanammeUCR, 2017

Como se observa en el Cuadro 3.6, la emulsión asfáltica cumple con todos los límites de las especificaciones establecidas para los parámetros ensayados.

En el Anexo D, se muestra el **"Informe de Ensayos AS-09-06-038"** brindado por RECOPE S.A. que muestra los resultados obtenidos por esta empresa en los ensayos realizados a la emulsión asfáltica.

3.1.3. Geotextiles

El geotextil utilizado es de la clase no tejidos de polipropileno, cuyo nombre comercial es MacTex N 27.1 de Maccaferri. En el Cuadro 3.7, se presentan las propiedades de los geotextiles utilizados.

Cuadro 3.7. Propiedades de los geotextiles MacTex N 27.1

Propiedad	Unidad	MacTex N 27.1
Gramaje	g/m ²	140
Espesor	mm	1.1
Resistencia a la tracción tira ancha sentido longitudinal	kN/m	7.7
Elongación tira ancha	%	50
Resistencia a la tracción GRAB sentido longitudinal	kN	0.445
Elongación GRAB	%	50
Resistencia al punzonamiento CBR	kN	1.32
Resistencia al desgarre trapezoidal sentido longitudinal	kN	0.22
Punto de reblandecimiento	°C	150
Permeabilidad normal	Cm/s	0.45
Permeabilidad	s ⁻¹	2
Largo	m	110 55
Largura	m	3.8

Fuente: Maccaferri, 2014

En el Anexo E, se muestran las especificaciones técnicas brindadas por el proveedor del geotextil a utilizar.

3.1.4. Geomallas

La geomalla utilizada es la geomalla MacGridAR.7 de Maccaferri. En el Cuadro 3.8, se presentan las propiedades de la geomalla utilizada.

Cuadro 3.8. Propiedades de la geomalla MacGrid AR 5.7

Propiedad	Unidad	MacGrid AR 5.7
Resistencia mínima a la tracción en dirección longitudinal	kN/m	50
Deformación típica en la carga máxima en dirección longitudinal	%	2.5±1
Resistencia mínima a la tracción en dirección transversal	kN/m	50
Deformación típica en la carga máxima en dirección transversal	%	2.5±1
Módulo de Young	GPa	76
Punto de fusión	°C	1000
Masa por unidad	g/m ²	275
Dimensión de abertura de las mallas	mm	25x25
Ancho del rollo	m	Desde 2 hasta 5.3
Largo del rollo	m	100

Fuente: Maccaferri, 2011

En el Anexo F, se muestran las especificaciones técnicas brindadas por el proveedor de la geomalla a utilizar.

3.2. Metodología de aplicación del riego de liga asfáltico

Con el fin de efectuar la aplicación del riego de liga asfáltica más representativa de las condiciones en campo en los especímenes, se utilizó una pistola de pintura con un sistema de presión de aire regulado con un manómetro.

Para la aplicación del riego de liga asfáltica, se siguió el procedimiento recomendado por Solano (2016):

- Determinar el porcentaje de asfalto residual y la densidad de la emulsión asfáltica.
- Calibrar y ajustar la presión de aire de la pistola de pintura. Según las especificaciones del fabricante de la pistola, se recomienda utilizar una presión de aire entre 20psi y 30psi.
- Determinar el caudal que expulsa la pistola para la presión calibrada:
 - Llenar el envase de la pistola de pintura con agua para la calibración.
 - Pesar la cantidad inicial de agua.
 - Rociar agua en un intervalo de tiempo de 10s.
 - Pesar la cantidad final de agua y determinar la cantidad de agua expulsada.
 - Determinar el caudal por medio de la densidad del agua.
- Determinar la dosificación de emulsión asfáltica necesaria según la impregnación que requiera el geosintético.
- Determinar el área de aplicación y el tiempo de aplicación necesario para lograr la dosificación requerida.
- Realizar una aplicación uniforme y constante de la emulsión asfáltica durante el tiempo determinado en el paso anterior. La emulsión debe estar a una temperatura adecuada (usualmente 60°C). Deben evitarse los empozamientos.

3.2.1. Ejemplo del cálculo de la dosificación necesaria para el primer riego de liga en la interfaz capa asfáltica – geotextil utilizada en esta investigación

Como se observa en el Cuadro 3.6, el porcentaje de asfalto residual de la emulsión asfáltica utilizada en esta investigación es de 66,61% y su densidad es de 1009kg/m³.

El promedio de la cantidad de líquido (M) expulsada por la pistola de pintura a 22psi en 10s es de 23,54g (ver Cuadro 3.9). Debido a que la densidad de la emulsión asfáltica y la del agua son muy similares, se puede realizar el cálculo del volumen de líquido (V) que arroja la pistola con la densidad de la emulsión asfáltica (ρ).

Cuadro 3.9. Cantidad de agua expulsada por la pistola de pintura a 22psi en 10s

Número	Peso (g)
1	20.64
2	24.06
3	22.57
4	21.84
5	26.04
6	22.91
7	25.02
8	24.41
9	24.92
10	22.98
Promedio	23.54
Desviación	1.640

$$V_{EmulsiónAsfáltica} = M_{AguaExpulsada} * \rho_{EmulsiónAsfáltica}$$

$$V_{EmulsiónAsfáltica} = 0,02354kg * \frac{1 \text{ m}^3}{1009 \text{ kg}} * 1000 \frac{L}{\text{m}^3} = 0,02333L$$

Por lo tanto, el caudal de emulsión asfáltica (Q) que expulsa la pistola de pintura en un tiempo de aplicación (T) de 10s es:

$$Q_{EmulsiónAsfáltica} = \frac{V_{EmulsiónAsfáltica}}{T_{AplicaciónCalibración}}$$

$$Q_{EmulsiónAsfáltica} = \frac{0,02333L}{10s} = 0,002333L/s$$

Según Solano (2016), para los geotextiles MacTex N 27.1, la dosificación de ligante asfáltico residual (D) recomendada es de 1,0L/m² y el método de aplicación es una tasa fraccionada 70/30: una aplicación del 70% de la dosificación del ligante asfáltico residual previa a la colocación del geotextil y el restante 30% posterior a su instalación.

El área de los bloques donde se aplicó el riego de liga es de 0,258m² (60cm x 43cm).

El tiempo de aplicación del primer riego de liga necesario para lograr la dosificación de ligante asfáltico residual en toda el área de aplicación (A) es:

$$T_{AplicaciónNecesario} = \frac{D_{LiganteAsfáltico} * A_{Aplicación}}{Q_{EmulsiónAsfáltica}} * 0,7$$

$$T_{AplicaciónNecesario} = \frac{1,0L/m^2 * 0,258m^2}{0,002333L/s} * 0,7 = 116s$$

Por lo tanto, se debe realizar una aplicación uniforme y constante de emulsión asfáltica por 116s en toda el área de aplicación, para lograr la dosificación de ligante asfáltico óptima que permita el desempeño ideal de la interfaz.

3.3. Dosificación de ligante asfáltico residual

Para determinar la dosificación de ligante se siguieron las recomendaciones establecidas por Solano (2016). En el Cuadro 3.10, se muestran las dosificaciones de ligante asfáltico residual necesarias para el desempeño óptimo de la interfaz.

Cuadro 3.10. Dosificación de ligante asfáltico residual

Material en la interfaz	Ligante asfáltico (L/m²)	Metodología de aplicación
Geotextil MacTex N27.1	1,0	Tasa fraccionada 70/30
Geomalla MacGrid AR 5.7	0,4	Tasa total ⁴
Sin material geosintético	0,4	-

Fuente: Solano, 2016

3.4. Diseño de la compactación de mezcla asfáltica utilizando el rodillo vibratorio manual y el molde a escala real elaborado en el LanammeUCR

Uno de los objetivos de este trabajo final de graduación es verificar el diseño de la compactación de la mezcla asfáltica utilizando el rodillo vibratorio manual y el molde a escala

⁴ Aplicación de toda la dosificación de emulsión asfáltica previo a la instalación del material geosintético.

elaborado en el LanammeUCR, sin embargo, esto no fue posible debido a que el largo del rodillo del compactador (65cm) es mayor al ancho del molde elaborado en el LanammeUCR (43cm) (ver Figura 3.1). Estas diferencias en las dimensiones no permitieron establecer una relación entre el número de pasadas del compactador contra el porcentaje de vacíos en el espécimen, esto debido a que en el momento en que la mezcla asfáltica alcanza el nivel del molde, las pasadas adicionales del compactador no densifican más la mezcla asfáltica ya que éste entra en contacto con el molde, únicamente.



Figura 3.1. Dimensiones del rodillo compactador y del molde a escala elaborado en el LanammeUCR

En contra parte, al tener un volumen fijo, determinado por las dimensiones del molde, se procedió a determinar la cantidad de mezcla asfáltica necesaria para que al compactar la mezcla asfáltica a nivel del molde, el espécimen alcance el porcentaje de vacíos meta. Para ello, se realizaron dos paños de prueba con diferente cantidad de mezcla asfáltica, se determinó su porcentaje de vacíos y posteriormente, se determinó la cantidad de mezcla asfáltica necesaria para obtener un porcentaje de vacíos de 4% y 7% (ver Figura 3.2).

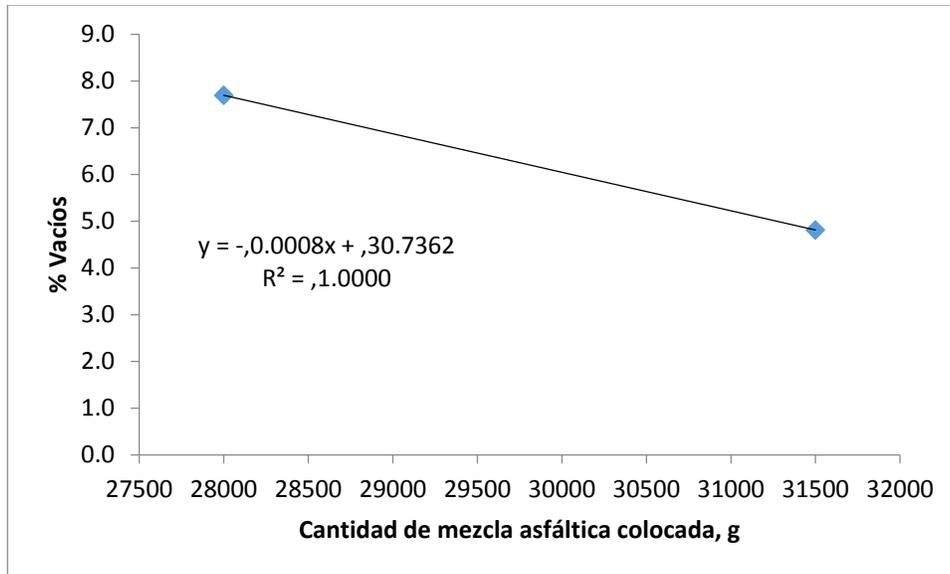


Figura 3.2. Porcentaje de vacíos contra cantidad de mezcla asfáltica colocada

Finalmente, se determinó que la cantidad de mezcla asfáltica necesaria para alcanzar un porcentaje de vacíos de 4% es de 32,5kg y para alcanzar el 7% de vacíos, la cantidad de mezcla asfáltica a colocar es de 29kg.

A manera de recomendación, se propone aumentar el ancho del molde a escala elaborado en el LanammeUCR, de manera que en futuras investigaciones sea posible establecer un patrón de compactación donde se relacione el número de pasadas del rodillo vibratorio manual y el porcentaje de vacíos. Este ancho debe ser de al menos 65cm de manera que el ancho del molde sea mayor al largo del rodillo del compactador y permita a este último estar en contacto permanente con la mezcla asfáltica y que el volumen compactado de la mezcla asfáltica no esté limitado por las dimensiones del molde, sino por el patrón de compactación establecido en los paños de prueba.

3.5. Ensayo a flexión

Las vigas elaboradas según la Sección 1.4.2 se ensayaron, siguiendo el montaje mostrado en la Figura 3.3 y la Figura 3.4, bajo una frecuencia haversiana de 10Hz (20km/h) y esfuerzo controlado con una carga que oscila entre 0,45kN y 9,0kN (ver Figura 3.5). El ensayo se ejecutó en un cuarto, en el LanammeUCR, con temperatura controlada de $21 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. La frecuencia seleccionada se obtuvo al correlacionar la frecuencia de carga establecida en la norma AASHTO T 321 - Método de ensayo para la determinación de la vida de fatiga de

mezclas asfálticas en caliente compactadas (MAC) sujetas a carga dinámica a flexo-compresión, con la profundidad de las vigas confeccionadas (15cm). Esto se realizó según lo establecido por Barksdale en 1971.

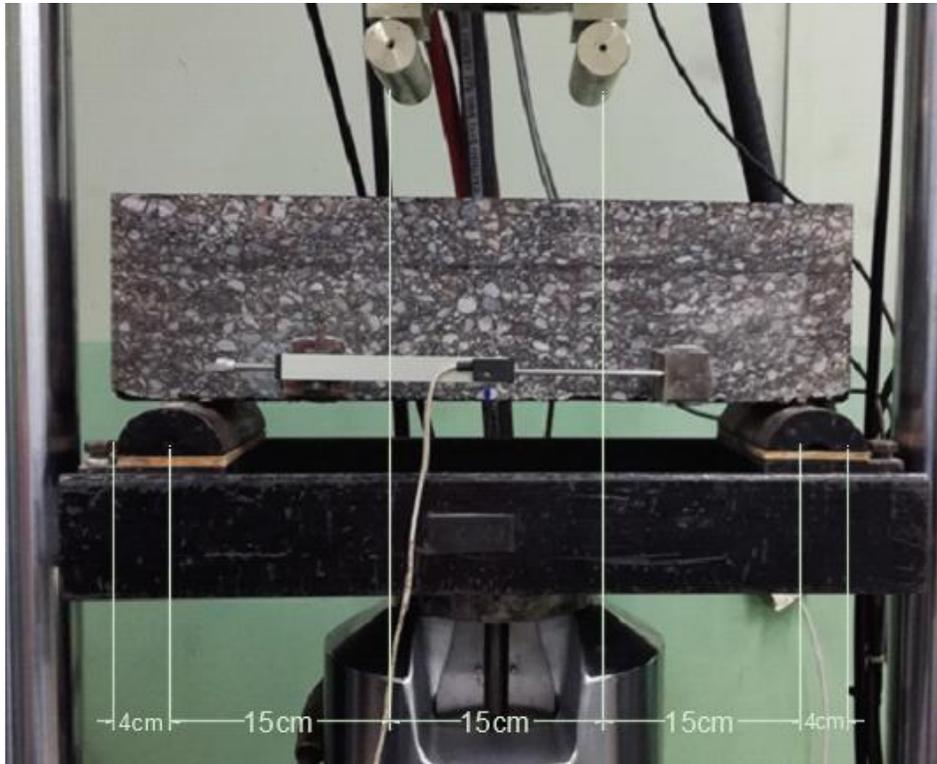


Figura 3.3. Montaje del ensayo a flexión: Cara frontal de la viga a ensayar

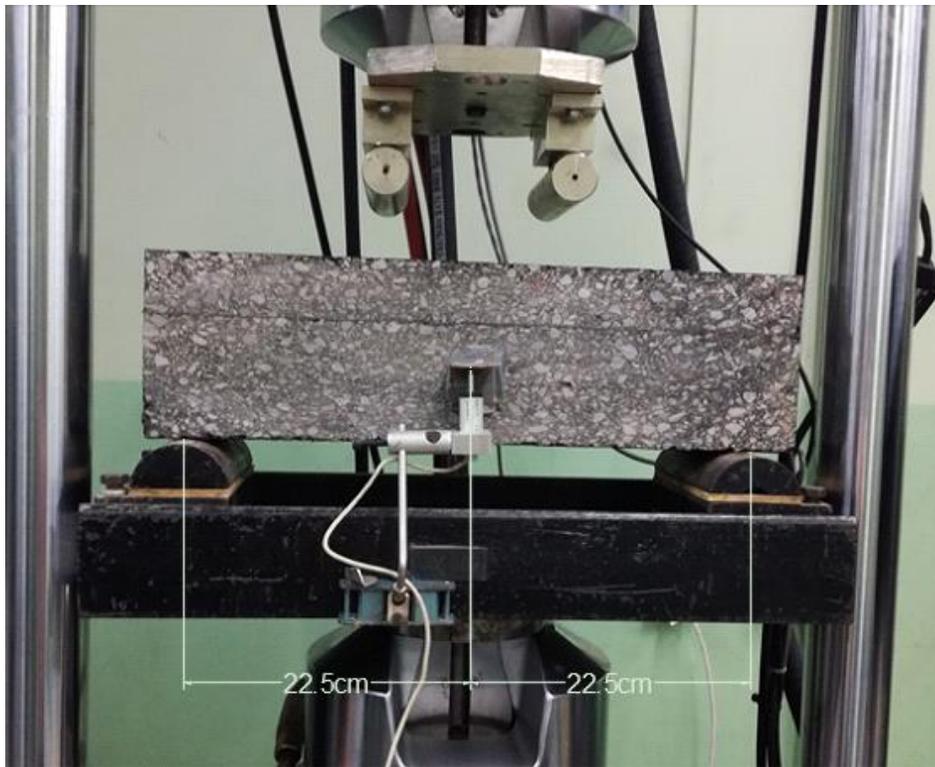


Figura 3.4. Montaje del ensayo a flexión: Cara posterior de la viga a ensayar

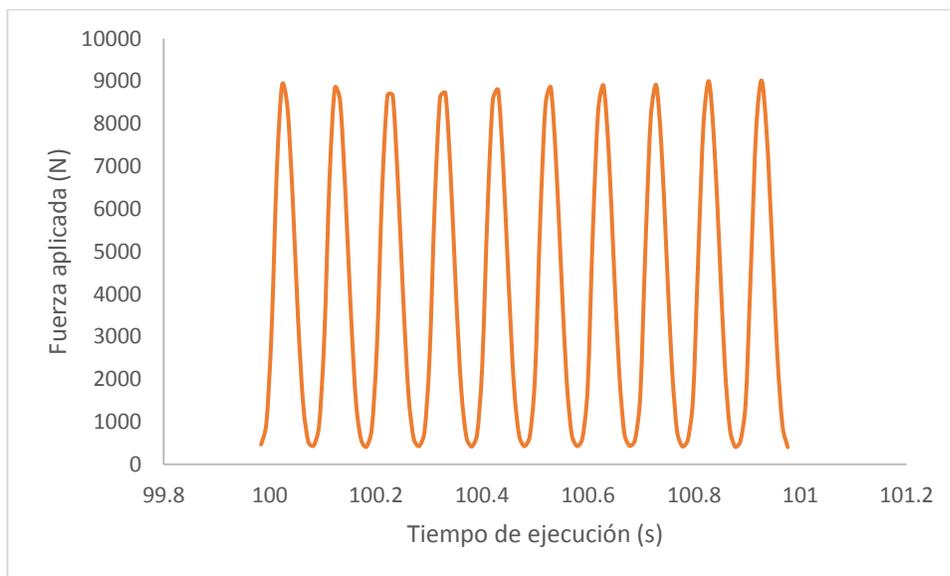


Figura 3.5. Ciclos de carga y descarga para una de las vigas ensayadas

Como se observa en la Figura 3.3, se instrumentó, mediante un LVDT (transformador eléctrico utilizado para medir desplazamientos lineales) de 25cm, la fibra extrema a tensión de la viga a ensayar. En la cara posterior, se registró el desplazamiento vertical mediante un LVDT de 10cm (ver Figura 3.4).

