Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe EIC-Lanamme-INF-0819-2024

DESEMPEÑO A FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DE LOS MATERIALES COMPONENTES

Preparado por:
Unidad de Investigación en Infraestructura y Transportes (UIIT)

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

San José, Costa Rica

Septiembre 2024

1. Informe EIC-Lanamme-INF-0819-2024	2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Desempeño a fatiga de mezclas asfálticas en función de los materiales componentes	**4. Fecha del Informe** **27 de septiembre del 2024**

7. Organización y dirección

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.
Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440

8. Notas complementarias

9. Resumen

En este informe se presentan los resultados del análisis de la base de datos de mezclas asfálticas a las que se les ha realizado el ensayo de susceptibilidad al agrietamiento por fatiga mediante la viga a flexotracción (AASHTO T321) utilizando el criterio de falla del 50 % de la rigidez inicial. Además, se relacionan estos resultados con los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

10. Palabras clave	11. Nivel de seguridad:	12. Núm. de páginas
Investigación, transferencia de conocimiento, Ley 8114, fatiga, volumetría, MAC.	Ninguno	70

13. Preparado por:

GIANLUCA CORAZZARI HERRERA (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-1695-0915.
Fecha declarada: 24/10/2024 01:10:06 PM
Esta es una representación gráfica únicamente,
verifique la validez de la firma.

Ing. Gianluca Corazzari Herrera
Investigador UIIT

14. Revisado por:	15. Revisado y aprobado por:
FABIAN ELIZONDO ARRIETA (FIRMA) Firmado digitalmente por FABIAN ELIZONDO ARRIETA (FIRMA) Nombre de reconocimiento (DN): serialNumber=CPF-01-0928-0895, sn=ELIZONDO ARRIETA, givenName=FABIAN, c=CR, o=PERSONA FISICA, ou=CIUDADANO, cn=FABIAN ELIZONDO ARRIETA (FIRMA) Fecha: 2024.10.24 13:36:16 -06'00' **Ing. Fabián Elizondo Arrieta** **Coordinador UIIT**	Firmado digitalmente por ANA LUISA ELIZONDO SALAS (FIRMA) Fecha: 2024.10.24 16:20:38 -06'00' **Ing. Ana Luisa Elizondo Salas** **Coordinadora PITRA**

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción 8
1.1. Objetivos 9
1.1.1. Objetivo general 9
1.1.2. Objetivos específicos 9
2. Marco teórico 11
2.1. Fatiga de la mezcla asfáltica 11
2.1.1. Fatiga de abajo hacia arriba 12
2.1.2. Fatiga de arriba hacia abajo 12
2.2. Modelos de susceptibilidad al agrietamiento por fatiga 14
2.2.1. Modelo Shell 14
2.2.2. Modelo del Instituto del Asfalto 15
2.2.3. Modelo SHRP 16
2.2.4. Modelo de la MEP-DG 16
2.3. Vida a fatiga de la mezcla asfáltica compactada sujeta a flexión repetida (AASHTO T321-17) 18
2.3.1. Resumen del procedimiento de ensayo 18
2.3.2. Criterios de falla 19
2.4. Normativa nacional referida a la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga (CR-2020) 22
2.5. Parámetros incluidos en el análisis de resultados 23
2.5.1. Número de repeticiones en el ensayo de viga a flexotracción (AASHTO T321) (N) 23
2.5.2. Porcentaje de ligante asfáltico por peso total de mezcla (P_b PTM) 23
2.5.3. Rigidez inicial del espécimen del ensayo de viga a flexotracción (AASHTO T321) (E) 24
2.5.4. Vacíos de aire (V_a) 25
2.6. Limitaciones del análisis de resultados 25
2.6.1. Gravedad específica bruta seca de los agregados (G_{sb}) 26
2.6.2. Gravedad máxima teórica (G_{mm}) 26
2.6.3. Porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba}) 26
2.6.4. Porcentaje de asfalto efectivo (P_{be}) 27
2.6.5. Relación polvo/asfalto (P/A) 27

3. Datos considerados en el estudio 28
3.1. Mezclas asfálticas elaboradas en planta 29
3.2. Mezclas asfálticas elaboradas en el LanammeUCR 30
4. Resultados 31
4.1. Análisis exploratorio de la base de datos 31
4.2. Diferencias en el Número de Ciclos asociado a mezclas convencionales y modificadas según su contenido de asfalto 36
4.3. Cumplimiento de las especificaciones nacionales (CR-2020) 40
4.4. Diferencias en el Número de Ciclos para la falla dependiendo de la planta productora 47
4.5. Diferencias en el número de ciclos asociado a mezclas asfálticas producidas en planta y en laboratorio 52
4.6. Análisis de precios de las mezclas convencionales y modificadas en Costa Rica 55
4.7. Modelos de regresión lineal múltiple para el Número de ciclos 56
4.8. Valoración de las especificaciones de susceptibilidad al agrietamiento por fatiga del CR-2020 en función de las mezclas analizadas 63
5. Conclusiones 66
5.1. Sobre las correlaciones entre el número de ciclos del ensayo de viga a flexotracción y las variables volumétricas 66
5.2. sobre el cumplimiento de la normativa nacional para la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga 67
5.3. Sobre la variabilidad de los resultados de ensayo 68
5.4. Sobre el análisis de costo general en relación con el desempeño, la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga y el cumplimiento de la normativa 69
6. Referencias Bibliográficas 70

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la evolución de la fatiga de arriba hacia abajo 13
Figura 2. Mecanismo de fractura por fatiga de arriba hacia abajo en MAC de poco espesor 14
Figura 3. Fuerza vs ciclos de carga en ensayo de flexión en 4 puntos..... 20
Figura 4. Rigidez vs número de ciclos en ensayo de flexión en 4 puntos..... 20
Figura 5. Producto de rigidez y ciclos de carga vs ciclos de carga en ensayo de tracción indirecta 21
Figura 6. Distribución de las muestras de acuerdo con la modificación del asfalto 30
Figura 7. Correlación con N° Ciclos T321 (por deformación) 31
Figura 8. Mapa de calor de correlación (600 µs) 33
Figura 9. Mapa de calor de correlación (400 µs) 33
Figura 10. Mapas de calor de la correlación, mezclas modificadas, por planta y deformación 35
Figura 11. Comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P1 M2) 37
Figura 12. Comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P2 M1) 38
Figura 13. Comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P3 M1-F) 39
Figura 14. Gráficos de cajas y bigotes para número de ciclos, por planta y tipo de mezcla, especificaciones de fatiga CR-2020 41
Figura 15. Gráficos de cajas y bigotes para número de ciclos, mezclas modificadas en laboratorio, especificaciones de fatiga CR-2020 45
Figura 16. Número de ciclos promedio (N) vs. Porcentaje de asfalto (Pb), por planta productora 47
Figura 17. N ° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales, por planta..... 48
Figura 18. Gráficos de radar para mezclas modificadas de plantas P1, P2, P3 y todas las mezclas convencionales, por deformación..... 50
Figura 19. Gráficos de cajas y bigotes para número de ciclos de mezclas modificadas en planta y en laboratorio 52
Figura 20. Gráficos de cajas y bigotes para rigidez inicial de mezclas modificadas en planta y en laboratorio 55
Figura 21. Gráfico de cajas y bigotes para los precios de la MAC, por tipo de mezcla..... 55
Figura 22. Precios y cantidades de mezcla asfáltica para mantenimiento (2012-2020).... 56
Figura 23. Coherencia de las especificaciones CR-2020 (mezclas modificadas) 64

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

TABLA DE CUADROS

Cuadro 1. Intervalos para la toma de datos durante el ensayo 19
Cuadro 2.Tipos de mezcla asfáltica en caliente de acuerdo con su uso 22
Cuadro 3. Requisitos de desempeño para mezclas asfálticas 23
Cuadro 4. Detalle de la base de datos 28
Cuadro 5. Detalle de las muestras por planta productora 29
Cuadro 6.Resultados de la prueba de hipótesis de la comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P1 M2) 37
Cuadro 7. Resultados de la prueba de hipótesis de la comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P2 M1) 38
Cuadro 8. Resultados de la prueba de hipótesis de la comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P3 M1-F) 40
Cuadro 9. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020, por tipo de mezcla 42
Cuadro 10. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020, por planta y tipo de mezcla 43
Cuadro 11. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020, por deformación unitaria, tipo de mezcla, planta y rango de porcentaje de asfalto 44
Cuadro 12. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020, por modificante y procedencia para mezclas producidas en laboratorio 46
Cuadro 13. Estadísticas descriptivas de las mezclas modificadas y convencionales, por deformación 49
Cuadro 14. Resumen de los datos de número de ciclos, porcentaje de asfalto y rigidez inicial, por planta 51
Cuadro 15. Resumen de propiedades de las mezclas elaboradas en planta y en laboratorio 53
Cuadro 16. Variables y parámetros para las regresiones 57
Cuadro 17. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas de planta 58
Cuadro 18. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas de planta (ensayo a deformación de 400 µs) 58
Cuadro 19. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas de planta (ensayo a deformación de 600 µs) 59
Cuadro 20. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de planta (ensayo a deformación de 400 µs) 59
Cuadro 21. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de planta (ensayo a deformación de 600 µs) 60
Cuadro 22. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P1 (ensayo a deformación de 400 µs) 60
Cuadro 23. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P1 (ensayo a deformación de 600 µs) 61
Cuadro 24. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P2 (ensayo a deformación de 400 µs) 61