3.5.1. Nomenclatura de las vigas ensayadas

Por simplicidad, en este trabajo se utilizará la nomenclatura mostrada en el Cuadro 3.11 para referirse a las vigas ensayadas para el desarrollo de éste.

Cuadro 3.11. Nomenclatura de las vigas ensayadas

Viga	Nomenclatura
Viga 1 del espécimen de control	C1
Viga 2 del espécimen de control	C2
Viga 3 del espécimen de control	C3
Viga 1 del espécimen reforzado con geomalla a un tercio de su altura	G1
Viga 2 del espécimen reforzado con geomalla a un tercio de su altura	G2
Viga 3 del espécimen reforzado con geomalla a un tercio de su altura	G3
Viga 1 del espécimen reforzado con geotextil a un tercio de su altura	GxI-1
Viga 2 del espécimen reforzado con geotextil a un tercio de su altura	GxI-2
Viga 3 del espécimen reforzado con geotextil a un tercio de su altura	GxI-3
Viga 1 del espécimen reforzado con geotextil a dos tercios de su altura	GxII-1
Viga 2 del espécimen reforzado con geotextil a dos tercios de su altura	GxII-2

3.5.2. Especímenes ensayados

Las Figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 muestran los especímenes luego de ser ensayados.



Figura 3.6. Viga C1 luego de ser ensayada

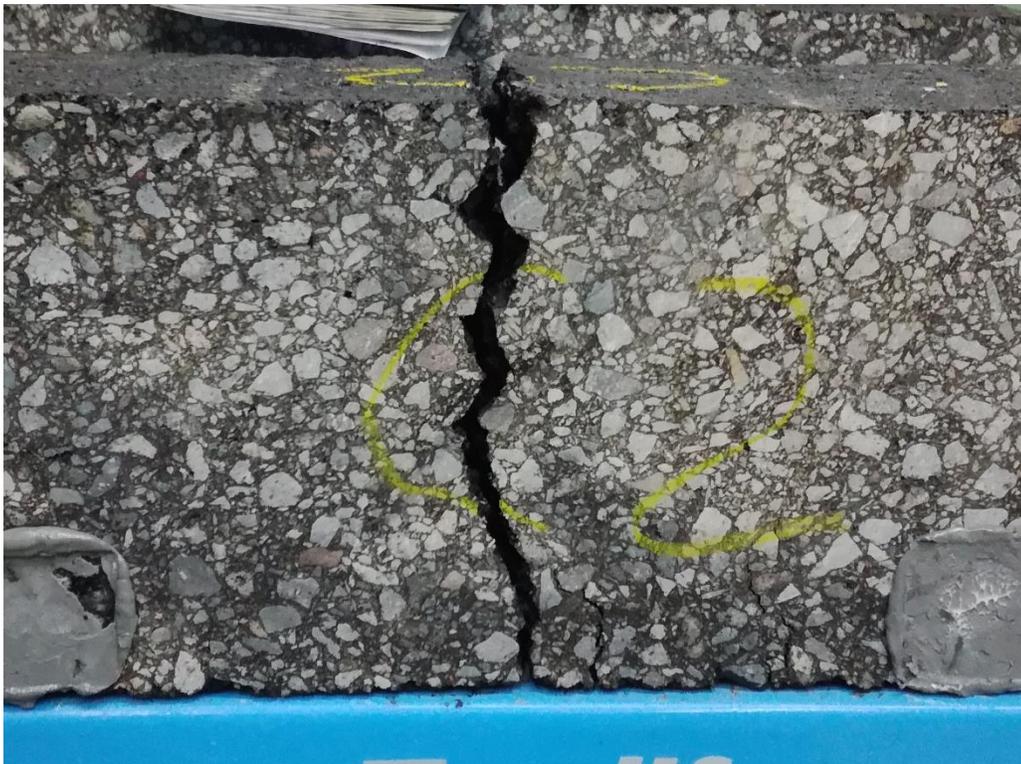


Figura 3.7. Viga C2 luego de ser ensayada



Figura 3.8. Viga C3 luego de ser ensayada



Figura 3.9. Viga Gx1-1 luego de ser ensayada



Figura 3.10. Viga GxI-2 luego de ser ensayada



Figura 3.11. Viga GxI-3 luego de ser ensayada



Figura 3.12. Viga G1 luego de ser ensayada



Figura 3.13. Viga G2 luego de ser ensayada



Figura 3.14. Viga G3 luego de ser ensayada



Figura 3.15. Viga GxII-1 luego de ser ensayada



Figura 3.16. Viga GxII-2 luego de ser ensayada

Según Lytton (1989), pueden distinguirse tres formas de falla en sobrecapas asfálticas:

- Forma I: La grieta en la capa existente se propaga a la sobrecapa en línea recta.
- Forma II: La grieta en la capa existente llega a la interfaz inferior con el geosintético y sigue propagándose paralelamente, de manera que se genera un plano de deslizamiento en esta localidad.
- Forma III: La grieta en la capa existente llega a la interfaz con el geosintético, luego inicia un nuevo proceso de agrietamiento en la superficie, que se propaga hacia el interior.

Si el material falla según las formas de falla I y III, el material geosintético funciona como alivio de esfuerzos. Por su parte, si el material falla según la forma de falla II, el material geosintético funciona como refuerzo a tensión.

Como se observa en la Figura 3.6, Figura 3.7 y Figura 3.8, los especímenes de control tienen un tipo de falla I. Las vigas 1 y 2 de los especímenes de control experimentan un pequeño desvío luego de que la grieta atraviesa la primera interfaz, esto se debe a la diferencia en la rigidez que existe entre la mezcla asfáltica de la primera capa asfáltica y la mezcla asfáltica

de la primera sobrecapa, lo anterior producto del envejecimiento realizado a la primera capa (ver Figura 3.6 y Figura 3.8).

En cuanto a las vigas de los especímenes reforzados con geotextiles y geomallas a un tercio de su altura, se observó que experimentaron una forma de falla II, por lo que el material geosintético actuó como refuerzo a tensión (ver Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12, Figura 3.13 y Figura 3.14). La viga GxI-1 experimentó problemas de adherencia, provocando que la grieta generada en la capa envejecida desligara completamente esta capa asfáltica de la sobrecapa y se generara una nueva grieta desde la interfaz que se proyectó a la superficie (ver Figura 3.9). La viga G3 experimentó el mismo problema que la viga GxI-1 (ver Figura 3.14).

Las vigas de los especímenes reforzados con geotextiles a dos tercios de su altura fallaron según la forma de falla I, por lo que se puede decir que el geotextil funcionó como alivio de esfuerzos (ver Figura 3.15 y Figura 3.16).

3.5.3. Análisis del aporte a la resistencia a fatiga del material geosintético según el enfoque de la energía disipada

Para realizar este análisis se establecieron seis escenarios de análisis: 10, 100, 500, 800, 1000 y 1200 ciclos de carga.

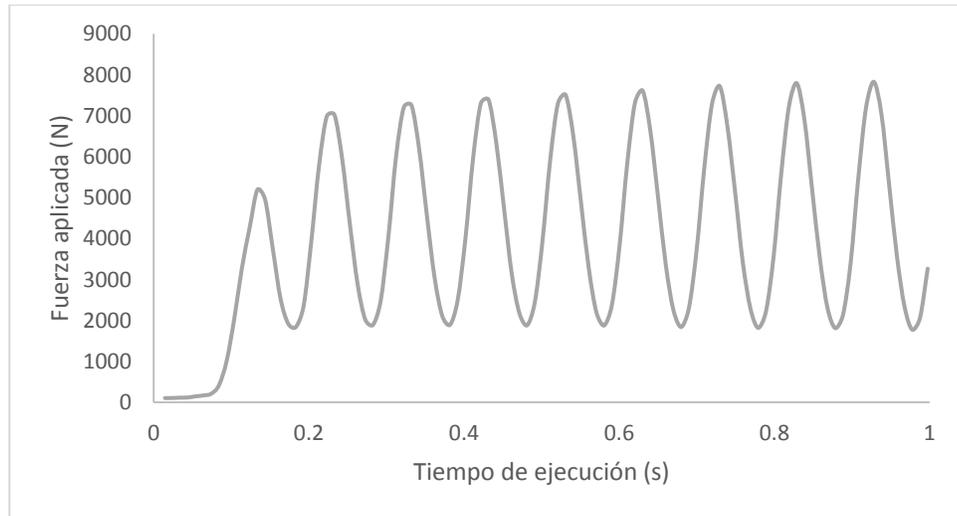
Los primeros dos escenarios de análisis se seleccionaron debido a que la máquina de carga utilizada para ensayar las vigas de esta investigación no aplica los ciclos de carga como los mostrados en la Figura 3.5 desde el primer ciclo de carga, sino que se calibra gradualmente hasta llegar a aplicar ciclos de carga y descarga de 450N a 9000N (ver Figura 3.17), por ello se establecieron estos escenarios de análisis para determinar si estas diferencias son estadísticamente significativas.

Los escenarios de 500 y 800 ciclos de carga se seleccionaron debido a que a la grieta le toma en promedio 60s (600 ciclos de carga) para alcanzar la primera interfaz (donde en algunos especímenes se colocaron geosintéticos de refuerzo), por lo tanto se propuso un escenario de análisis previo a que la grieta alcance la primera interfaz y uno posterior a ello, esto para analizar el aporte del geosintético a la disipación de energía.

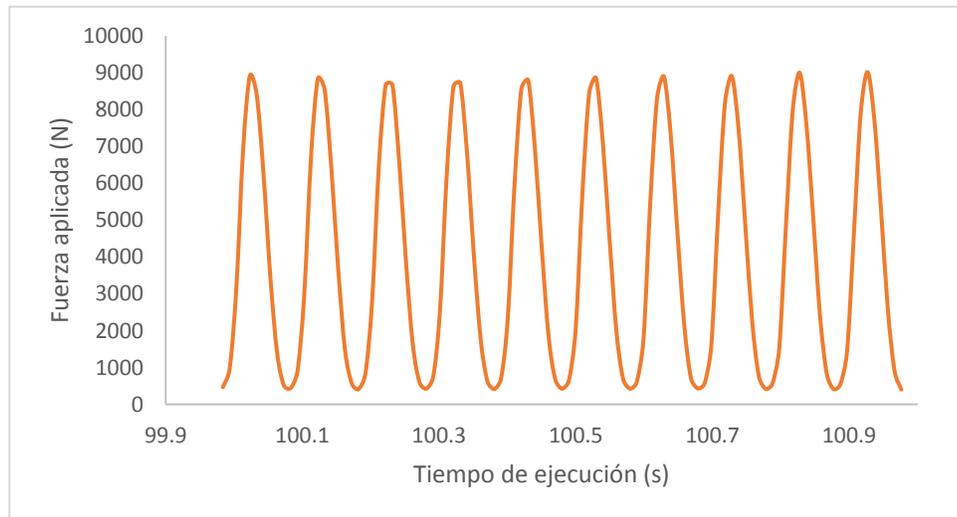
El escenario de análisis de 1000 ciclos de carga se seleccionó porque es el tiempo que le toma, en promedio, a la grieta alcanzar la segunda interfaz (donde para un espécimen se

colocó geotextil de refuerzo), esto para analizar el aporte del geosintético a la disipación de energía bajo esta configuración.

Finalmente, se estableció 1200 ciclos de carga como criterio de falla, esto debido a que la mayoría de las vigas fallan alrededor de esta cantidad de ciclos de falla.



(a)



(b)

Figura 3.17. Ciclos de carga y descarga, (a) al inicio del ensayo, (b) luego de 100s de ejecución del ensayo

Los Cuadros 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15, muestran la energía disipada acumulada en cada uno de los escenarios planteamos anteriormente.

Cuadro 3.12. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen de control en los distintos escenarios de carga

Ciclo	C1	C2	C3	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
10	0.8203	1.311	0.8725	1.001	0.2693	26.90
100	12.91	17.35	11.14	13.80	3.198	23.17
500	97.24	112.0	98.76	102.7	8.129	7.918
800	156.1	162.3	161.1	159.9	3.293	2.060
1000	202.5	203.8	211.9	206.1	5.116	2.483
1200	251.1	245.8	263.8	253.5	9.243	3.646

Cuadro 3.13. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geomalla a un tercio de su altura en los distintos escenarios de carga

Ciclo	G1	G2	G3	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
10	1.402	0.9046	1.344	1.217	0.2720	22.35
100	14.13	26.64	15.10	18.62	6.959	37.37
500	102.8	99.12	117.7	106.5	9.843	9.238
800	199.5	216.5	176.9	197.6	19.84	10.04
1000	263.4	274.6	230.1	256.0	23.16	9.047
1200	466.6	465.5	276.4	402.8	109.5	27.19

Cuadro 3.14. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geotextil a un tercio de su altura en los distintos escenarios de carga

Ciclo	GxI-1	GxI-2	GxI-3	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
10	1.124	1.635	0.2120	0.9901	0.7206	72.79
100	19.95	17.90	16.31	18.05	1.825	10.11
500	108.1	118.2	110.2	112.2	5.318	4.741
800	232.2	211.7	199.4	214.4	16.60	7.740
1000	313.9	262.2	237.4	271.2	39.06	14.40
1200	378.9	348.3	355.3	360.8	16.01	4.436

Cuadro 3.15. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geotextil a dos tercios de su altura en los distintos escenarios de carga

Ciclo	GxII-1	GxII-2	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación
10	1.071	0.9957	1.033	0.05337	5.164
100	11.46	18.73	15.10	5.138	34.03
500	94.74	114.5	104.6	13.96	13.35
800	158.9	145.8	152.4	9.266	6.081
1000	209.8	192.5	201.2	12.19	6.058
1200	261.6	244.4	253.0	12.19	4.817

En el desarrollo de este proyecto se identificaron problemas de adherencia en las vigas GxI-1 y G3 (ver Figura 3.9 y Figura 3.14, respectivamente). Estos problemas generaron valores atípicos que alteran el valor promedio de los datos e incrementan las diferencias existentes en los resultados para las vigas del mismo espécimen (variaciones dentro de los grupos del análisis de varianza que se desarrollará más adelante en esta sección) y esto puede alterar el resultado del análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés). Es por ello, que se decidió excluir estas vigas de los análisis de varianza. Además, como se muestra en el Cuadro 3.16 y Cuadro 3.17, los coeficientes de variación disminuyen considerablemente.

Cuadro 3.16. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geomalla a un tercio de su altura en los distintos escenarios de carga, luego de excluir la viga G3

Ciclo	G1	G2	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación
10	1.402	0.9046	1.153	0.3519	30.51
100	14.13	26.64	20.38	8.844	43.39
500	102.8	99.12	101.0	2.602	2.578
800	199.5	216.5	208.0	12.04	5.789
1000	263.4	274.6	269.0	7.903	2.938
1200	466.6	465.5	466.1	0.7863	0.169

Cuadro 3.17. Energía disipada acumulada por las vigas del espécimen reforzado con geotextil a un tercio de su altura en los distintos escenarios de carga, luego de excluir la viga GxI-1

Ciclo	GxI-2	GxI-3	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
10	1.635	0.2120	0.9233	1.006	108.9
100	17.90	16.31	17.11	1.130	6.604
500	118.2	110.2	114.2	5.638	4.937
800	211.7	199.4	205.5	8.669	4.218
1000	262.2	237.4	249.8	17.59	7.040
1200	348.3	355.3	351.8	4.942	1.405

De los Cuadros 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17, se puede notar que en los primeros 500 ciclos de carga, los coeficientes de variación son muy altos. Esto se debe a que, como se explicó anteriormente, la máquina de carga utilizada para ensayar las vigas de esta investigación se calibra gradualmente hasta llegar a aplicar ciclos de carga y descarga de 450N a 9000N.

Las Figuras 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23, muestran los rangos de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados en los diferentes escenarios de carga. En estas Figuras, las vigas de los especímenes reforzados con geotextil a un tercio de su altura se encuentran en la columna con el nombre "Geotextil 1/3H". Por su parte, las vigas de los especímenes reforzados con geotextil a dos tercios de su altura se encuentran en la columna con el nombre "Geotextil 2/3H".

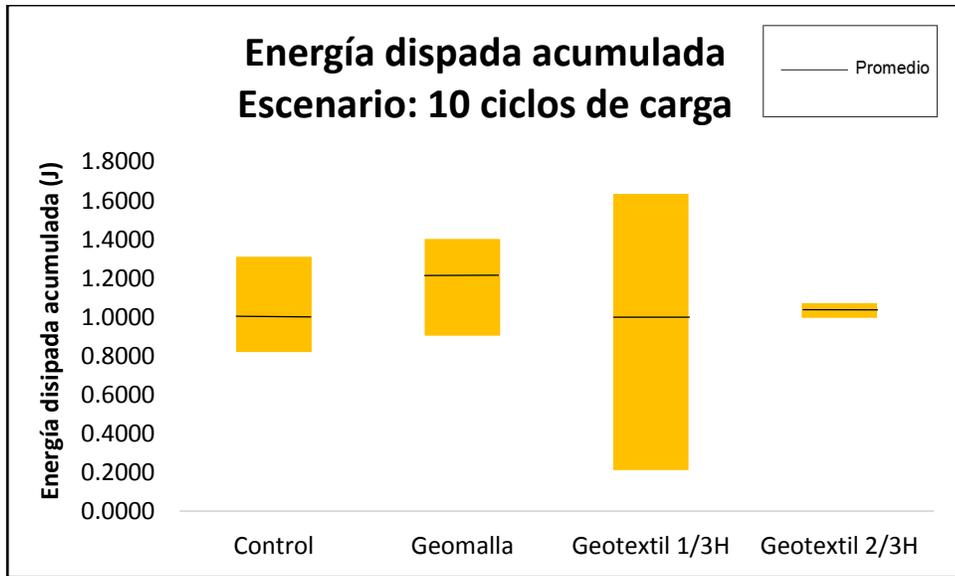


Figura 3.18. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 10 ciclos de carga

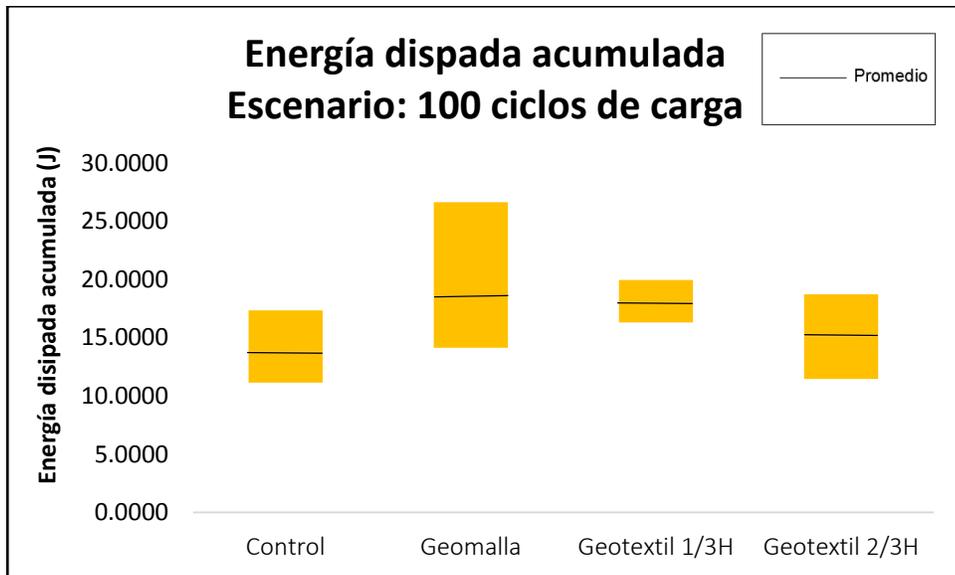


Figura 3.19. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 100 ciclos de carga

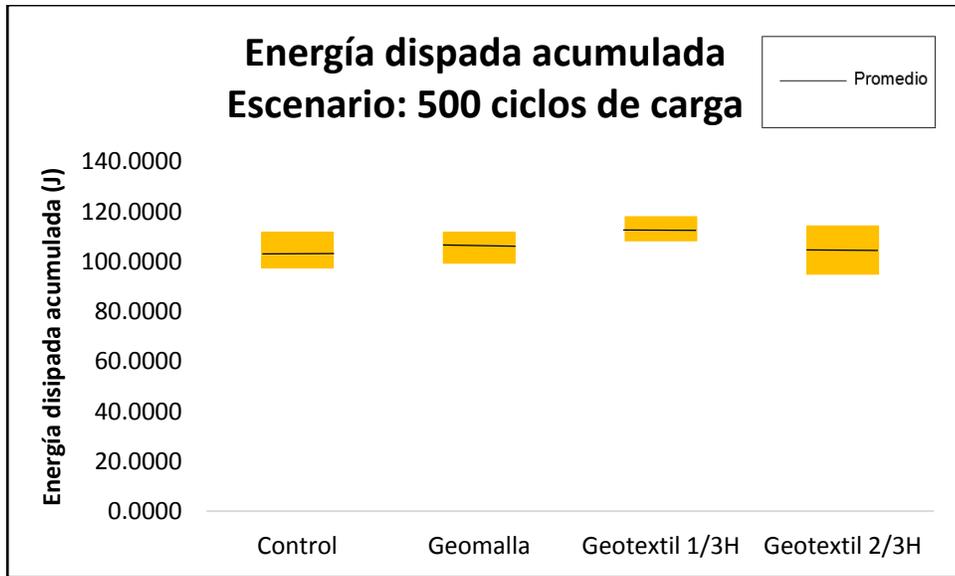


Figura 3.20. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 500 ciclos de carga

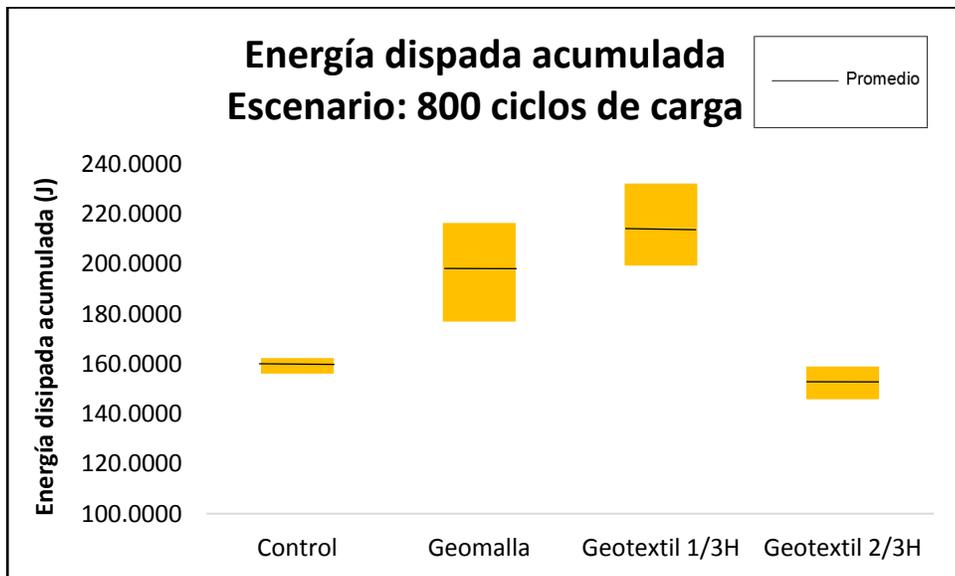


Figura 3.21. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 800 ciclos de carga

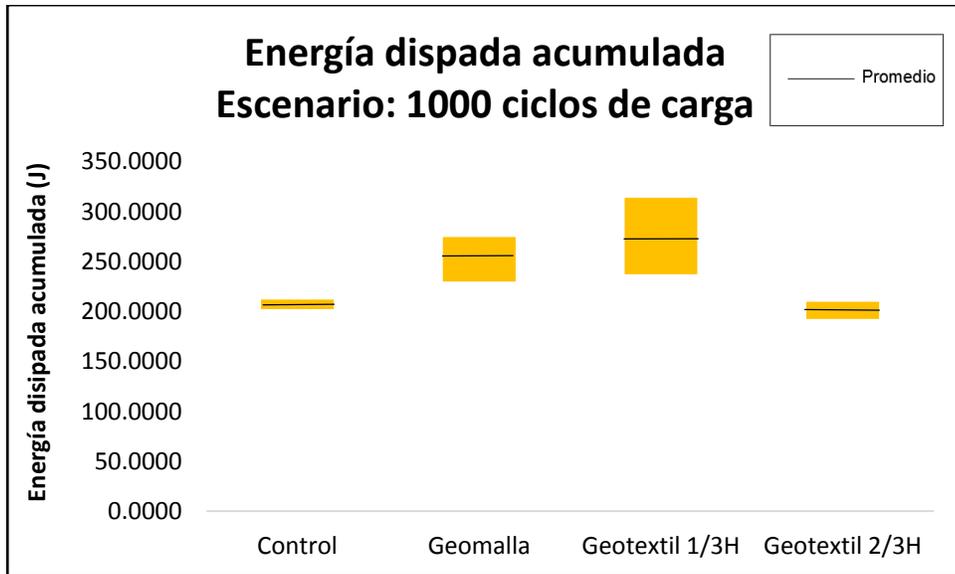


Figura 3.22. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 1000 ciclos de carga

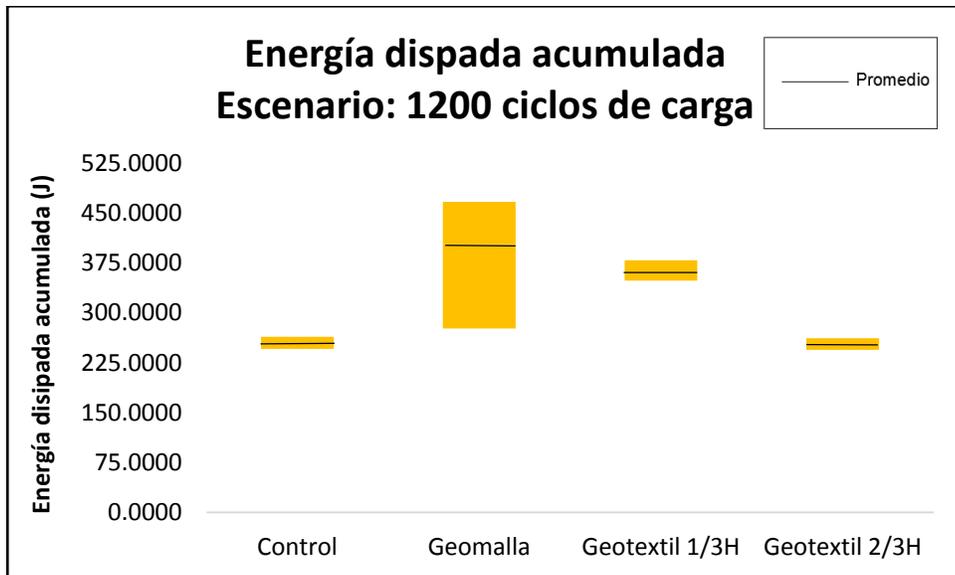


Figura 3.23. Rango de valores de energía disipada acumulada por las vigas de los especímenes ensayados. Escenario: 1200 ciclos de carga

Como se observa en las Figuras 3.18, 3.19 y 3.20, las vigas de todos los especímenes ensayados tienen una energía disipada acumulada promedio similar hasta el ciclo de carga 500. Es a partir de este momento, cuando los materiales geosintéticos colocados en la primera interfaz (geomalla y geotextil colocados a un tercio de la altura del espécimen) empiezan a funcionar en el sistema, aumentando la energía disipada de estos especímenes (ver Figura 3.21 y Figura 3.22).

Las vigas del espécimen reforzado con geomalla a un tercio de su altura fueron, en promedio, las que acumularon mayor energía disipada a lo largo de los 1200 ciclos de carga (ver Figura 3.23).

Para establecer si las diferencias mostradas en las Figuras 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23 son estadísticamente significativas, se procedió a realizar análisis de varianza entre las vigas de control y las vigas reforzadas con materiales geosintéticos.

Para los análisis de varianza se estableció la hipótesis nula (H_0): **“Los promedios de las poblaciones analizadas son iguales”**. Además, se estableció un nivel de confianza del 95%.

Los Cuadros 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 y 3.35, muestran los resultados de los análisis de varianza realizados.

- Análisis de varianza de un factor entre las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura

Cuadro 3.18. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 10 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	0.02782	1	0.02782	0.3104	0.6163	10.13
Dentro de los grupos	0.2689	3	0.08964			
Total	0.2967	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.19. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 100 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	52.00	1	52.00	1.581	0.2976	10.13
Dentro de los grupos	98.68	3	32.89			
Total	150.7	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.20. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 500 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	3.5186	1	3.519	0.07598	0.8007	10.13
Dentro de los grupos	138.9	3	46.31			
Total	142.5	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.21. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 800 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	2778	1	2778	50.02	0.005813	10.13
Dentro de los grupos	166.6	3	55.54			
Total	2945	4				

Resultado: Las diferencias en los promedios de las dos poblaciones son estadísticamente significativas, por lo cual se rechaza la hipótesis nula de identidad.

Cuadro 3.22. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 1000 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	4752	1	4752	124.2	0.001549	10.13
Dentro de los grupos	114.8	3	38.27			
Total	4867	4				

Resultado: Las diferencias en los promedios de las dos poblaciones son estadísticamente significativas, por lo cual se rechaza la hipótesis nula de identidad.

Cuadro 3.23. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura. Escenario: 1200 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	54205	1	54205	948.3	0.00007524	10.13
Dentro de los grupos	171.5	3	57.16			
Total	54376	4				

Resultado: Las diferencias en los promedios de las dos poblaciones son estadísticamente significativas, por lo cual se rechaza la hipótesis nula de identidad.

- Análisis de varianza de un factor entre las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura

Cuadro 3.24. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 10 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	0.007276	1	0.007276	0.01887	0.8995	10.13
Dentro de los grupos	1.157	3	0.3857			
Total	1.164	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.25. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 100 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	13.11	1	13.11	1.809	0.2712	10.13
Dentro de los grupos	21.73	3	7.244			
Total	34.84	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.26. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 500 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	159.6	1	159.6	2.920	0.1860	10.13
Dentro de los grupos	163.9	3	54.65			
Total	323.5	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.27. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 800 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	2505	1	2505	77.58	0.003084	10.13
Dentro de los grupos	96.85	3	32.28			
Total	2601	4				

Resultado: Las diferencias en los promedios de las dos poblaciones son estadísticamente significativas, por lo cual se rechaza la hipótesis nula de identidad.

Cuadro 3.28. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 1000 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	2294	1	2294	19.03	0.02227	10.13
Dentro de los grupos	361.7	3	120.6			
Total	2656	4				

Resultado: Las diferencias en los promedios de las dos poblaciones son estadísticamente significativas, por lo cual se rechaza la hipótesis nula de identidad.

Cuadro 3.29. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a un tercio de su altura. Escenario: 1200 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	11592	1	11592	178.1	0.0009097	10.13
Dentro de los grupos	195.3	3	65.10			
Total	11787	4				

Resultado: Las diferencias en los promedios de las dos poblaciones son estadísticamente significativas, por lo cual se rechaza la hipótesis nula de identidad.

- Análisis de varianza de un factor entre las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura

Cuadro 3.30. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura. Escenario: 10 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	0.001251	1	0.001251	0.02538	0.8835	10.13
Dentro de los grupos	0.1479	3	0.04931			
Total	0.1492	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.31. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura. Escenario: 100 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	2.015	1	2.015	0.1290	0.7432	10.13
Dentro de los grupos	46.85	3	15.62			
Total	48.87	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.32. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura. Escenario: 500 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	4.544	1	4.544	0.04167	0.8513	10.13
Dentro de los grupos	327.1	3	109.0			
Total	331.6	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.33. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil dos tercios de su altura. Escenario: 800 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	0.001251	1	0.001251	0.02538	0.8835	10.13
Dentro de los grupos	0.1479	3	0.04931			
Total	0.1492	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.34. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil dos tercios de su altura. Escenario: 1000 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	2.015	1	2.015	0.1290	0.7432	10.13
Dentro de los grupos	46.85	3	15.62			
Total	48.87	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

Cuadro 3.35. Análisis de varianza de un factor para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el promedio de las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura. Escenario: 1200 ciclos de carga

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	4.544	1	4.544	0.04167	0.8513	10.13
Dentro de los grupos	327.1	3	109.0			
Total	331.6	4				

Resultado: No existen diferencias estadísticamente significativas para suponer que los promedios de las dos poblaciones son diferentes.

De los Cuadros 3.18, 3.19, 3.20, 3.24, 3.25, 3.26, 3.30, 3.31 y 3.32, es posible notar que para los primeros 500 ciclos de carga no hay diferencias estadísticamente significativas en el promedio de los especímenes de control y de los especímenes reforzados con materiales geosintéticos, esto debido a que el ANOVA realizado determinó una probabilidad (P) mayor al nivel de significancia ($\alpha = 0,05$). Por ello, es posible afirmar que en los primeros 500 ciclos de carga, los materiales geosintéticos no brindan mayor aporte a la disipación de energía. Esto se debe a que la grieta no se ha proyectado a la interfaz donde actúa el material geosintético.

Los Cuadros 3.21, 3.22, 3.23, 3.27, 3.28 y 3.29, muestran como, para el caso de las vigas reforzadas con geomalla y geotextil a un tercio de su altura, el promedio de la energía

disipada acumulada por estas vigas cuentan con una diferencia estadísticamente significativa con relación a el promedio de la energía disipada acumulada por las vigas de control, esto debido a que el ANOVA realizado determinó una probabilidad menor al nivel de significancia. De lo anterior, es posible afirmar que las vigas reforzadas con geomalla y geotextiles a un tercio de su altura contribuyen de manera estadísticamente significativa a la resistencia a fatiga por reflejo de grietas, esto debido a que contribuyen a una mayor disipación de energía.

A diferencia de las vigas reforzadas con geomalla y geotextiles a un tercio de su altura, las vigas reforzadas con geotextiles a dos tercios de su altura no muestran diferencias estadísticamente significativas en el promedio de la energía disipada acumulada por estas vigas en relación con el promedio de la energía disipada acumulada por las vigas de control (ver Cuadro 3.33, Cuadro 3.34 y Cuadro 3.35), esto debido a que el ANOVA realizado determinó una probabilidad mayor al nivel de significancia. Al no existir diferencias estadísticamente significativas en la energía disipada acumulada por las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextiles a dos tercios de su altura, es posible afirmar que colocar geotextiles a dos tercios de la altura de la estructura de pavimento no contribuye de manera significativa a la resistencia a fatiga por reflejo de grietas.

En Cuadro 3.36, se muestra un resumen de los resultados obtenidos de los análisis de varianza realizados.

Cuadro 3.36. Resumen de los análisis de varianza de un factor realizados

Escenario	Control vs Geomalla	Control vs Geotextil 1/3H	Control vs Geotextil 2/3H
10 ciclos de carga	Hipótesis nula	Hipótesis nula	Hipótesis nula
100 ciclos de carga	Hipótesis nula	Hipótesis nula	Hipótesis nula
500 ciclos de carga	Hipótesis nula	Hipótesis nula	Hipótesis nula
800 ciclos de carga	Se rechaza la hipótesis nula	Se rechaza la hipótesis nula	Hipótesis nula
1000 ciclos de carga	Se rechaza la hipótesis nula	Se rechaza la hipótesis nula	Hipótesis nula
1200 ciclos de carga	Se rechaza la hipótesis nula	Se rechaza la hipótesis nula	Hipótesis nula

Las Figuras 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32, 3.33 y 3.34, muestran la razón de cambio en la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para las vigas de los especímenes ensayados en esta investigación.