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Cuadro 25. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P2 (ensayo a deformación de 600 µs) 61
Cuadro 26. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P3 (ensayo a deformación de 400 µs) 62
Cuadro 27. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P3 (ensayo a deformación de 600 µs) 62
Cuadro 28. Resumen de las regresiones lineales múltiples para cada planta principal de mezcla modificada (por deformación) 63
Cuadro 29. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020 y las especificaciones propuestas, por tipo de mezcla 65

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2023, el CONAVI en el “Informe de Ejecución Presupuestaria 2023” reportó un total de casi 70 mil millones de colones destinados al programa de conservación vial, de los cuales un 59 % estuvieron destinados a la conservación de vías asfaltadas (CONAVI, 2023). Más del 95% de la red vial nacional pavimentada está construida con mezcla asfáltica en caliente (MAC), por lo que surge la necesidad de evaluar la resistencia a la fatiga como parámetro de desempeño en las mezclas asfálticas y de las variables que inciden en ella para contar con criterios que permitan optimizar los materiales y formulaciones utilizados en Costa Rica.

Las carreteras experimentan cargas cíclicas durante su vida útil, por lo que es importante tener en cuenta la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de los materiales que componen su estructura. Esto es de suma importancia para Costa Rica, debido a que el agrietamiento por fatiga es una de las principales causas del deterioro en las mezclas asfálticas en caliente (MAC), el cual una vez presente puede acelerar el deterioro y reducir la vida útil de una estructura de pavimento de forma exponencial.

De acuerdo con el Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional (RVN) Pavimentada en Costa Rica para los años 2022-2023 realizado por el LanammeUCR, un 29 % de la Red Vial Nacional se encuentra con signos de deterioro y debe ser atendido para no incurrir en intervenciones de mayor costo en el corto plazo. Del total de la inversión de la RVN, un 24 % de los recursos no fueron usados de forma eficiente (LanammeUCR, 2024). Debido a los altos costos que tiene la construcción y el mantenimiento de la infraestructura, garantizar la eficiencia en el uso de los recursos se vuelve un tema de suma importancia.

La importancia de estudiar este deterioro de agrietamiento por fatiga recae en que puede dar pie a otro tipo de deterioros que resultan en mayores costos por intervenciones de mantenimiento o reconstrucción. Entre estos se encuentran el cuero de lagarto, desprendimiento de agregados, la reducción de la capacidad mecánica de la base y subbase debido al ingreso de agua en el material granular y también el bombeo de finos.

Tanto en Costa Rica como en otros países se ha popularizado el uso de mezclas que, comúnmente, son modificadas para aumentar su vida útil y mejorar sus características mecánicas. Es por esto que surge la necesidad de evaluar la capacidad de resistencia a la

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

fatiga y la susceptibilidad este deterioro, y de esta manera comparar la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de las MAC convencionales y las MAC modificadas. Para esto, en el país se emplea mayoritariamente el ensayo de vida a fatiga en vigas compactadas sometidas a flexotracción (AASTHTO T321), pues se encuentra especificado en las secciones 401.03 y 402.03 del Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes de Costa Rica (CR-2020).

En el presente informe, se estudiaron datos históricos de ensayos realizados en el LanammeUCR a los que se les ha realizado este ensayo, utilizando el criterio de falla del 50 % de la rigidez inicial que estaba incluido en las versiones anteriores a la AASHTO T321-17. Se trabajó con datos de 9 plantas distintas, prestando especial atención a las plantas con datos más representativos (por cantidad de muestras presentes en la base de datos), las cuales se compararon entre sí mediante la identificación de las diferentes variables del diseño de mezcla que tienen mayor relación con la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de las MAC.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Relacionar el desempeño a fatiga de las mezclas asfálticas evaluadas previamente en el LanammeUCR con las características de sus materiales componentes, su costo y cumplimiento de especificaciones.

1.1.2. Objetivos específicos

- Crear una base de datos con los resultados de ensayo de viga a flexotracción (AASHTO T321) y con propiedades de los materiales componentes para mezclas asfálticas evaluadas en el LanammeUCR.
- Identificar correlaciones generales entre los resultados del ensayo de viga a flexotracción (AASHTO T321) y los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.
    - Comparar las correlaciones y variabilidad en los resultados de las mezclas convencionales y las mezclas modificadas.
    - Identificar la influencia de los diferentes parámetros volumétricos en relación con el parámetro de desempeño a fatiga.