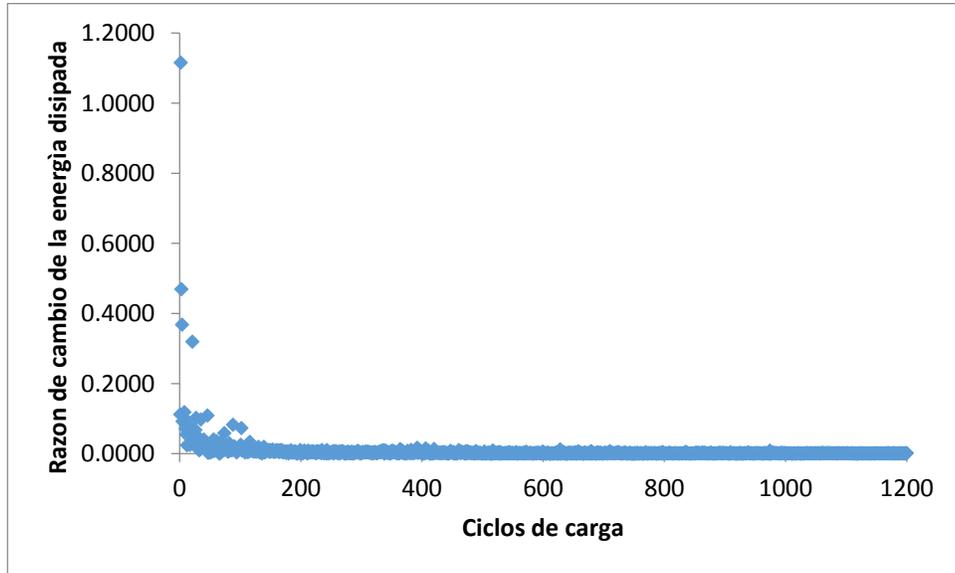


Figura 3.24. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga C1

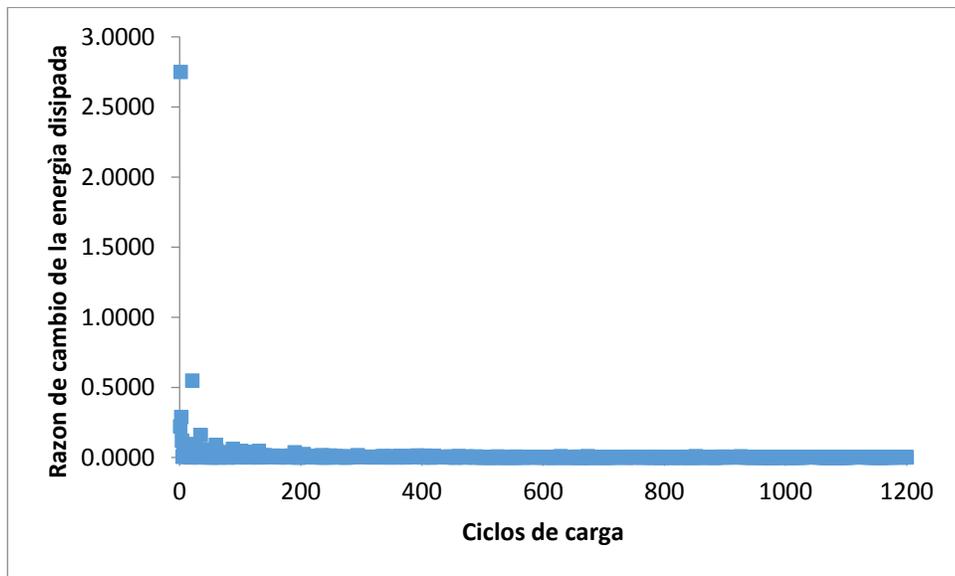


Figura 3.25. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga C2

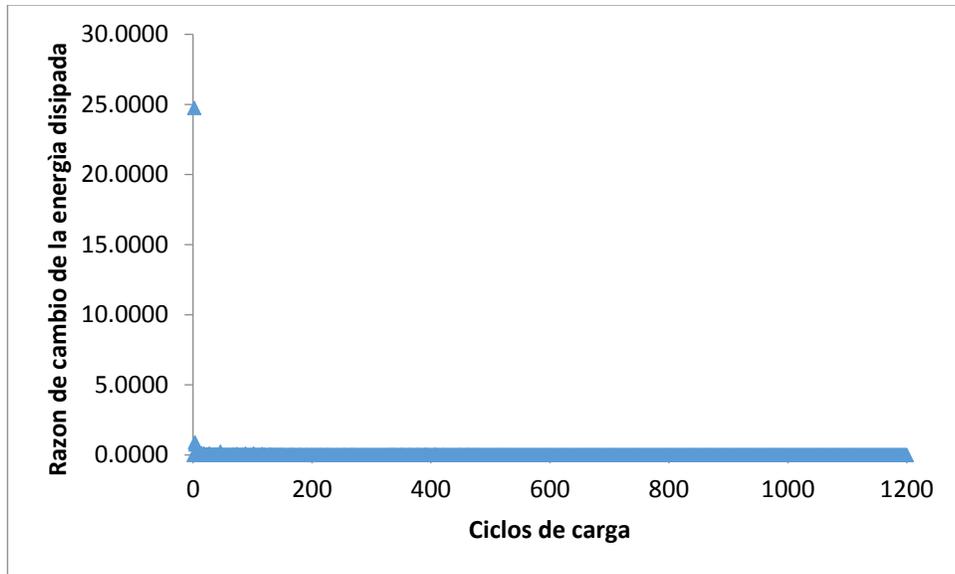


Figura 3.26. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga C3

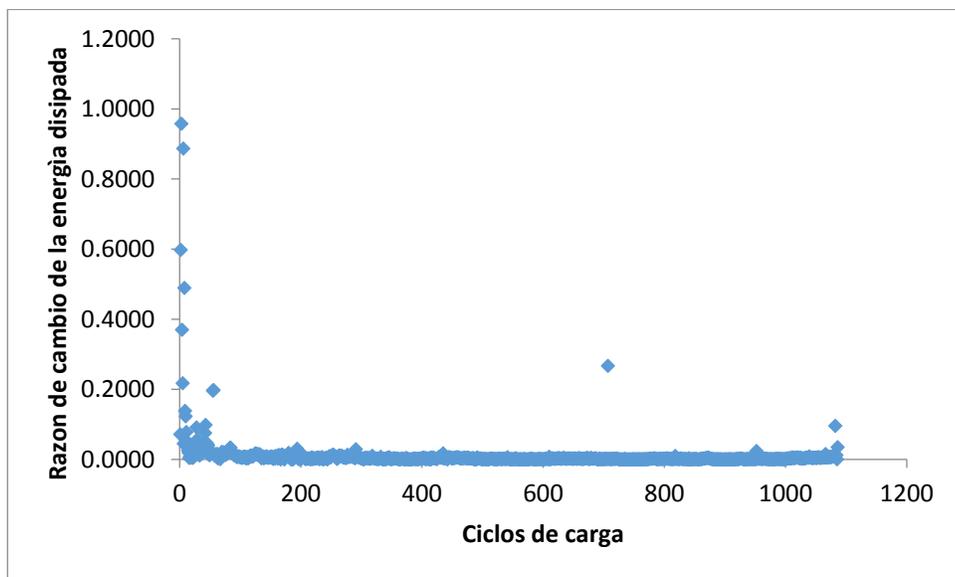


Figura 3.27. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga G1

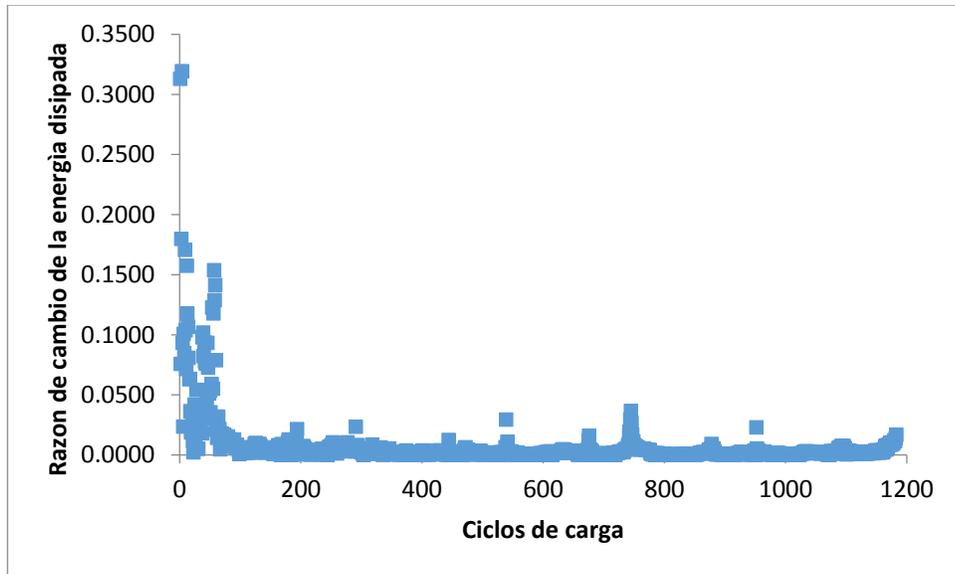


Figura 3.28. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga G2

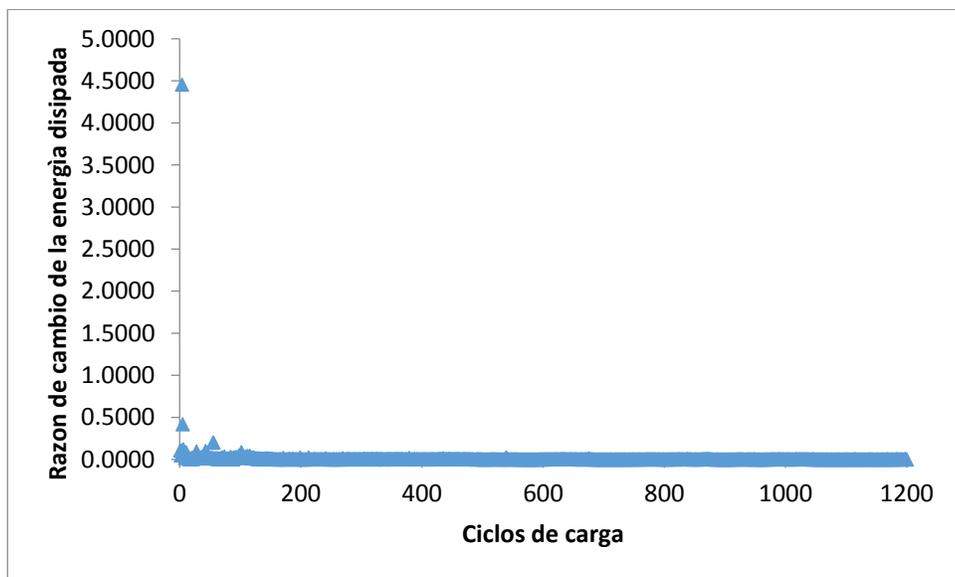


Figura 3.29. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga G3

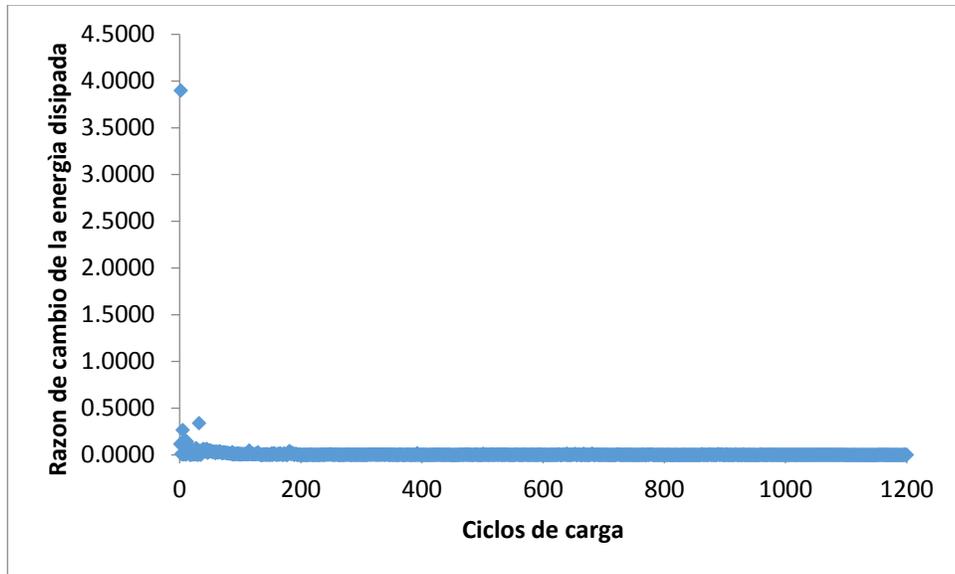


Figura 3.30. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga GxI-1

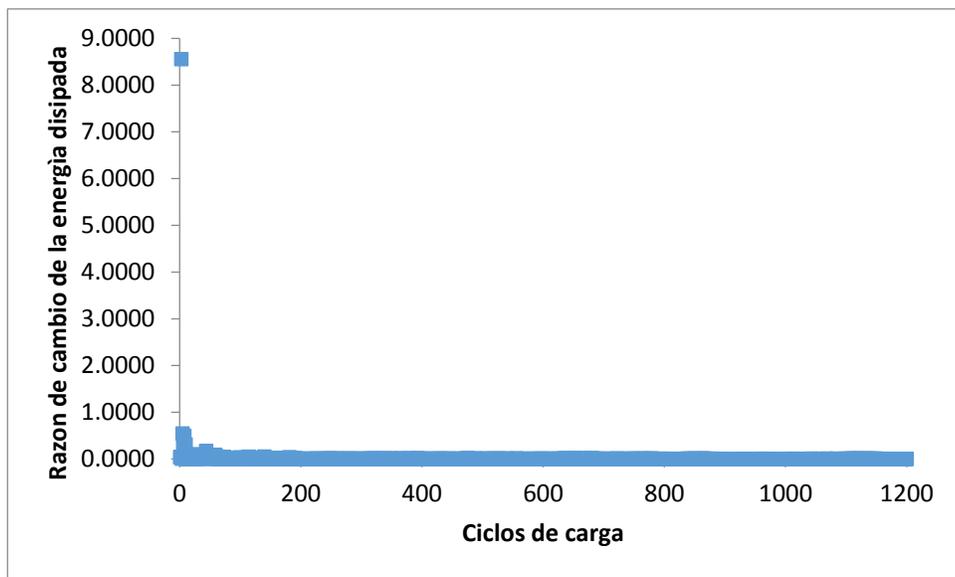


Figura 3.31. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga GxI-2

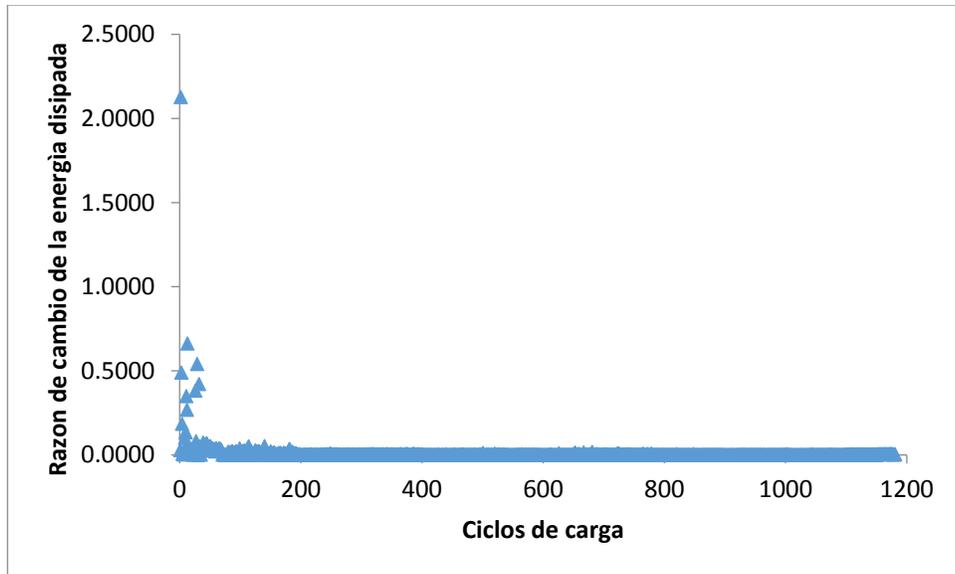


Figura 3.32. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga GxI-3

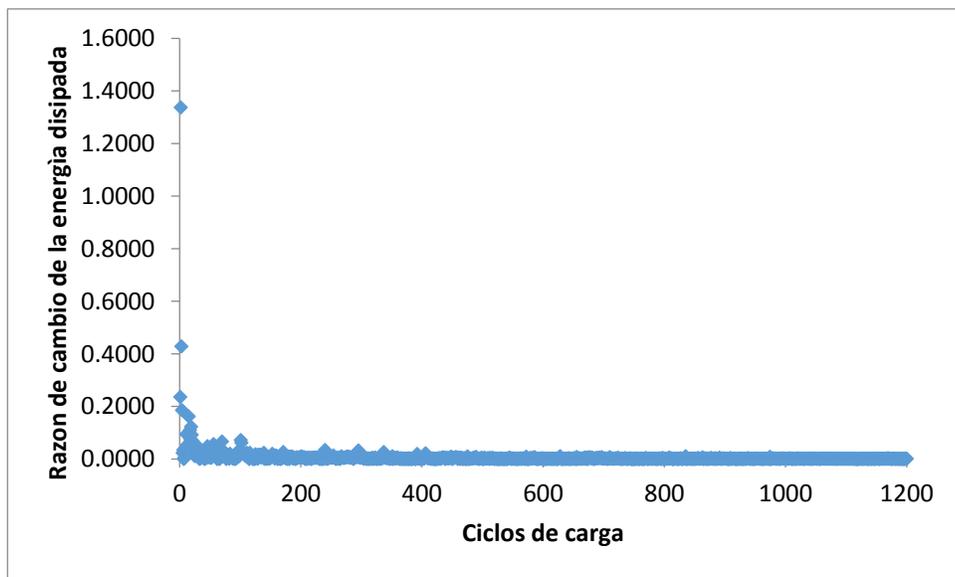


Figura 3.33. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga GxII-1

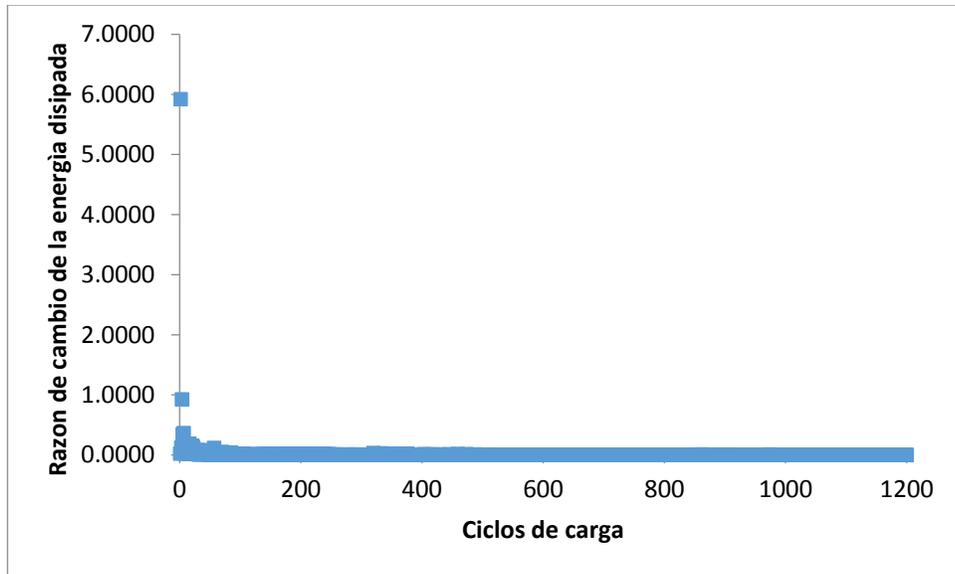


Figura 3.34. Razón de cambio de la energía disipada a lo largo de los ciclos de carga para la viga Gx11-2

Las Figuras 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32, 3.33 y 3.34, muestran un comportamiento similar al expuesto por Carpenter en 2003 (ver Figura 2.3). Donde, inicialmente, las vigas tienen una razón de cambio de la energía disipada que desciende producto de un reajuste microestructural a lo interno de las vigas ensayadas. Posteriormente, la razón de cambio de la energía disipada se mantiene constante en un valor muy cercano a cero, este valor se conoce como *Plateau Value*. Sin embargo, el ascenso final en la razón de cambio de la energía disipada que caracteriza la falla por fatiga en el material, únicamente se observa en las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura (ver Figura 3.27 y Figura 3.28).

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

Con los resultados obtenidos en esta investigación, se establecen las siguientes conclusiones y recomendaciones sobre el uso de materiales geosintéticos como sistema intercapa en trabajos de rehabilitación de pavimentos de concreto asfáltico.

4.1. Conclusiones

Fase de revisión bibliográfica

- Los geotextiles, las geomallas y los geocompuestos son los materiales recomendados para uso como sistema intercapa en la rehabilitación de pavimentos con sobrecapas asfálticas.
- Los mecanismos desarrollados por los materiales geosintéticos en sobrecapas asfálticas son: refuerzo, principalmente en el caso de las geomallas y geocompuestos, y alivio de esfuerzos. Los geotextiles y geocompuestos también cumplen la función de crear una barrera impermeable en la intercapa.
- En Costa Rica, el material geosintético de mayor uso es la geomalla biaxial de fibra de vidrio de 50kN/m de resistencia a la tracción. Su uso se ha implementado para disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa.
- **Para pavimentos con deterioros tipo "cuero de lagarto" debido a fatiga**, no se recomienda el uso de materiales geosintéticos como sistema intercapa, esto debido a que este tipo de deterioros requiere intervenciones mayores a la colocación de una sobrecapa.
- **Para pavimentos con deterioros tipo "cuero de lagarto" debido a oxidación** de la mezcla asfáltica, la efectividad de los materiales geosintéticos (geotextiles, esferas, geomallas y geocompuestos) es muy buena.
- Para pavimentos con agrietamientos en bloque, longitudinales o transversales (no térmicos), los materiales geosintéticos (geotextiles, geomallas y geocompuestos), tienen una efectividad muy buena. Es recomendable efectuar un sellado de grietas cuando éstas superan los 12mm de espesor.

- Se evidenció que el país carece de una metodología constructiva y de diseño clara para llevar a cabo la técnica de sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos.

De la fase experimental

- No fue posible establecer un patrón de compactación utilizando el rodillo vibratorio manual y el molde a escala real elaborado en el LanammeUCR, esto debido a que el ancho del rodillo del compactador es mayor al ancho del molde y al momento en que el rodillo del compactador entra en contacto con el molde, el espécimen no se compacta más, sin importar el número de pasadas adicionales.
- Para la fabricación de todos los especímenes, se utilizó el mismo diseño de mezcla asfáltica y se empleó la misma emulsión asfáltica, por lo tanto, estos parámetros se mantuvieron constantes y no afectaron los resultados obtenidos.
- La emulsión asfáltica utilizada fue la CRS-1 de RECOPE, la cual es representativa para el tipo de material empleado como riego de liga en sobrecapas asfálticas. De igual manera, los materiales geosintéticos empleados para el desarrollo de este trabajo de investigación presentan características similares a los utilizados en los trabajos de rehabilitación en Costa Rica. La mezcla asfáltica utilizada fue brindada por Pavicen Ltda, por lo que también es representativa de la mezcla asfáltica utilizada en Costa Rica.
- La propagación del agrietamiento en las vigas de control y las vigas reforzadas con geotextil a dos tercios de su altura, presentan una forma de falla I.
- La propagación del agrietamiento en vigas reforzadas con geomalla y geotextil a un tercio de su altura, presentan una forma de falla II: la grieta en la capa existente llega a la interfaz inferior con geosintético y sigue propagándose paralelamente a este, por lo que el material geosintético funciona como refuerzo a tensión.
- Las vigas reforzadas con geomalla a un tercio de su altura son las que acumularon, en promedio, mayor energía disipada al cabo de los 1200 ciclos de carga.
- Para los primeros 500 ciclos de carga, las vigas de los especímenes reforzados con materiales geosintéticos no presentan diferencias estadísticamente significativas en

cuanto al promedio de la energía disipada acumulada con respecto a las vigas de control.

- Las vigas de los especímenes reforzados con geomalla y geotextil a un tercio de su altura presentan diferencias estadísticamente significativas en cuanto al promedio de la energía disipada, en los escenarios: 800, 1000 y 1200 ciclos de carga, con respecto a las vigas de control. Por lo tanto, los materiales geosintéticos bajo esta configuración tiene un aporte estadísticamente significativo a la resistencia a fatiga por reflejo de grietas.
- Las vigas de los especímenes reforzados con geotextil a dos tercios de su altura no presentan diferencias estadísticamente significativas en cuanto al promedio de la energía disipada, en ninguno de los escenarios de carga, con respecto a las vigas de control. Por lo tanto, reforzar la estructura asfáltica con geotextiles a dos tercios de su altura no contribuye a la resistencia a fatiga por reflejo de grietas.
- Las curvas de la razón de cambio de la energía disipada de las vigas ensayadas a lo largo de los ciclos de carga, tienen un comportamiento similar al establecido por el enfoque de la energía disipada de la mecánica de la fractura.
- El concepto de la energía disipada puede ser utilizado para analizar el reflejo de grietas en sistemas de sobrecapa asfáltica con geosintéticos como sistema intercapa.

4.2. Recomendaciones

- Continuar con la recopilación de información sobre el uso de materiales geosintéticos en el país y estudiar la durabilidad y eficiencia de las intervenciones que ya han sido recopiladas en este trabajo de investigación.
- Indagar sobre el uso de geotextiles en Costa Rica. Para este trabajo de investigación no fue posible obtener esta información, a pesar de que ésta fue solicitada al CONAVI.
- Adaptar y calibrar los factores de eficiencia del material geosintético para los materiales geosintéticos disponibles en el mercado nacional.
- Realizar un estudio paramétrico de carga y frecuencia para observar con mayor detalle el desempeño mecánico de las vigas reforzadas con materiales geosintéticos.

- Modificar las dimensiones de la rampa, de manera que sea posible establecer un patrón de compactación de acuerdo al número de pasadas del rodillo compactador.
- Se recomienda para futuras investigaciones realizar un apoyo inferior completo del espécimen para representar el aporte del paquete estructural inferior del pavimento.
- Extender el análisis al uso de geocompuestos y esferas.
- Realizar muestreos en campo de sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos, para poder correlacionar los resultados obtenidos en laboratorio con los resultados extraídos de campo.
- Desarrollar metodologías estándar en Costa Rica para el diseño y construcción de sobrecapas asfálticas reforzadas con materiales geosintéticos, para garantizar la correcta función de la técnica.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2010). *AASHTO TP 62 PP62 - Método de ensayo para la determinación del módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente (Curva Maestra)*. AASHTO.
- AASHTO M288-06. (n.d.). *Geotextile Specification for Highway Applications*. Designación AASHTO.
- AASHTO T 321 IT-ED-06. (2006). *Método de ensayo para la determinación de la vida a fatiga de mezclas asfálticas en caliente compactadas (MAC) sujetas a carga dinámica a flexo-compresión*. Designación AASHTO.
- American Society for testing and Materials (ASTM). (2011). *Normas referentes a geosintéticos*.
- ASTM C78/C78M. (2013). *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam third-point loading)*.
- Berg, R. (2000). *Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures*. Rseville, CA, USA: Geosynthetic Materials Association.
- CACISA. (2016). *Informe de ensayo INF. 5340-2016*. San Antonio, Alajuela.
- CACISA. (2017). *Informe de ensayo INF.LCP-152-2017*. San Antonio de Alajuela, Costa Rica.
- Chavarrría Salas, P. (2005). *Desarrollo de modelos de agrietamiento por fatiga para el concreto asfáltico en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- Consejo Nacional de Vialidad. (2009). *Licitación Pública Nacional 2009 LN-000003-CV*. Proyectos de Conservación Vial de la Red Vial Nacional Pavimentada.
- Consejo Nacional de Vialidad. (2014). *Contratación Directa Autorizada 2014 CD-000140-OCV00*. Proyectos de Conservación Vial de la Red Vial Nacional Pavimentada.
- Consejo Nacional de Vialidad. (2014). *Licitación Pública Nacional 2014 LN-000018-OCV00*. Proyectos de Conservación Vial de la Red Vial Nacional Pavimentada.

- Dumas, P. &. (1993). *Processes reducing reflective cracking: synthesis of laboratory test*. RILEM PROCEEDINGS , 246-250.
- Gaceta, L. (1998). *Ley 7798 Creación del Consejo de Vialidad (CONAVI)*. La Gaceta No.103.
- Geomatrix. (n.d.). *Conceptos Básicos y Guía de Diseño para el Refuerzo y Control de Agrietamientos de Capas Asfálticas con Geosintéticos*. Bogotá, Colombia.
- Grzybowska, W. W. (1993). *Application of Geosynthetics to Overlays in Cracow Region of Poland. Reflective Cracking in Pavements. State of Art and Design Recommendations*. Proceedings of the Second International RILEM Conference, Liege, Belgium, 290-298.
- Instituto del asfalto. (2010). *Manual Básico de Emulsiones Asfálticas*. Lexington, Kentucky.
- Khodaii, A., & Fallah, S. (2009). *Effects of Geosynthetic Reinforcement on the Propagation of Reflection Cracking in Asphalt Overlays* (Vol. 7). Journal of Civil Engineering.
- Koerner, R. (2005). *Designing with geosynthetics*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education.
- La Gaceta. (30 de abril de 1998). *Ley 7798 Creación del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI)*. La Gaceta No. 103.
- Leiva Padilla, 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. (2016). *Utilización de geosintéticos en pavimentos como estrategia contra el reflejo de grietas*. San José, Costa Rica: Trabajo Final de Graduación para obtener el grado de maestría académica en Ingeniería del Transporte y Vías de la Universidad de Costa Rica.
- Leiva, P. (2017). *Sistemas intercapa para retardo del reflejo de grietas*. San José: LanammeUCR.
- Livneh, M. I. (1993). *Bituminous Pre-Coated Geotextile Felts for Retarding Reflection Cracks. Reflective Cracking in Pavements, State of the Art and Design Recommendations*. Proceedings of the Second International RILEM Conference, Liege, Belgium, 343-350.
- López, J., & Torres, J.A. (2011). *Principios básicos de la propagación de la fractura por fatiga y estimación de los factores de intensidad de esfuerzos en placas de acrílico*

- fracturadas utilizando simulación numérica con validación experimental.* Cartagena, Colombia: Universidad Tecnológica de Bolivia.
- Loría Salazar, L. G., & Elizondo Arrieta, F. (2010). *Diseño de sobrecapas asfálticas anti-reflejo de grietas calibradas para Costa Rica.* San José, Costa Rica.
- Loría, G. (2008). *Reflective Cracking of Flexible Pavements: Literature, Review, Analysis Models and Testing Methods.* Reno, Nevada: ProQuest Information and Learning Company.
- Lugmayr, R., Jamek, M., & Tschegg, E. (2012). *Fatigue crack propagation in bituminous roads with geosynthetic interlayer.* Austria.
- Maccaferri. (2011). *Especificación técnica Rev. 12 MACGRID® AR gama .7 Geogrillas y geocompuestos para aplicaciones de refuerzo de asfalto.*
- Maccaferri. (2014). *Especificación técnica Rev. 00 MacTex®N Geotextil Notejido en Polipropileno.*
- Maccaferri. (2014). *Especificación técnica Rev. 01 MacTex®N Geotextil Notejido en Polipropileno.*
- MACCAFERRI. (n.d.). *Manual técnico de criterios generales para proyecto, especificación y aplicación de geosintéticos.* San Pablo, Brasil.
- Naranjo Ureña, R. (2003). *Revisión de las consideraciones básicas del diseño actual de pavimentos flexibles con refuerzo geosintético.* San José, Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- Navas Carro, A. (2013). *Notas del curso: Materiales de construcción.* San José, Costa Rica.
- PITRA, LanammeUCR. (2015). *INF-PITRA-001-2015. Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica, años 2014-2015 (pp. 24-32).* San José, Costa Rica.
- Prieto, J. G. (2007). *Application of the wheel reflective cracking test for assessing geosynthetics in anti-reflection pavement cracking systems.* Geosynthetics International, 14(5) , págs. 287-297.

- Rivera Sánchez, S. (2006). *Ampliación y reconstrucción de la carretera federal México-Puebla de la ciudad de Cholula a Santa María Zacatepec, km. 98+300 al km. 103+300*. Puebla, México: Tesis profesional como requisito para obtener el título en Licenciatura en Ingeniería Civil.
- Rodríguez, J. (2012). *Plan de inversión a nivel estratégico en pavimentos flexibles de la Red Vial Nacional*. San José, Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- Sheng, S., & Carpenter, S. (2005). *Application of the dissipated energy concept in fatigue endurance*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1929.
- Sobhan, T. C. (2004). *Laboratory Simulation of the Growth and Propagation of Reflection Cracks in GEogrid Reinforced Asphalt Overlays. Cracking in Pavements, Mitigation, Risk Assessment and Prevention*. Proceedings of the Fifth International RILEM Conference, Lomoges, France , 589-596.
- Solano Rodríguez, M. (2016). *Estimación de la dosificación apropiada de ligante asfáltico en la rehabilitación de pavimentos flexibles con el 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.
- Solórzano, S., Salas, M., Sequeira, W., & Loría, L.G. (2015). *Guía para inspectores: Colocación de sobrecapas asfálticas*. San José, Costa Rica: UCTT.
- Tamagny, P. W. (2004). *A New Explanation of Pavement Cracking from Top to Bottom: The Visco-elasticity of Asphalt Materials. Cracking in Pavements, Mitigation, Risk Assessment and Prevention*. Proceedings of the Fifth International RILEM Conference, Lomoges, France , 425-432.
- Tschegg, E. S.-T. (1993). *New Testing Method to Characterize Mode 1 Fracturing of Asphalt Aggregate Mixtures. Reflective Cracking in Pavements, State of the Art and Design Recommendations*. Proceedings of the Second International RILEM Conference, Liege, Belgium , 263-270.
- Ulloa, A. (2015). *Emulsiones Asfálticas Aplicaciones*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Uzan, J. (1997). *Evaluación del reflejo de grietas*. Transportation Research Record 1570, TRB, National Research Council. Washington, D.C, pp 89-95.

Vera, J. (2012). *Caracterización de mezclas asfálticas por su resistencia a fatiga por reflexión*. Bogotá D.C.: Trabajo de Grado: Pontificia Universidad Javeriana Bogotá.

Anexos

Anexo A. Registro histórico del uso de materiales geosintéticos como sistema intercapa en Costa Rica

Proyecto	Año de la intervención	Ruta Nacional	Secciones de control	Cantidad intervenida (m²)	Precio unitario (€/m²)	Costo (€)	Material geosintético utilizado	Contratista	Justificación
Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 22, Zona 1-1, San José. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°2	2011	2	19001, 19004, 19005	28900	2,756.79	79,671,231.00	Geomalla de fibra de vidrio R-50 Pavco	Constructora Hernán Solís S.R.L.	Disminuir el reflejo de las grietas y juntas de las losas de concreto en la sobrecapa
Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 22, Zona 1-1, San José. Contratación Directa Autorizada N°2014CD-000140-0CV00, Orden de Servicio N°4	2015	2	19001, 19004, 19006	15500	2,756.79	42,730,245.00	Geomalla de fibra de vidrio R-50 Pavco	Constructora Hernán Solís S.R.L.	Disminuir el reflejo de las grietas y juntas de las losas de concreto en la sobrecapa
Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 21, Zona 1-2, Puriscal. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°3	2014	10203	19302	10500	2,756.79	28,946,295.00	Geomalla de fibra de vidrio R-50 Pavco	Constructora Hernán Solís S.R.L.	Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa

Proyecto	Año de la intervención	Ruta Nacional	Secciones de control	Cantidad intervenida (m²)	Precio unitario (€/m²)	Costo (€)	Material geosintético utilizado	Contratista	Justificación
Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 21, Zona 1-2, Puriscal. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°4	2014	310	10772, 10771	16113.96	2,756.79	44,422,803.79	Geomalla de fibra de vidrio R-50 Pavco	Constructora Hernán Solís S.R.L.	Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa
Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 16, Zona 1-7, Cartago. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°6	2014	2A, 2B, 219	30600, 30750, 30491	18500	2,459.93	45,508,705.00	Geogrilla MacGrid AR 5.7	Asfaltos Orosi Siglo XXI S.A.	Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa y ofrecer resistencia a las fuerzas biaxiales
Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 12, Zona 3-2, Quepos. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°2	2011	34	60082	62709	3,250.16	203,815,554.10	Geomalla biaxial de fibra de vidrio de 50kN	MECO S.A	Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa
Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 9, Zona 4-1, Pérez Zeledón. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°2	2014	2	10020	1620	1,146.32	1,857,038.40	Geogrilla	Quebradores del Sur S.A.	Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa
Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 2, Zona 5-1, Guápiles. Contratación Directa Autorizada N°2014CD-000140-0CV00, Orden de Servicio N°6	2015	32	70130, 70090	20000	2,939.20	58,781,000.00	Geomalla biaxial de fibra de vidrio de 50kN	MECO S.A	Recuperar la capacidad estructural de los tramos intervenidos y alargar la vida útil del proyecto

Proyecto	Año de la intervención	Ruta Nacional	Secciones de control	Cantidad intervenida (m²)	Precio unitario (€/m²)	Costo (€)	Material geosintético utilizado	Contratista	Justificación
Contrato MP y R: Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la Red Vial Pavimentada, Línea 1, Zonas 1-1, 1-2 y 1-9, Región I Central, Sub región San José - Heredia. Licitación Pública N°2014LN-000018-OCV00, Orden de Servicio N°2	2017	Varias rutas en las Zonas 1-1, 1-2 y 1-9	-	75000	2,756.79	206,759,250.00	Geomalla MacGrid AR 5.7	MECO S.A	Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa
Contrato MP y R: Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la Red Vial Pavimentada, Línea 5, Zona 2-3, Santa Cruz y Zona 2-4, Nicoya. Licitación Pública N°2014LN-000018-OCV00, Orden de Servicio N°2	2017	160	50460, 50600	17000	3,250.16	55,252,720.00	Geomalla MacGrid AR 5.7	MECO S.A	Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa

Fuente: CONAVI, 2009-2017



CACISA
CONSTRUCCIÓN Y
INGENIERÍA S.A.



Laboratorio de Ensayos
Alcance de Acreditación N° 13.008
Resolución por el N° 16.81.2006
Al ser el Reporte en Formato PDF

INFORME DE ENSAYO

INF. 5340-2016

21 de Abril del 2016

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE	
Empresa: Constructora Pavicen	Dirigido a: Ing. Javier Apestegui
Dirección: San Antonio, Alajuela	Proyecto: Control de Calidad de Mezcla Asfáltica

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Y DATOS DE CONTROL	
Fecha de Recolección de muestra:	20 de marzo del 2017
Contenido:	Diseño de Mezcla Asfáltica (tamaño máximo nominal 12,7 mm)
Método de Muestreo Utilizado:	PT-LAB-07
Descripción de la Muestra:	Agregado y Cemento Asfáltico
Procedencia de la Muestra:	Agregado del Quebrador Piedra Grande y asfalto de la Planta de Pavicen
Lugar de realización de los ensayos:	Laboratorio Central
Fecha Recepción de la Muestra:	20 de marzo del 2017
Fecha de Realización del Ensayo:	Marzo - Abril del 2017

***Aclaración:** Los resultados que se presentan a continuación se refieren solo a las muestras ensayadas y/o pruebas de campo realizadas y al momento y condiciones en que se realizaron los ensayos. No se permite la reproducción parcial del Informe de Ensayo sin previa autorización escrita de CACISA. Este Informe de Ensayo no es válido sin la firma de aprobación respectiva.*



CACISA cuenta con Ensayos Acreditados por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA), según los requerimientos de la Norma INTE-ISO/IEC 17025:2005.
También tiene Actividades de Inspección acreditadas por el ECA según los requerimientos de la Norma INTE-ISO/IEC 17020:2000.