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

- Analizar el desempeño de las mezclas asfálticas contenidas en la base de datos en relación con el cumplimiento de las especificaciones nacionales de agrietamiento por fatiga de mezcla asfáltica del CR-2020.
- Realizar un análisis de costo general de la mezcla asfáltica en relación con su desempeño ante la fatiga y el cumplimiento de las especificaciones vigentes.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. FATIGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

El agrietamiento por fatiga se refiere al daño progresivo que experimentan los materiales que están expuestos a cargas cíclicas. La aplicación de cargas dinámicas repetidamente genera la formación de micro-fisuras que se agrandan e interconectan conforme continúa la aplicación de cargas. Los pavimentos, por la naturaleza de su uso, están sujetos a cargas cíclicas. Debido a esto, el daño por fatiga es considerado uno de sus principales mecanismos de deterioro.

El agrietamiento por fatiga con frecuencia se produce en la huella donde las cargas pesadas se aplican. La aparición de fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo de dicho deterioro. Un estado avanzado de deterioro por fatiga resulta con la dislocación y desprendimiento de bloques de carpeta asfáltica lo que conlleva a la formación de baches en la superficie de rodamiento (Instituto Mexicano del Transporte, 2005).

La predicción del agrietamiento por fatiga es generalmente un desafío al tomar en cuenta el nivel de deformación, temperatura, frecuencia de carga y módulo de la mezcla asfáltica, así como los procesos de rigidización por envejecimiento del material asfáltico. Esto debido a que la consideración de múltiples variables genera la necesidad de relaciones múltiples que usualmente no logran establecer con certeza coeficientes de determinación que expliquen la variabilidad de los datos. Así, las predicciones normalmente se basan en el concepto de daño acumulativo.

El número permitido de repeticiones de carga está relacionado con la deformación unitaria de tracción en la parte inferior de la superficie de rodadura. Se desarrollan modelos de fatiga para predecir el número de repeticiones al fallar la capa asfáltica. La mayoría de los modelos de fatiga están relacionados con la deformación por tracción horizontal y rigidez (módulo) de la mezcla asfáltica (Adhikari y You, 2010).

Dicho número de repeticiones que la superficie es capaz de soportar se encuentra asociado a las propiedades de la MAC, materiales que la conforman y algunas condiciones del entorno. La conformación de la mezcla asfáltica determina en gran parte su resistencia a fatiga, destacando así factores determinantes como, porcentaje de asfalto, granulometría,

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

composición de los agregados, vacíos de aire, rigidez de la mezcla, tipo de curado, entre otros. De igual manera inciden las condiciones del entorno en las que se encuentra la MAC, como las temperaturas máximas y mínimas, precipitaciones y condiciones de drenaje de los suelos.

Por otra parte, los procesos de envejecimiento del ligante asfáltico que conforma la mezcla (oxidación y pérdida de volátiles) rigidizan la mezcla. Esto se relaciona con su fragilidad y una mayor susceptibilidad al fisuramiento, esta es una de las razones por las cuales los procesos de falla por fisuramiento se evidencian a mediano o largo plazo luego de la puesta en operación del pavimento.

2.1.1. Fatiga de abajo hacia arriba

El agrietamiento por fatiga clásico se inicia en las fibras inferiores de la capa asfáltica debido a la concentración de tensiones en esta región. Estas tensiones son generadas por las cargas aplicadas por los vehículos y se propagan a lo largo de la carpeta asfáltica.

En las primeras etapas de la fatiga del pavimento, las grietas comienzan como micro-fisuras que no son visibles a simple vista. Con el tiempo, estas micro-fisuras se propagan debido a la continua exposición a esfuerzos de cortante y se conectan entre sí, formando macro-fisuras que eventualmente alcanzan la superficie del pavimento. El agrietamiento por fatiga es particularmente problemático a temperaturas intermedias - bajas y climas húmedos, ya que la acción del agua en las grietas puede acelerar el proceso de agrietamiento y aumentar la frecuencia y la severidad del daño en el pavimento (Baghaee, Rehan, & Mahrez, 2011).

2.1.2. Fatiga de arriba hacia abajo

La fatiga de arriba hacia abajo también contribuye al deterioro de los pavimentos flexibles y, tal y como se ha observado, cada vez es más frecuente encontrar este tipo de deterioro en estructuras de pavimento alrededor del mundo. Este modo de falla se asocia a la fatiga debido a que se presenta ante cargas repetidas y a niveles de esfuerzo mucho más bajos que el límite del material. Se diferencia del modo de fatiga clásico debido a que las grietas en el pavimento se originan de forma longitudinal en la superficie del pavimento, y avanzan hasta alcanzar las fibras inferiores de la capa de mezcla asfáltica (Canestrari & Ingrassia, 2020).