Cualquier comentario acerca de nuestros servicios, favor enviarlo a info@cacisa.cr

INF.5340-2016

Pág. 1 de 10

Compañía Asesora de Construcción e Ingeniería S.A. Tel: (506) 2244-0548 Fax: (506) 2244-1385
Santa Rosa de Santo Domingo de Heredia, de la Iglesia Católica 100 metros Oeste y 500 metros Norte
E-mail: info@cacisa.co.cr Página web: www.cacisa.co.cr Acreditado: 1621-1100

CACISA

F-PG-03-1 1.0 05/2016 Rev. 14

RESULTADOS

1- INFORMACIÓN GENERAL

1.1- NOMBRE DEL LABORATORIO RESPONSABLE

El diseño presentado fue elaborado por el Laboratorio de la Compañía Asesora en Construcción e Ingeniería, denominada CACISA.

1.2- FECHA DEL INFORME DE LABORATORIO

El presente informe de laboratorio tiene como fecha de elaboración 21 de abril del 2017.

1.3- PROFESIONAL QUE CERTIFICA EL INFORME DE LABORATORIO

El profesional que certifica este informe es el Ing. Carlos Solís Molina.

1.4- PROFESIONAL RESPONSABLE DEL CONTRATISTA QUE HA REMITIDO EL INFORME PARA REVISIÓN

El profesional que remite este informe para su revisión es el Ing. Javier Apestequí.

1.5- INDICACIÓN DE CADA UNA DE LAS FUENTES DE AGREGADO CON LAS QUE SE VA A PRODUCIR LA MEZCLA QUE CORRESPONDE AL DISEÑO:

La fuente de agregados se conoce como Quebrador Piedra Grande (Guápiles), expediente minero número: 22-90.

1.6- FECHA DE MUESTREO DE LOS AGREGADOS:

Los agregados se muestrearon el 20 de marzo del 2017.

1.7- TÉCNICA DE MUESTREO UTILIZADA:

El muestreo se llevó a cabo en los apilamientos producto del triturado del material de acuerdo con la normativa AASHTO T 2 (PT-LAB-07). El nombre del técnico que realizó el muestreo es Dennis Molina.

1.8- INDICAR SI LOS AGREGADOS MUESTREADOS HAN SIDO LAVADOS:

Los agregados muestreados procedentes del quebrador se lavan durante el proceso de extracción.

1.9- INDICAR EL TIPO DE RELLENO MINERAL A UTILIZAR, SUS CARACTERÍSTICAS Y SU FORMA DE INCORPORACIÓN A LA MEZCLA:

No aplica.

1.10- TIPO DE PLANTA Y UBICACIÓN

La planta es continua, marca Hotmix de 70 TPH y se encuentra ubicada en el distrito cuarto de San Antonio, de la provincia de Alajuela.

1.11- TIPO Y USO DE LA MEZCLA

La mezcla a producir se realizará con agregado de tamaño máximo nominal igual a 12,7 mm y será utilizada en la colocación de carpeta y bacheo para proyectos varios.

2- LIGANTE ASFÁLTICO (AC-30)

2.1- FECHA DE MUESTREO DEL LIGANTE ASFÁLTICO:

El ligante asfáltico se muestreó directamente del tanque de almacenamiento, el día 20 de marzo del 2017, de acuerdo con la normativa AASHTO T 140. El nombre del técnico que realizó el muestreo es Ronald Rodríguez.

2.2- CERTIFICADO DE CALIDAD DEL ASFALTO UTILIZADO EN EL DISEÑO DE MEZCLA:

El Certificado de Calidad del asfalto utilizado en el diseño se encuentra anexado a este documento. Los datos del mismo se aceptan como válidos.

2.3- ADITIVO

No se utilizó aditivo.

2.4- TEMPERATURAS DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN EN EL DISEÑO DE LA MEZCLA:

La temperatura de mezclado recomendada en el certificado de asfalto se encuentra entre 156 °C y 162 °C; y la de compactación es entre 144 °C y 149 °C.

3- PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS DE APILAMIENTO:

3.1 PROPORCIONES EN QUE SE MEZCLAN LOS AGREGADOS DE APILAMIENTO PARA OBTENER LA GRANULOMETRÍA DE DISEÑO:

Los agregados se han mezclado en una proporción de 40 % material de grueso, y un 60 % de material fino.

3.2 GRANULOMETRÍA DE GRUESOS* (Piedra Quinta), AASHTO T-27/11:

Tamiz	% Pasando
19.0 mm	100
12.7 mm	88
9.5 mm	60
N. 4	10
N. 8	5
N. 16	4
N. 30	4
N. 50	3
N. 200	2.1

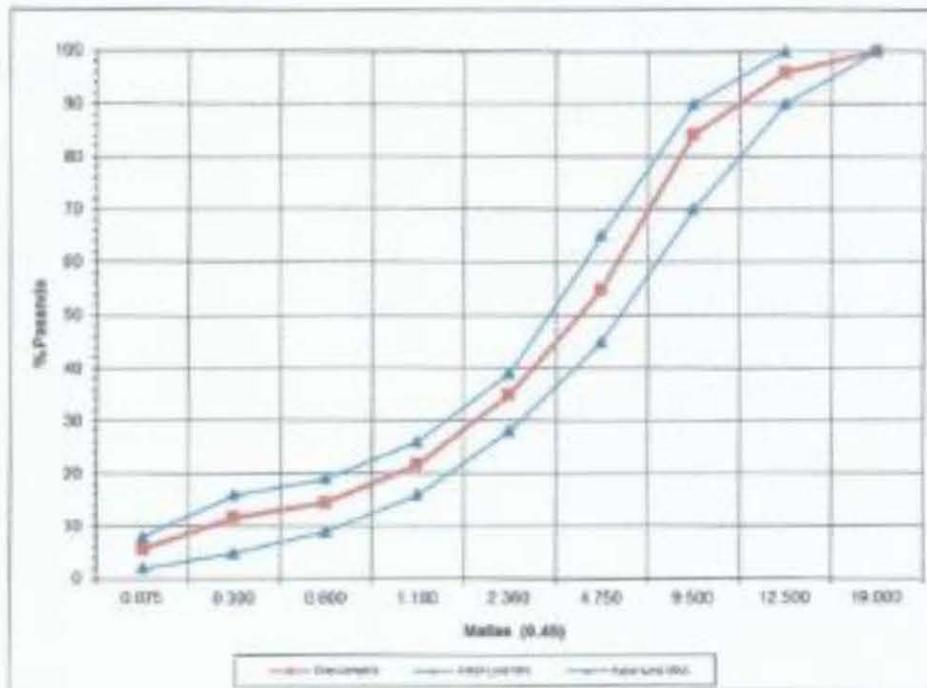
3.3 GRANULOMETRÍA DE FINOS* (Polvo de Piedra), AASHTO T-27/11:

Tamiz	% Pasando
9.5 mm	100
N. 4	85
N. 8	65
N. 16	34
N. 30	23
N. 50	19
N. 200	8.1

***Ensayo Acreditado**

3.4 GRANULOMETRÍA DE DISEÑO:

Tamiz	% Pasando	Tolerancias y Especificaciones para Tamaño Máx. Nominal 12,7 mm	Rangos para la Fórmula de Trabajo
19,0 mm	100	100	100
12,7 mm	98	90-100 (± 5)	90-100
9,50 mm	84	70-90 (± 5)	79-89
Nº 4	55	45-65 (± 4)	51-59
Nº 8	35	28-39 (± 4)	31-39
Nº 16	22	16-26 (± 4)	18-26
Nº 30	15	9-19 (± 4)	11-19
Nº 50	12	5-16 (± 4)	8-16
Nº 200	6,7	2-8 (± 2)	3,7-7,7



3.5 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS DE DISEÑO

AGREGADO GRUESO:

GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, AASHTO T-85*: 2,624

% DE ABSORCIÓN, AASHTO T-85*: 2,4

AGREGADO FINO:

GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA, AASHTO T-84**: 2,587

% DE ABSORCIÓN, AASHTO T-84**: 2,9

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN PONDERADAS:

GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA: 2,604

% DE ABSORCIÓN: 2,7

3.6 RESUMEN DE LAS PRUEBAS DEL AGREGADO:

AGREGADO GRUESO	RESULTADO	Especificación
Pérdida por abrasión (AASHTO T 96)**	20.3 %	40 % máximo
Pérdida por sanidad con sulfato de sodio (AASHTO T 104)*	2 %	15 % máximo
Índice de durabilidad (AASHTO T 210)**	88,0 %	35 % mínimo
Partículas Planas o Alargadas (ASTM C 119)*	0 %	10 % máximo
Partículas Friables (AASHTO T 112)**	0,2 %	Menor o igual a 2%
Residuo insoluble (ASTM D 3042)**	95,4 %	Mayor o igual a 25 %
Una o más caras fracturadas (ASTM D 5821)*	100 %	95 % mínimo
Dos o más caras fracturadas (ASTM D 5821)*	100 %	90 % mínimo
AGREGADO FINO		
Pérdida por abrasión (AASHTO T 96)**	26,8%	40 % máximo
Pérdida por sanidad (AASHTO T 104)*	4 %	15% máximo
Índice de durabilidad (AASHTO T 210)**	80,0 %	35% mínimo
Equivalente de arena (AASHTO T 176)*	70%	50 % mínimo
Límites de Atterberg (AASHTO T 89/90)*	NP	NP

*Ensayo Acreditado

**Ensayo No Acreditado

IMP-3340-2016

Pág. 6 de 10

Compañía Asesora de Construcción e Ingeniería S.A. Tel: (506) 2244-0548 Fax: (506) 2244-1385
Santa Rosa de Santo Domingo de Heredia, de la Iglesia Católica 100 metros Oeste y 500 metros Norte
E-mail: info@cacisa.co.cr Página web: www.cacisa.co.cr Apertado: 1621-1100

F-PC-03-1 F.8 05/10/16 Rev. 14

4- PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA:

En el anexo de este documento se encuentran, tal como se solicita, los datos correspondientes a:

- Densidad
- Estabilidad
- Flujo
- V.M.A
- V.F.A
- Porcentaje de vacíos en la mezcla
- Gráficas de mejor ajuste para cada parámetro Marshall

5- PARÁMETROS MARSHALL PARA EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE DISEÑO:

De acuerdo con el Método de Diseño Marshall y analizando los diferentes parámetros y sus rangos de aceptación, se ha encontrado que la mezcla debe diseñarse a 4,0 % de vacíos, para lo que se recomienda un 6,00 % de asfalto sobre el peso de la mezcla (5,36 % sobre el peso de los agregados). Para este porcentaje óptimo de asfalto la mezcla presenta los siguientes parámetros:

PARÁMETROS MARSHALL	VALORES	ESPECIFICACIÓN
Estabilidad (kg)	1950	800 mínimo
Flujo (1/100 cm)	33,3	20 - 35
Densidad	2,362	-
Máxima Teórica	2,461	-
% vacíos	4,0	3,0 % - 5,0 %
% VMA	14,7	14,0 mínimo
% VFA	72,6	65 - 78
Relación Polvo / Asfalto	1,2	0,6 - 1,3

6- RESISTENCIA AL DAÑO INDUCIDO POR LA HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS (TENSIÓN DIAMETRAL) AASHTO T 283*.

Para realizar el ensayo de Resistencia a la Tensión Diametral, se procedió a moldear las probetas según la granulometría propuesta, con los agregados sin pesar por el quemador y mezcla fabricada en laboratorio con 5,50 % de asfalto sobre el peso de la mezcla (0,5 % de asfalto menos del porcentaje óptimo indicado en el Apartado 5).

La Razón de Tensión Diametral dio como resultado 81,5 %. Este resultado cumple con lo especificado (mayor a 75 %).

Los resultados se pueden observar en el anexo.

7-RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS (RESISTENCIA RETENIDA) AASHTO T 165, T167*.

Para realizar la prueba de Resistencia a la Compresión, se procedió a moldear las probetas según la granulometría propuesta, con los agregados muestreados y mezcla fabricada en laboratorio con 5,50 % de asfalto sobre el peso la mezcla (0,5 % de asfalto menos del porcentaje óptimo indicado en el Apartado 5).

La Razón de la Resistencia Retenida dio como resultado 81,0 %. Este resultado cumple con lo especificado (mayor a 75%).

Los resultados se pueden observar en el anexo.

8- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Según el análisis realizado, se establece la siguiente fórmula de trabajo para producir mezcla asfáltica en la planta de Pavican con los agregados provenientes del Quebrador Piedra Grande.

Los agregados utilizados son piedra quinta y polvo de piedra, los cuales al combinarlos en una proporción de 40 % y 60% respectivamente, se obtiene la siguiente graduación de diseño:

Tamiz	% Pasando	Rango de Aceptación
19.0 mm	100	100
12.7 mm	95	90-100
9.50 mm	84	79-89
Nº 4	56	51-59
Nº 8	35	31-39
Nº 16	22	18-26
Nº 30	15	11-19
Nº 50	12	8-16
Nº 200	5.7	3.7-7.7

El porcentaje óptimo de asfalto que satisface todos los requerimientos establecidos en las especificaciones del proyecto es de 6,00 % por peso de la mezcla (6,36 % por peso del agregado).

Una vez que la planta comience la producción de mezcla asfáltica, se recomienda realizar los ensayos correspondientes para analizar los parámetros Marshall y determinar los ajustes necesarios en la fórmula de trabajo, de tal manera que todos los parámetros se encuentren dentro de las tolerancias del diseño propuesto.

APROBACIÓN DE INFORME DE ENSAYO



Ing. Carlos Solís Molina
Gerente Técnico de Laboratorio

cc: Archivo

IMP 5340-2016

Pág. 9 de 10

Compañía Alasora de Construcción e Ingeniería S.A. Tel: (506) 2244-0548 Fax: (506) 2244-1385
Santo Roso de Santo Domingo de Heredia, de la Iglesia Católica 100 metros Oeste y 500 metros Norte
E-mail: info@calasora.com.cr Página web: www.calasora.com.cr Apertado: 1621-1100

F-PG-03-1 F.E.05/10/16 Rev. 14

ANEXOS

INF-3340-2015

Pág. 10 de 10

Compañía Asesora de Construcción e Ingeniería S.A. Tel: (506) 2244-0548 Fax: (506) 2244-1385
Santa Rosa de Santo Domingo de Heredia, de la Iglesia Católica 100 metros Oeste y 500 metros Norte
E-mail: info@casia.cr Página web: www.casia.cr Apertado: 1621-1100

F-PC-03-1 F.E 05/10/16 Rev. 14

RESULTADOS DE ANALISIS MARSHALL

% Ast Sobre la Mezcla	# Pavida	Masa Secca (g)	Masa Superf. Sól. Secca	Masa Sumerg. (g)	Volumen (cm ³)	Gravidad Específica Bruta + ASTRO T (66)	Gravidad Máxima Teórica* (ASTRO T 209)	% Vacío (ASTRO T 209)**	Características (ASTRO T 209)		VMA	VFA
									Estabilidad (kg)*	Flujo [†] (L/100 cm)		
4.50	1	1173.0	1191.1	679.2	501.9	2.337	2.511	0.0	1502.0	30.8	14.2	51.3
	2	1173.0	1181.2	500.1	501.1	2.336	2.515	0.0	5587.0	50.4	14.1	51.5
	3	1173.7	1180.0	679.0	501.2	2.336	2.517	7.0	4047.4	55.1	14.3	51.1
					Promedio	2.337	2.514	0.0	1580	32.8	14.2	51.3
5.00	4	1174.7	1180.0	500.1	500.3	2.346	2.494	0.0	1646	31.4	14.4	50.7
	5	1175.1	1181.2	681.0	500.2	2.349	2.494	5.8	1881	30.2	14.2	50.4
	6	1174.2	1181.0	681.0	500.0	2.348	2.494	5.0	5888	32.3	14.3	50.2
					Promedio	2.346	2.494	5.8	1942	33.8	14.3	50.1
5.50	7	1180.5	1182.5	684.4	501.1	2.350	2.478	4.0	2042	32.9	14.4	49.8
	8	1178.3	1184.0	883.0	501.0	2.352	2.478	5.1	1038	31.4	14.0	49.5
	9	1181.0	1182.0	684.0	500.9	2.350	2.478	4.8	1902	32.6	14.3	49.2
					Promedio	2.355	2.478	4.9	1994	32.6	14.4	49.7
6.00	10	1178.0	1181.9	683.3	482.8	2.380	2.451	4.1	1655	33.5	14.7	72.1
	11	1178.0	1184.1	685.6	482.5	2.384	2.451	4.0	1803	33.5	14.6	72.9
	12	1179.0	1180.0	686.2	489.7	2.381	2.451	4.1	1000	30.5	14.7	72.3
					Promedio	2.382	2.451	4.0	1723	33.1	14.7	72.4
6.50	13	1186.2	1182.6	691.1	488.5	2.385	2.444	2.8	1643	34.6	14.5	51.7
	14	1184.7	1187.9	686.0	488.3	2.377	2.444	2.7	1570	33.8	14.0	51.2
	15	1180.0	1189.0	691.2	487.8	2.380	2.444	2.8	1609	34.0	14.4	51.9
					Promedio	2.379	2.444	2.7	1618	34.3	14.5	51.8