En la mayoría de los casos, al igual que con la fatiga de abajo hacia arriba, la fatiga de arriba hacia abajo inicia con la formación de una grieta longitudinal paralela y cercana a la huella de las ruedas de los vehículos. Conforme continúa el paso de los vehículos se forman más grietas paralelas a la grieta inicial y, finalmente, se forman pequeñas grietas transversales que unen las grietas longitudinales formando el patrón conocido como piel de cocodrilo. Esta evolución se observa gráficamente en el esquema de la Figura 1.

Algunas observaciones de campo indican que el agrietamiento por fatiga de arriba hacia abajo en capas asfálticas gruesas o muy rígidas se debe a los esfuerzos cortantes que generan las llantas de los vehículos cerca de la superficie del pavimento. Conforme estos esfuerzos cortantes generan daño bajo la superficie de la mezcla asfáltica se incrementan los esfuerzos de flexión en la superficie que propician la aparición de grietas en la superficie. La continuación de aplicación de cargas de tránsito junto con la redistribución de esfuerzos hace que el deterioro por cortante avance en profundidad y, por consiguiente, que la grieta longitudinal avance hasta el final de la capa de mezcla asfáltica (Canestrari & Ingrassia, 2020).

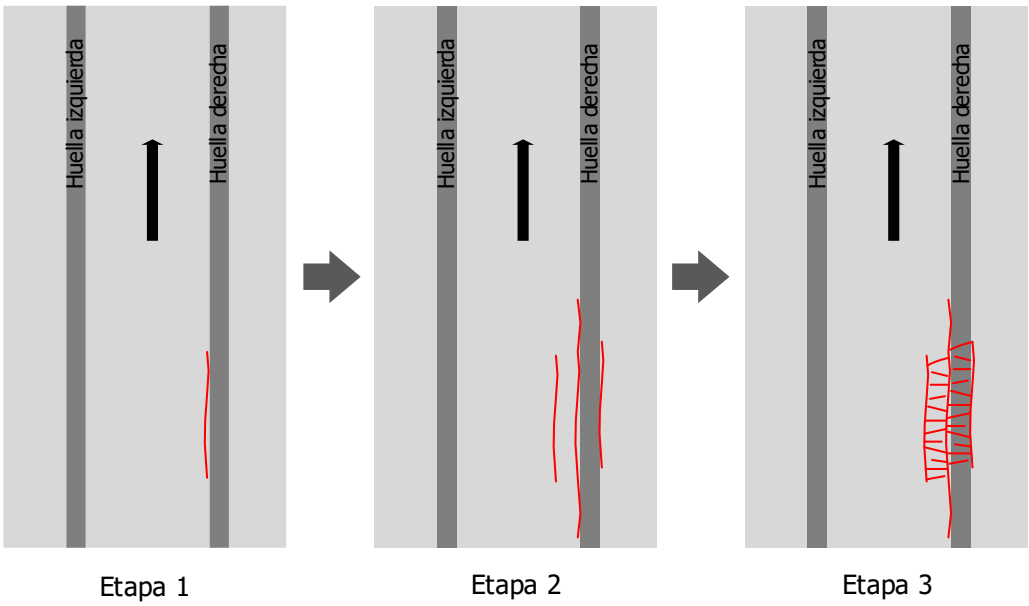

Figura 1. Esquema de la evolución de la fatiga de arriba hacia abajo
Fuente: Canestrari, 2020
Modificado por: Corazzari, 2021

Por otra parte, para las capas asfálticas de menor espesor se ha observado que las cargas de tránsito generan esfuerzos de flexión en la superficie, más separados de la huella de los vehículos. Este mecanismo de falla se muestra en la Figura 2.

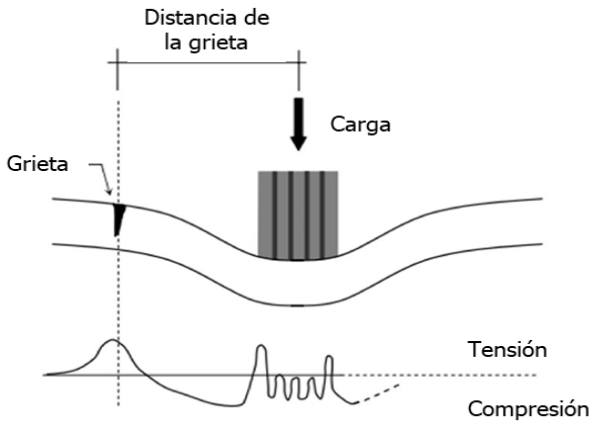

Figura 2. Mecanismo de fractura por fatiga de arriba hacia abajo en MAC de poco espesor
Fuente: Canestrari, 2020
Modificado por: Corazzari, 2021

Este fenómeno es agravado por la oxidación y pérdida de volátiles que experimenta el ligante asfáltico en la superficie producto de los procesos de producción, colocación y efectos ambientales a los que es expuesta la mezcla asfáltica.

2.2. MODELOS DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA

2.2.1. Modelo Shell

Estas ecuaciones mecanístico-empíricas fueron desarrolladas a partir de ensayos de viga a flexotracción a distintas condiciones de temperatura y diseño de mezcla. Se desarrollaron dos modelos, uno para el ensayo a deformación controlada para capas delgadas (<50 mm) y otro para esfuerzo controlado para capas gruesas (>150 mm).

Este modelo considera aspectos del material como el volumen de asfalto en la mezcla, el módulo dinámico de la mezcla asfáltica y la consistencia del ligante asfáltico, a través del grado de penetración (PI). Adicionalmente, considera la respuesta mecánica de la estructura al incorporar la deformación unitaria a tensión. Este modelo no cuenta con un factor de corrección de campo. Las funciones tal como las detalla Pellinen *et al* (2004), se describen a continuación.

Para esfuerzo controlado:

$$N_f = [0{,}025PI - 0{,}00126PI \cdot V_b + 0{,}00673 \cdot V_b - 0{,}01267]^5 * {\epsilon_t}^{-5} * {S_m}^{-1.4} \quad [1]$$

Para deformación unitaria controlada:

$$N_f = [0{,}17PI - 0{,}0085PI \cdot V_b + 0{,}04543 \cdot V_b - 0{,}112]^5 * {\epsilon_t}^{-5} * {S_m}^{-1.8} \quad [2]$$

Donde:

N_f = ciclos a la falla por fatiga

PI = índice de penetración

V_b = volumen de asfalto efectivo (%)

ϵ_t = deformación unitaria inicial por tensión (in/in)

S_m = rigidez de la mezcla (psi)

2.2.2. Modelo del Instituto del Asfalto

Este modelo fue desarrollado ensayando una mezcla con 11 % de volumen de asfalto efectivo y un contenido de vacíos del 7 %, utilizando el ensayo de viga a flexotracción. El modelo puede utilizarse para mezclas con otras características volumétricas mediante la incorporación de los factores C y M, que se muestran en las siguientes ecuaciones obtenidas de Pellinen *et al* (2004).

$$N_f = \mathrm{A} * 0{,}00432\mathrm{C} * {\epsilon_t}^{-3.291} * |E|^{-0.854} \quad [3]$$

$$C = 10^M \quad [4]$$

$$\mathrm{M} = 4{,}84 * \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} - 0{,}69\right) \quad [5]$$

Donde:

N_f = ciclos a la falla por fatiga

E = módulo dinámico de rigidez (psi)

A = 18,4 FSF (factor de corrección campo vs laboratorio)

C y M = factores de corrección volumétrica

V_{beff} = volumen de asfalto efectivo (%)

V_a = contenido de vacíos de aire (%)

Igual que el modelo de Shell, este modelo toma en cuenta información relacionada con el material (volumen de asfalto efectivo, módulo dinámico de la mezcla asfáltica y vacíos de aire), así como la respuesta de la estructura mediante la deformación unitaria a tensión. También incluye un factor de corrección de corrección de campo (A).

2.2.3. Modelo SHRP

El Modelo SHRP es diseñado por el Strategic Highway Research Program (1994) y propone un acercamiento a la predicción de fatiga y agrietamiento en relación con el módulo complejo de pérdida por flexión y analiza interacciones asfalto-agregado.

Para la generación de este modelo básico de fatiga basado en la deformación unitaria, se calibraron en primer lugar varios modelos discretizando las variables en varios grupos distintos. Seguidamente se procedió a calibrar el modelo general utilizando todos los datos disponibles, que procedían de distintos experimentos realizados anteriormente. Específicamente el modelo considera entre otras variables, el contenido de vacíos, la temperatura de la mezcla, la deformación unitaria aplicada, contenido de asfalto y caracterización de agregados.