* ENSAYO ACREDITADO

** ENSAYO NO ACREDITADO



**TABLA RESUMEN DE LAS PROPIEDADES
MARSHALL**

INF.5340-2016

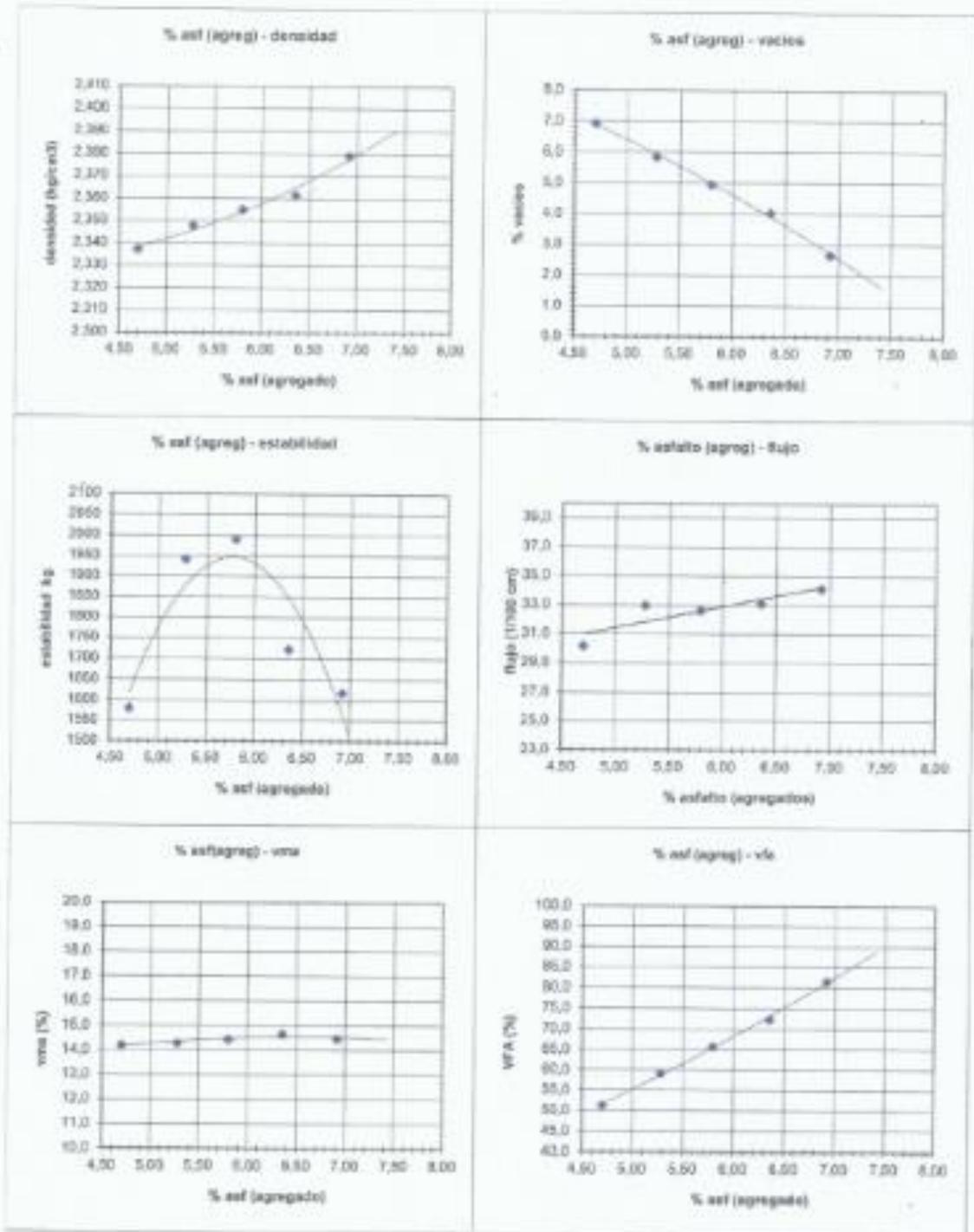
TABLA RESUMEN DE RESULTADOS

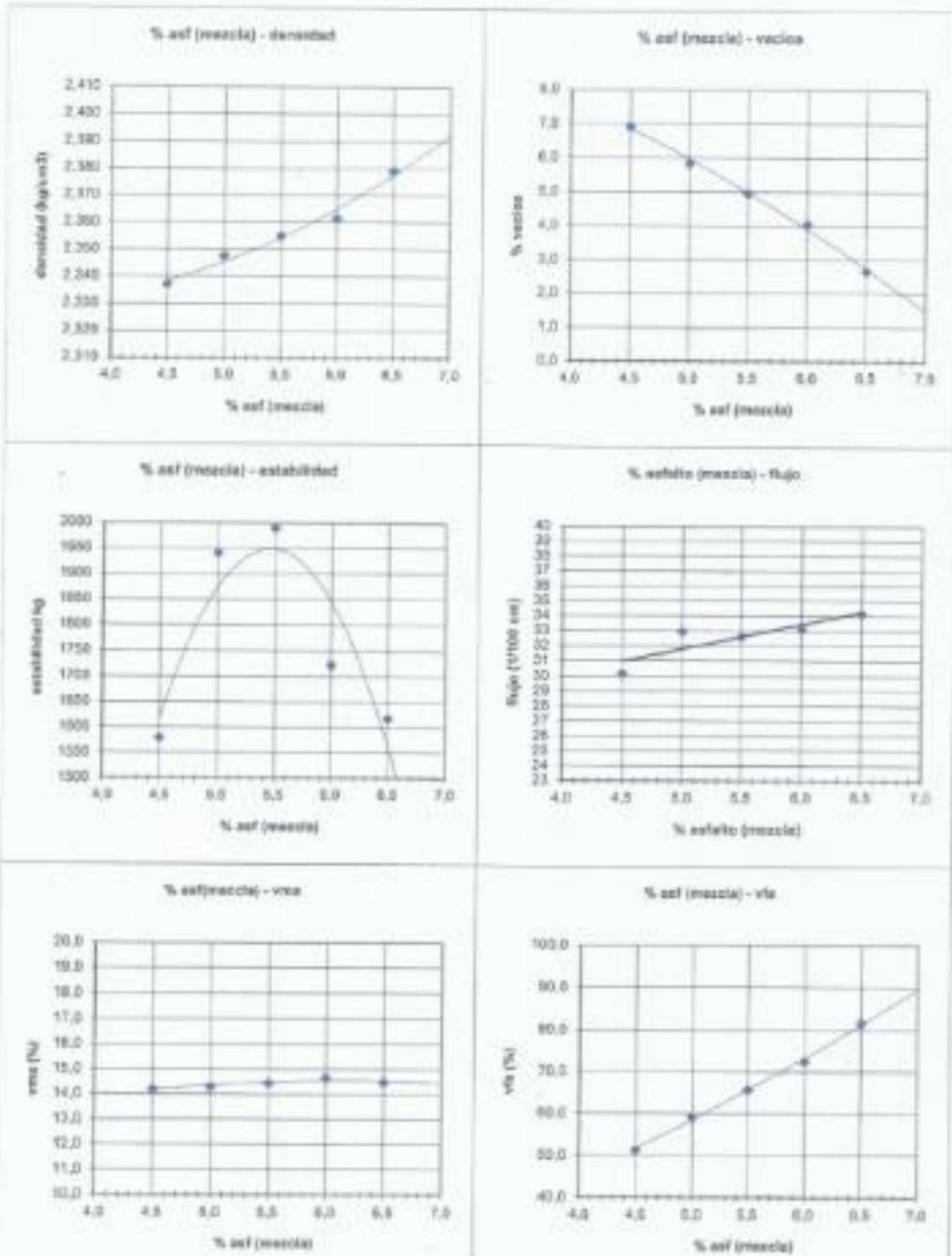
CONTENIDO BITUMEN (%) MEZCLA	CONTENIDO BITUMEN (%) AGREGADO	DENSIDAD (Kg/m ³)	ESTABILIDAD (kg)	FLUJO (cm/100)	VACIOS (%)	V.M.A. (%)	VFA (%)
4,50	4,70	2,337	1580	32,0	6,92	14,2	51,3
5,00	5,28	2,348	1942	33,0	5,84	14,3	59,1
5,50	5,80	2,355	1990	32,6	4,95	14,4	65,7
6,00	6,36	2,362	1723	33,1	4,04	14,7	72,4
6,50	6,92	2,379	1616	34,2	2,66	14,5	81,6



DISEÑO MEZCLA ASFALTICA
CALCULO % DE VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL

%	%	Gsb	Gsb	% DE FINOS	% DE GRUESOS	Gsb PROMEDIO DE AGREGADO	Gmb PROMEDIO DE PASTILLAS	V.A.M.
Asfalto MEZCLA	Asfalto AGREG	finos	gruesos					
4.50	4.70	2.087	2.624	60.0	40.0	2.002	2.337	14.2
5.00	5.28	2.087	2.624	60.0	40.0	2.602	2.345	14.3
5.50	5.80	2.087	2.624	60.0	40.0	2.602	2.355	14.4
6.00	6.36	2.087	2.624	60.0	40.0	2.602	2.362	14.7
6.50	6.92	2.087	2.624	60.0	40.0	2.602	2.370	14.5





RESISTENCIA RETENIDA, AASHTO T 167 y ASTM D1075 *

Pastilla	W seco (g)	W sat (g)	W sumerg (g)	Vol (cm ³)	% Vacíos	% Vacíos
1	1830,6	1845,6	1036,0	2,275	804,6	7,6
2	1831,4	1841,7	1036,6	2,281	802,9	7,3
3	1829,6	1839,9	1037,1	2,279	802,8	7,4
4	1829,7	1838,6	1034,7	2,278	803,9	7,5
5	1829,6	1840,1	1036,5	2,277	803,8	7,5
6	1831,2	1841,4	1037,2	2,277	804,2	7,5
7	1830,9	1840,1	1036,4	2,278	803,7	7,4
8	1831,4	1842,0	1036,8	2,280	803,2	7,3

Pastillas	Carga (kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
Saturadas							
1	2471	10,3	10,17	81,2	30,43	436	2986
2	2460	10,3	10,17	81,2	30,30	433	2972
3	2480	10,3	10,17	81,2	30,66	438	3007
4	2441	10,2	10,17	81,2	30,06	429	2945
Promedio:					30,36	434	2979
Desviación Estándar:					0,25	3,5	24

Pastillas	Carga (kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
Secas							
1	3029	10,2	10,17	81,2	37,31	533	3680
2	3060	10,2	10,17	81,2	37,93	542	3721
3	3013	10,3	10,17	81,2	37,11	530	3645
4	3068	10,3	10,17	81,2	37,88	538	3698
Promedio:					37,51	536	3679
Desviación Estándar:					0,37	5,3	36

RAZÓN DE LA RESISTENCIA RETENIDA:	81,0
--	-------------

TENSIÓN DIAMETRAL, AASHTO T 283 *

N° Pastilla	W seco (g)	W sumerg (g)	W sat. (g)	Gsb	Vol (cm ³)	% Vacíos
1	1151,3	647,5	1153,8	2,274	505,3	7,2
2	1190,0	647,0	1152,4	2,275	505,4	7,1
3	1148,8	646,6	1151,7	2,274	505,1	7,2
4	1152,3	648,3	1154,5	2,276	505,2	7,1
5	1165,1	647,4	1152,7	2,276	505,3	7,1
6	1148,0	646,0	1150,6	2,275	504,6	7,1
7	1149,7	646,8	1152,0	2,276	505,2	7,1
8	1151,5	647,4	1153,0	2,277	505,6	7,0
9	1150,6	647,2	1153,1	2,275	505,9	7,2
10	1150,0	646,8	1152,6	2,274	505,8	7,2

SATURACIÓN DE LAS PASTILLAS

N° Pastilla	W seco (g)	W sat. (g)	V agua abs (cm ³)	V vacíos (cm ³)	% Sat
1	1151,3	1177,3	26,0	36,4	71,5
3	1148,8	1175,0	26,2	36,2	72,4
4	1152,3	1177,8	25,5	35,9	71,1
6	1148,0	1173,8	25,8	36,0	71,6
7	1149,7	1176,0	26,3	35,9	73,2

N° Pastillas Saturadas	Volumen (cm ³)	Espeor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión Diametral (kg/cm ²)	Tensión Diametral (kPa)
1	505,3	6,19	10,20	1345	13,56	1331
3	505,1	6,18	10,18	1379	13,65	1369
4	505,2	6,21	10,21	1401	14,07	1381
6	504,6	6,19	10,20	1320	13,31	1306
7	505,2	6,20	10,19	1365	13,75	1350
Promedio					13,72	1347
Desviación Estándar (kpa)						30,8

N° Pastillas Secas	Volumen	Espeor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión Diametral (kg/cm ²)	Tensión Diametral (kPa)
2	505,4	6,18	10,22	1674	16,67	1656
5	505,3	6,20	10,18	1683	16,97	1666
8	505,6	6,20	10,22	1649	16,57	1628
9	505,9	6,21	10,20	1677	16,86	1655
10	505,8	6,20	10,21	1658	16,95	1665
Promedio					16,85	1654
Desviación Estándar (kpa)						16,4

Razón de Tensión Diametral	81,5%
-----------------------------------	--------------

Solicitado por: Depto. Procesos
No. registro: 1224
Tipo de muestra: ASFALTO AC-20

Procedencia: Refinería Moin
Fecha Muestra: 2017-03-28
Fecha de Recepción: 2017-03-28

Lata No.: A(21)2017-0328-7911
Tanque No.: 7811
Volumen (en m³): 1.535,80

Método de ensayo (S)	Prueba	Resultado	Límites de especificación	Análisis y fecha
**ASTM D-19	Densidad a 15 °C	(191,2 ± 0,3) kg/m ³	No aplica	G.S.S. 2017-03-28
**ASTM D-67	Temperatura de inflamación	(131 ± 10) °C	Mínimo 225 °C	G.S.S. 2017-03-28
**ASTM D-2170	Viscosidad a 135 °C	(697 ± 47) mPa·s	Mínimo 350 mPa·s	F.W.I. 2017-03-28
**ASTM D-2170	Viscosidad a 160 °C	(225 ± 13) mPa·s	No aplica	C.M.W. 2017-03-28
**ASTM D-2171	Viscosidad a 60 °C	(380 ± 30) Pa·s	200 ± 40) Pa·s	F.W.I. 2017-03-28
* ASTM D-5	Penetración a 25 °C, carga 100 g, 7 s	(51 ± 2,5) 1/10 mm	Máximo 50 - 100 mm	G.S.S. 2017-03-28
**ASTM D-2042	Estabilidad en oxidación acelerada como Pécton masa de asfalto	(95,1 ± 0,3) %	Mínimo 90,0 %	G.S.S. 2017-03-28
* ASTM D-1318	Control en liberación masa por efecto del calor a 400	(-0,6) ± 0,20 %	Mínimo 1,0 %	F.W.I. 2017-03-28
** ASTM D-2171	Viscosidad por película 50 °C	(315 ± 41) Pa·s	Mínimo 100 Pa·s	G.S.S. 2017-03-28
**ASTM D-113	Distensibilidad por película a 25 °C	(55 ± 30) cm	Mínimo 40 cm	SSE 2017-03-28
** Cálculo	Índice de susceptibilidad térmica, VTS	3,2 unidades	(2,7 a 3,5) unidades	F.W.I. 2017-03-28
** Cálculo	Relativo de Viscosidades Absolutas	7 unidades	Mínimo 3 unidades	G.S.S. 2017-03-28
*ASTM D4007	Manual de Muestras para pruebas y Derivados	No Aplica	No Aplica	FWI 2017-03-28

REGULACIÓN: ETCA 75.01.21.04, 34301-MDC-MOPF, 30111-MDC-MOPF, Tabla 18. Decreto N° 30813-COMCO-MINAE-MIDE D.
Los resultados de los análisis ejecutados cumplen con el Reglamento Técnico Costarricense.

CONSERVACIONES: "Ensayo acreditado bajo norma." "Ensayo no acreditado. Acertividad de acuerdo a la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance en www.ana.gov.cr". Los valores de punto de inflamación son corrigidos a 10,3 30%. El plan de muestra se ejecutó en exceso al "Instrucciones para la recepción de muestras" AS-05-01-017. El dato de viscosidad a 50°C se toma del informe 877M17, correspondiente a esta misma lote de importación.

Cálculo de temperatura de trabajo

	Temperatura	Viscosidad
Máximo	149	152
Mínimo	144	130

Las temperaturas se calcularon de acuerdo a ASTM 1555, se informan como referencia para aplicaciones en estudios de mezcla.

ANA ISABEL
ALFARO
MURILLO
(FIRMA)

Nombre completo
Cédula de Identificación
Número de Teléfono
Correo electrónico
Cargo
Fecha de Emisión
Fecha de Vigencia

Responsable Técnico: Licda. Ana Isabel Alfaro Murillo
Nombre: _____ Puesto: _____

2017-03-01

Fecha finalización de análisis

Operador: en 101 Ruta 21 San José, Moravia

Los resultados de los análisis se pueden ver representados gráficamente en el plano interactivo de resultados.
De manera de simplificarlo se permite, ver un factor de cobertura 0-1, para un 95% de confianza.

Organiz. Ejecutora: Centro Laboratorio, Departamento Centro de Control
Apertura: 1993-Luzán

Tel/Fax: (226) 226-2750

www. CentroLaboratorio@recope.gov.cr



240944
Página 1 de 1



INFORME DE ENSAYO

INF.LCP-152-2017

30 de Junio del 2017

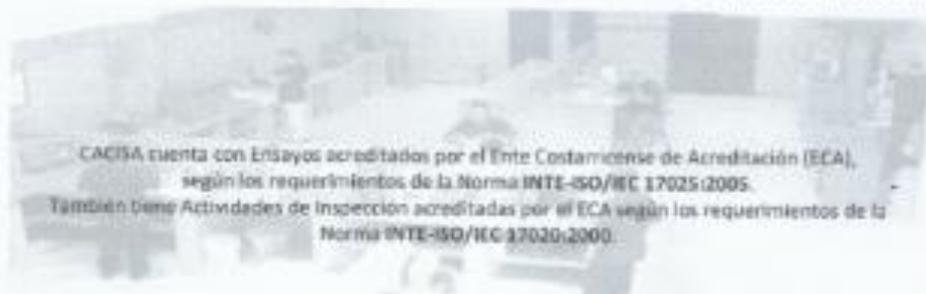
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Empresa:	PAVICEN LTDA	Dirigido a:	Ing. Javier Apóstegui
Dirección:	San Antonio de Alajuela	Proyecto:	Control de Calidad de la Planta de Mezcla Asfáltica

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Y DATOS DE CONTROL

Fecha de Recolección de muestra:	25 de Junio del 2017
Contenido:	Revisión de Diseño de Mezcla Asfáltica
Método de Muestreo Utilizado:	PG-5.7-02
Descripción de la Muestra:	Agregado y Cemento Asfáltico
Procedencia de la Muestra:	Agregado del Quebrador Piedra Grande y asfalto de la Planta de Pavicen
Lugar Realización de los Ensayos:	Laboratorio Central
Fecha Recepción de la Muestra:	25 de Junio del 2017
Fecha de Realización del Ensayo:	Junio del 2017

Aclaración: Los resultados que se presentan a continuación se refieren solo a las muestras ensayadas y/o pruebas de campo realizadas y al momento y condiciones en que se realizaron los ensayos. No se permite la reproducción parcial del Informe de Ensayo sin previa autorización escrita de CACISA. Este Informe de Ensayo no es válido sin la firma de aprobación respectiva.



CACISA cuenta con Ensayos acreditados por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA), según los requerimientos de la Norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. También tiene Actividades de Inspección acreditadas por el ECA según los requerimientos de la Norma INTE-ISO/IEC 17020:2000.

Cualquier comentario acerca de nuestros servicios, favor enviarlo a info@cacisa.cr

RESULTADOS

A solicitud del cliente se procedió a revisar la fórmula de trabajo propuesta en el diseño de mezcla asfáltica INF.5340-2016.