De esta manera, por medio de diversas pruebas para la validación del modelo, se logra generar una ecuación que con pruebas estadísticas mostró un coeficiente de determinación de 0,8 demostrando así alta fiabilidad al menos para las muestras evaluadas (Institute of Transportation Studies-University of California, 1994). Así finalmente se propone:

$$N_f = 2{,}738 \text{ x } 10^5 * \exp(0{,}077 * \text{VFA}) * \epsilon_t^{-3{,}624} * S''_0{}^{-2{,}72} \qquad [6]$$

Donde:

N_f = ciclos a la falla por fatiga

ϵ_t = deformación unitaria inicial por tensión (in/in)

S''_0 = rigidez inicial (obtenido de la prueba en viga a flexión al ciclo 50, psi)

VFA = vacíos llenos de asfalto (%)

2.2.4. Modelo de la MEP-DG

La Guía de Diseño Mecanística Empírica (MEPDG), basada en fundamentos mecanicistas-empíricos fue desarrollada por el NCHRP de Estados Unidos para reemplazar el enfoque

empírico del método AASHTO 93. Este modelo requiere cuantiosa información de tránsito y clima y se basa en determinar tensiones y deformaciones en el pavimento, para así evaluar el desempeño del pavimento en función de indicadores. Considera niveles jerárquicos de las variables y parámetros de entrada, a partir de la fuente de información y los errores asociados a la obtención de esta, para posteriormente calcular el daño incremental del pavimento (Riffo, 2013).

Los principales productos del modelo de MEPDG son valores recomendados para criterios como IRI, deformación permanente, deterioro tipo piel de cocodrilo y agrietamiento transversal y longitudinal. Existen 3 niveles de precisión y confianza del modelo dependiendo de los requerimientos de la carretera según los describe Martínez y Pérez (2015):

- Nivel 1: corresponde a caminos de alto flujo de tránsito y los datos de entrada deben ser obtenidos de pruebas, monitoreo, información real de estaciones y otros.
- Nivel 2: nivel más utilizado en diseño promedio, los datos de entrada se obtienen de información de agencias oficiales y correlaciones empíricas.
- Nivel 3: corresponde a caminos de bajo flujo de tránsito y los datos de entrada suelen ser obtenidos de información existente de otros casos y se consideran múltiples supuestos de los materiales.

El modelo propuesto se muestra en la ecuación [7:

$$N_f = 0{,}00342 \cdot K_{f1} \cdot C \cdot k'_1 \cdot \beta_{f1} * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{K_{f2} \cdot \beta_{f2}} * \left(\frac{1}{E}\right)^{K_{f3} \cdot \beta_{f3}} \qquad [7]$$

Donde:

N_f = ciclos a la falla por fatiga

ϵ_t = deformación inicial por tensión (in/in)

E = rigidez de la mezcla (psi)

$K_{f1,f2,f3}$ = factores de ajuste a partir de calibración con información global de desempeño de pavimentos a largo plazo (LTPP por sus siglas en inglés)

$\beta_{f1,f2,f3}$ = factores de ajuste a partir de calibración con información local de LTPP

k'_1 = espesor ajustado acorde a la carga y tipo de agrietamiento

$C =$ factor de ajuste de laboratorio-campo que depende de características volumétricas de la mezcla (definido en la ecuación [4])

2.3. VIDA A FATIGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA SUJETA A FLEXIÓN REPETIDA (AASHTO T321-17)

Esta norma provee un procedimiento para determinar la vida a fatiga y la energía de fatiga de especímenes de mezcla asfáltica en caliente compactada de 380 mm de largo, con una sección transversal de 50 mm por 63 mm. Estos especímenes son obtenidos mediante el corte de bloques de MAC, que pueden ser compactados en laboratorio o en campo.

2.3.1. Resumen del procedimiento de ensayo

El procedimiento brinda especificaciones para especímenes elaborados a partir de MAC mezclada en laboratorio, en planta y para especímenes obtenidos a partir de bloques extraídos de estructuras de pavimento construidas.

Una vez que se obtiene el bloque de MAC compactada, se deben descartar al menos 6 mm de las caras de este, con la finalidad de eliminar secciones con alto volumen de vacíos. Las dimensiones finales de los especímenes deben ser: 380 ± 6 mm de longitud, 50 ± 6 mm de altura y 63 ± 6 mm de ancho.

El procedimiento establece los siguientes pasos:

1. Medición del espécimen: medir altura y ancho en tres puntos distintos dentro de los 100 mm centrales del espécimen.
2. Pegado de objetivo en el eje neutro de la viga: la deformación de la viga debe referenciarse al eje neutro de la misma. Una práctica común es fijar una tuerca con epóxico en la ubicación de este eje. También se puede colocar el LVDT sobre el espécimen.
3. Acondicionamiento del espécimen: se debe colocar el espécimen en un ambiente que se encuentre a la temperatura de la prueba durante 2 horas.
4. Colocación del espécimen en el equipo.
5. Colocación del bloque LVDT: atornillar el bloque a la tuerca pegada al espécimen. Prensar el bloque de manera que la lectura sea cercana a cero.
6. Configuración del ensayo: configurar el nivel de deformación unitaria y la frecuencia de carga para el ensayo. El nivel de deformación unitaria debe ser tal que se asegure que

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

el espécimen resista al menos 10 000 ciclos para llegar al criterio de falla. La carga se aplica de forma sinusoidal.