1. Granulometrías y Gravedad Específica de agregados

Pelvo de Piedra	
Procedencia de la muestra: Planta Paulsen	
IE-009 y 010: ANALISIS GRANULOMETRICO, AASHTO T-27/11 (ASTM 127/136)*	
TANQUES	% PASANDO
Tamiz 9,5 mm (3/8")	100
Tamiz No. 4	85
Tamiz No. 8	55
Tamiz No. 16	34
Tamiz No. 30	23
Tamiz No. 50	19
Tamiz No. 200	8,1

IE-024 GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS, AASHTO T84*	
GRAVEDAD ESPECIFICA BRUTA SECA	2,579
GRAVEDAD ESPECIFICA DE SUPERFICIE SATURADA SECA	2,661
% DE ABSORCION	3,1

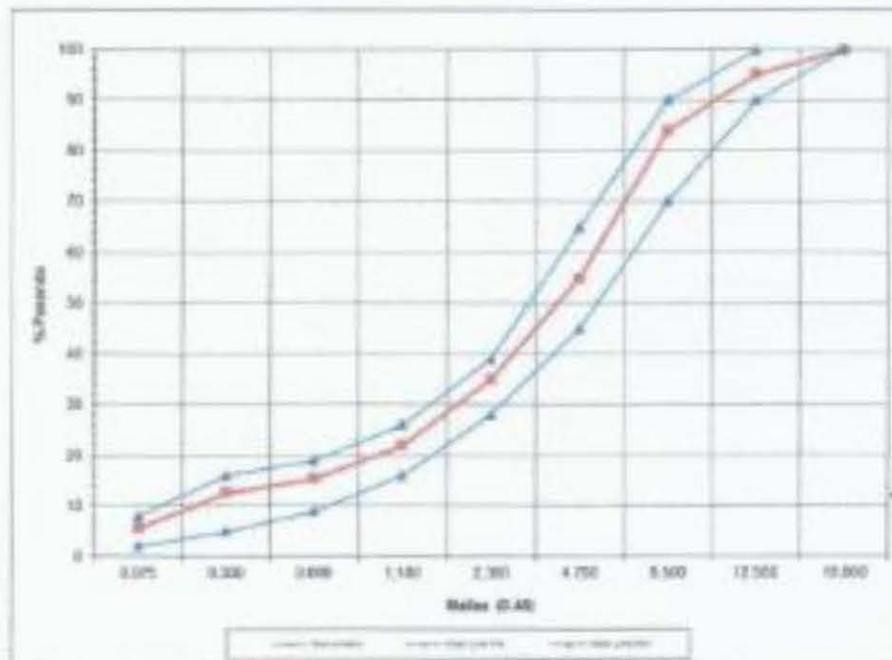
Piedra Quintilla	
Procedencia de la muestra: Planta Guápiles	
SE-009 y 010: ANALISIS GRANULOMETRICO, AASHTO T-27/11 (ASTM 127/136)*	
TAMICES	% PASANDO
Tamiz 19,0 mm (3/4")	100
Tamiz 12,5 mm (1/2")	90
Tamiz 9,5 mm (3/8")	84
Tamiz No. 4	55
Tamiz No. 8	35
Tamiz No. 16	22
Tamiz No. 30	15
Tamiz No. 50	13
Tamiz No. 100	5,7

SE-024 GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS, AASHTO T85*	
GRAVEDAD ESPECIFICA BRUTA SECA	2,584
GRAVEDAD ESPECIFICA DE SUPERFICIE SATURADA SECA	2,642
% DE ABSORCION	2,2

PROPORCIONES EN QUE SE MEZCLAN LOS AGREGADOS DE APILAMIENTO PARA OBTENER LA GRANULOMETRÍA DE DISEÑO

Los agregados se mezclaron en una proporción de 40 % material de grueso, y un 60 % de material fino, para obtener la graduación de diseño mostrada a continuación,

Tamiz	% Pasando	Tolerancias y Especificaciones para Tamaño Máx. Nominal 12,7 mm	Rangos para la Fórmula de Trabajo
19,0 mm	100	100	100
12,7 mm	95	90-100 (± 5)	90-100
9,50 mm	84	70-90 (± 5)	79-89
Nº 4	58	45-65 (± 4)	51-59
Nº 8	35	28-39 (± 4)	31-39
Nº 16	22	16-26 (± 4)	18-26
Nº 30	15	9-19 (± 4)	11-19
Nº 50	13	5-16 (± 4)	8-16
Nº 200	6,7	2-8 (± 2)	3,7-7,7



Como se puede observar, la graduación de los materiales combinados obtenida, es congruente con la propuesta en el diseño de mezcla asfáltica INF. 5340-2016.

2. Gravedad Específica Bruta de Pastillas Marshall, Máxima Teórica y porcentaje de vacíos.

Con la graduación del diseño anterior y el porcentaje de asfalto óptimo del diseño INF.5340-2016 (6,00 % de asfalto sobre la mezcla), se procedió a reproducir las pastillas Marshall con la intención de verificar el contenido de vacíos de la mezcla. Los resultados se muestran a continuación:

IE-001: GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA DE MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA UTILIZANDO ESPÉCIMENES EN CONDICIÓN SATURADO SUPERFICIE SECA* (MÉTODO A)

Tipo de Muestra: Mezcla emfítica reproducida y moldeada en el Laboratorio

Nº de Objetos de Ensayo	Gravedad Específica Bruta	Absorción (%)
1	2,350	0,2
2	2,362	0,2
3	2,351	0,2
4	2,348	0,2
Promedio	2,351	0,2

*ENSAYO ACREDITADO

IE-005: GRAVEDAD MÁXIMA TEÓRICA PROCEDIMIENTO SUPLEMENTARIO PARA AGREGADO POROSO* (CONTENEDOR TIPO C)

Nº de Objetos de Ensayo	Gravedad Máxima Teórica	Tamaño de Objeto de Ensayo (g)
1	2,449	1516,5
2	2,450	1511,1
Promedio	2,450	---

*ENSAYO ACREDITADO

**PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE EN MEZCLAS ASPÁLTICAS
COMPACTADAS DENSAS Y ABIERTAS (AASHTO T 269)***

Nº de Objetos de Ensayo	Porcentaje de Vacíos (%)	Especificación (%)
1	3,9	3,0 - 5,0
2	4,0	
3	4,0	
4	4,1	
Promedio	4,0	

***ENSAYO ACREDITADO**

**E-002: RESISTENCIA AL FLUJO PLÁSTICO DE MEZCLAS BITUMINOSAS
UTILIZANDO EL APARATO MARSHALL***

Tipo de Muestra: Mezcla asfáltica reproducida y moldeada en el Laboratorio

Temperatura del Ensayo: 60 °C

Nº de Objetos de Ensayo	Estabilidad (kg)	Flujo (1/100 cm)	Especificaciones
1	1636	36,1	Estabilidad: > 800 kg Flujo: 20 a 35 1/100cm
2	1572	33,8	
3	1614	33,3	
4	1637	34,7	
Promedio	1615	34,2	

***ENSAYO ACREDITADO**

Como se puede observar, con 5,00 % de asfalto sobre la mezcla, se obtiene un porcentaje de vacíos de 4,0% de la mezcla asfáltica.

Así mismo se obtienen los siguientes parámetros volumétricos:

PARÁMETROS MARSHALL	VALORES	ESPECIFICACIÓN
Densidad	2,351	-
% vacíos	4,0	3,0 % - 5,0 %
% VMA	15	14,0 mínimo
% VFA	73	65 -78
Relación Polvo / Asfalto	1,0	0,60 - 1,30

Conclusiones

De acuerdo con el Método de Diseño Marshall y analizando los resultados presentados anteriormente al utilizar 6,00 % de asfalto sobre la mezcla, se obtiene 4,0% de vacíos de aire en la mezcla asfáltica, con lo cual se ratifica la validez del diseño (NF.5340-2018, tanto para la graduación de diseño así como para el porcentaje óptimo de asfalto y los respectivos parámetros volumétricos.

Se adjunta los resultados de la Tensión Diametral y la Resistencia Retenida realizados con mezcla reproducida en el laboratorio con 6,00% de asfalto sobre la mezcla. El resultado obtenido se encuentra por arriba del 75%, por lo cual se cumple con lo establecido (ver resultado anexo).

APROBACIÓN DE INFORME DE ENSAYO



Ing. Carlos Solís Molina
Gerente Técnico de Laboratorios

cc: Archivo MVB

ANEXO: TENSIÓN DIAMETRAL Y RESISTENCIA RETENIDA

TENSIÓN DIAMETRAL, AASHTO Y 283 *

N° Pastilla	W seco (g)	W sumerg (g)	W sat. (g)	Gsb	Vol (cm ³)	% Vacíos
1	1155,0	649,0	1158,2	2,268	509,2	7,4
2	1153,8	647,7	1158,0	2,270	508,3	7,3
3	1151,7	645,8	1153,5	2,268	507,7	7,4
4	1155,8	650,3	1158,8	2,273	508,0	7,2
5	1149,0	646,3	1151,3	2,275	505,0	7,1
6	1150,7	647,6	1153,8	2,273	508,2	7,2
7	1153,0	648,0	1156,1	2,269	508,1	7,3
8	1148,8	646,4	1152,0	2,272	505,6	7,2
9	1151,7	645,6	1154,8	2,266	508,2	7,5
10	1154,3	648,3	1157,8	2,271	508,5	7,3

SATURACIÓN DE LAS PASTILLAS

N° Pastilla	W seco (g)	W sat. (g)	V agua abs (cm ³)	V vacíos (cm ³)	% Sat
1	1155,0	1184,5	29,5	37,6	78,5
2	1153,8	1181,1	27,3	37,2	73,4
3	1151,7	1179,1	27,4	37,4	73,2
4	1155,8	1182,9	27,3	36,8	74,5
5	1149,0	1175,5	26,5	35,8	74,0

N° Pastillas Saturadas	Volumen (cm ³)	Espesor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión Diametral (kg/cm ²)	Tensión Diametral (kPa)
1	509,2	6,20	10,23	1312	12,17	1292
2	508,3	6,21	10,22	1332	13,36	1311
3	507,7	6,22	10,20	1278	12,82	1258
4	508,5	6,20	10,25	1292	12,84	1241
5	505,0	6,19	10,19	1310	13,22	1297
Promedio					13,04	1280
Desviación Estándar (kpa)						29,3

N° Pastillas Secas	Volumen	Espesor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión Diametral (kg/cm ²)	Tensión Diametral (kPa)
6	508,2	6,20	10,21	1810	16,26	1595
7	508,1	6,19	10,23	1880	16,91	1660
8	505,6	6,22	10,22	1892	18,34	1803
9	508,2	6,20	10,23	1876	18,83	1851
10	508,3	6,20	10,23	1884	18,90	1859
Promedio					18,77	1846
Desviación Estándar (kpa)						28,4

Razón de Tensión Diametral	77,6%
----------------------------	--------------

RESISTENCIA RETENIDA, AASHTO T 167 y ASTM D1075 *

Pastilla	Wseco (g)	Wsat (g)	Wsumerg (g)	Vol (cm ³)	% Vacios	% Vacios
1	1830,5	1840,6	1036,0	2,275	804,6	7,5
2	1831,4	1841,7	1036,8	2,281	802,9	7,3
3	1829,6	1839,9	1037,1	2,279	802,8	7,4
4	1829,7	1838,6	1034,7	2,276	803,9	7,5
5	1829,8	1840,1	1036,5	2,277	803,6	7,5
6	1831,2	1841,4	1037,2	2,277	804,2	7,5
7	1830,9	1840,1	1036,4	2,278	803,7	7,4
8	1831,4	1842,0	1036,8	2,280	803,2	7,3

Pastillas	Carga (kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
Saturadas							
1	2471	10,3	10,17	81,2	30,43	436	2982
2	2480	10,3	10,17	81,2	30,30	433	2972
3	2469	10,2	10,17	81,2	30,56	438	3007
4	2441	10,2	10,17	81,2	30,18	429	2949
Promedio:					30,36	434	2979
Desviación Estándar:					0,25	3,5	24

Pastillas	Carga (kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
Secas							
1	3029	10,3	10,17	81,2	37,31	531	3660
2	3080	10,2	10,17	81,2	37,93	540	3721
3	3013	10,3	10,17	81,2	37,11	530	3640
4	3058	10,3	10,17	81,2	37,68	538	3696
Promedio:					37,51	536	3679
Desviación Estándar:					0,37	5,3	36

RAZÓN DE LA RESISTENCIA RETENIDA: 81,0

RECOPE

Seguridad energética



2547A17

INFORME DE ENSAYOS

AS-09-06-038

Rige a partir de
2016-06-27
Version 1

Tipo de producto: Emulsion Asfaltica Rapida (CRS-1)

Plantal: El Alto

Fecha de muestreo: 2017/09/08

Volumen, m³: 70,0

Solicitado por: Producto Negro

Fecha de recepción: 2017/09/08

Tanque N°: 153

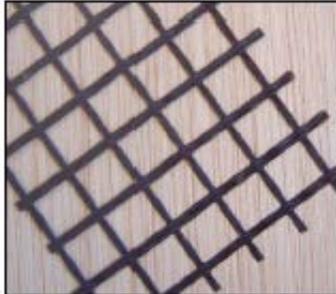
Lote N°: 53-154-17

Ensayo	Descripción	Resultado	Especificación	Analista	Fecha
**ASTM D-7496	Viscosidad Saybolt Furol a 50 °C, SSF	21,8 ± 4,00	20,0 - 100,0	JOSEFINA-SB	2017/09/08
**ASTM D-6937	Densidad a 25 °C, kg/m ³	1009	Reportar	JOSEFINA-SB	2017/09/08
**ASTM D-6997	Residuo evaporado, fracción masa asfalto, % en masa	67,5	Mínimo 60,0	ARNOLDO-GC	2017/09/08
	Fracción volumen de aceite destilado, % volumen masa	1,0	Máximo 3,0		
**ASTM D-5	Penetración residuo (25 °C, 100 g, 5 s), 1/10mm	133,0	100 - 250	ARNOLDO-GC	2017/09/08
**ASTM D-6933	Fracción masa retenida en malla N°20, % en masa	<0,01	Máximo 0,10	JOSEFINA-SB	2017/09/08
**ASTM D-6930	Estabilidad 24h, fracción de asfalto, % en masa	0,1	Máximo 1,0	JOSEFINA-SB	2017/09/09
**ASTM D-6936	Demulsibilidad, fracción masa de asfalto, %	70,5	Mínimo 40,0	ARNOLDO-GC	2017/09/08

Fuente: RECOPE S.A., 2017

MACCAFERRI			ESPECIFICACIÓN TÉCNICA					
			Rev. 01 ; Fecha 11.2014					
			MacTex® N					
			Geotextil Notejado en Polipropileno					
Características Técnicas								
MacTex® N es un geotextil agujado producido con hilos de polipropileno.								
MacTex® N			N 20.1	N 24.1	N 27.1	N 28.1	N 34.1	N 47.1
Color			Negro					
Propiedades físicas			N 20.1	N 24.1	N 27.1	N 28.1	N 34.1	N 47.1
Gramaje	g/m ²	ASTM D 5261 / ABNT NBR ISO 9864	105	120	140	140	170	237
Espesor	mm	ASTM D 5199	0,9	1,0	1,1	1,0	1,5	1,9
Propiedades mecánicas			N 20.1	N 24.1	N 27.1	N 28.1	N 34.1	N 47.1
Resistencia a la tracción tira ancha sentido longitudinal	kN/m	ASTM D 4595 / ABNT NBR ISO 10319	6	6,7	7,7	7,7	9,7	12,5
Elongación Tira Ancha	%	ASTM D 4595 / ABNT NBR ISO 10319	50	50	50	50	50	50
Resistencia a la tracción GRAB sentido longitudinal	kN	ASTM D 4632	0,35	0,4	0,445	0,453	0,734	0,8
Elongación GRAB	%	ASTM D 4632	50	50	50	50	50	50
Resistencia al punzonamiento CBR	kN	ASTM D 6241 / ABNT NBR 13359	0,76	1,18	1,32	1,24	1,8	2,11
Resistencia al desgarramiento trapezoidal sentido longitudinal	kN	ASTM D 4533	0,13	0,19	0,22	0,20	0,3	0,33
Punto de reblandecimiento	°C		150	150	150	150	150	150
Propiedades hidráulicas			N 20.1	N 24.1	N 27.1	N 28.1	N 34.1	N 47.1
Permeabilidad normal	cm/s	ASTM D 4491 / ABNT NBR 15223	0,45	0,45	0,45	0,45	0,40	0,40
Permitividad	s ⁻¹	ASTM D 4491 / ABNT NBR 15223	2,2	2,0	2,0	-	1,9	1,4
Presentación del rollo			N 20.1	N 24.1	N 27.1	N 28.1	N 34.1	N 47.1
Largo	m		110 55	110 55	110 55	110 55	110 55	110 55
Largura	m		3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8

Fuente: Maccaferri, 2014

MACCAFERRI		ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Rev. 12; Fecha 20.01.2011		
GEOGRILLAS Y GEOCOMPUESTOS PARA APLICACIONES DE REFUERZO DE ASFALTO		MACGRID® AR gama .7		
<p>MACGRID® AR .7 y el compuesto tipo AR G.7 (geogrilla en combinación con un geotextil no tejido) son estructuras planas que consisten en filamentos de fibra de vidrio preparados en forma de rejilla con malla cuadrada de polimérico recubierto y <i>-a solicitud-</i> con un adhesivo sensible a la presión (AR A.7). La gama completa de MACGRID AR® material ha sido desarrollado especialmente para el refuerzo de asfalto (es decir, carreteras, aeropuertos) y usos industriales de pavimento, además el uso de este geocompuesto reduce la deformación de los pavimentos y proporciona importante incremento en su vida útil.</p>				
MACGRID® AR		5.7	5A.7	5G.7
Propiedades Mecánicas				
Resistencia mínima a la tracción - Dirección longitudinal ⁽¹⁾	kN/m	50	50	50
Deformación típica en la carga máxima - Dirección longitudinal	%	2.5 ± 1	2.5 ± 1	2.5 ± 1
Resistencia mínima a la tracción - Dirección transversal	kN/m	50	50	50
Deformación típica en la carga máxima - Dirección transversal ⁽¹⁾	%	2.5 ± 1	2.5 ± 1	2.5 ± 1
Módulo de Young	GPa	76	76	76
Propiedades Físicas - Químicas				
Estructura de la Geogrilla		Filamentos de fibra de vidrio		
Revestimiento		Bitumen compatible con polímero		
Sensible a la presión adhesiva		No	Si	No
Separación del geotextil no tejido impregnado con bitumen compatible recubrimiento de polímero		No	No	Si
Temperatura de trabajo	°C	desde -100 hasta +280		
Punto de Fusión	°C	1000		
Masa por unidad - Valor nominal	g/m ²	275	290	300
Dimensión de abertura de las mallas - Valor nominal ⁽²⁾	mm	25 x 25		
Ancho del rollo - Valor nominal ⁽³⁾	m	desde 2.0 hasta 5.3		
Largo del rollo - Valor nominal	m	100		

Fuente: Maccaferri, 2011