7. Requerimientos de la toma de datos: en el siguiente cuadro se muestran los requerimientos mínimos para la toma de datos durante el ensayo:

Cuadro 1. Intervalos para la toma de datos durante el ensayo

Repeticiones	Intervalos (espacios iguales entre rangos)	Ciclos en cada punto de colección incluido en promedio reportado
0 a 100	1 a 10, luego cada 10 a 100	5 (de 1 a 10 reportar número exacto)
100 a 1000	10	5
1000 a 10000	40 igualmente espaciados	5
10000 a 100000	Al menos 1 cada 1000	5
100000 al final de la prueba	Al menos 1 cada 10000	5

8. Para cada ciclo de carga se debe determinar la rigidez a flexión, ángulo de fase, esfuerzo máximo pico-a-pico y deformación máxima pico-a-pico.
9. Para cada ciclo se debe calcular el producto de la rigidez a flexión y el número de ciclo de carga, para obtener la rigidez normalizada (S x N). En la normativa nacional todavía se utiliza el criterio de falla del 50 % de la rigidez inicial, los datos utilizados en este informe fueron obtenidos bajo este criterio.
10. Finalizar la prueba en el momento en que el producto S x N ha disminuido un 15 % respecto a su valor pico.

2.3.2. Criterios de falla

2.3.2.1. Criterio 50% Rigidez inicial (S)

Entre los primeros estudios específicos sobre el papel de la rigidez en la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga destacan los realizados por Pronk y Hopman (1990) y Tayebali et al (1993). Estos investigaron la relación entre la rigidez y el número de ciclos de carga hasta la falla en materiales asfálticos, utilizando la prueba de fatiga por tracción indirecta.

Múltiples autores sostienen que dicho valor de 50 % para el criterio fue determinado de manera arbitraria. Sin embargo, Al-Khateeb y Shenoy (2004) exponen que varios autores

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

han expresado que la rigidez de los materiales asfálticos en el punto de falla era típicamente alrededor del 50 % de la rigidez máxima, ya que a partir de este punto la rigidez disminuye abruptamente y con esto la fuerza necesaria para causar la deformación de control. Lo anterior es demostrado en las figuras a continuación.

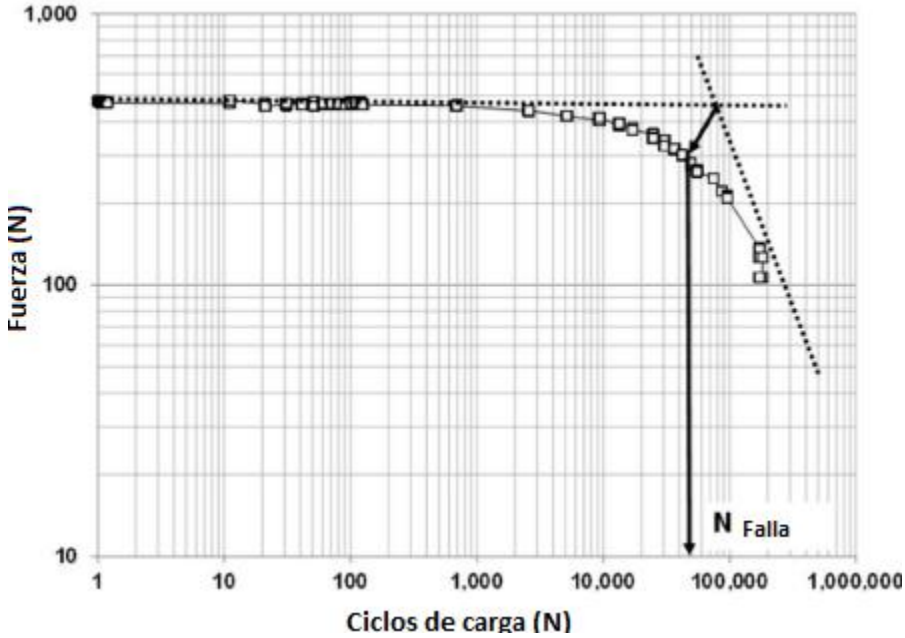

Figura 3. Fuerza vs ciclos de carga en ensayo de flexión en 4 puntos
Fuente: Reyes, Alvarez y Limón, 2012

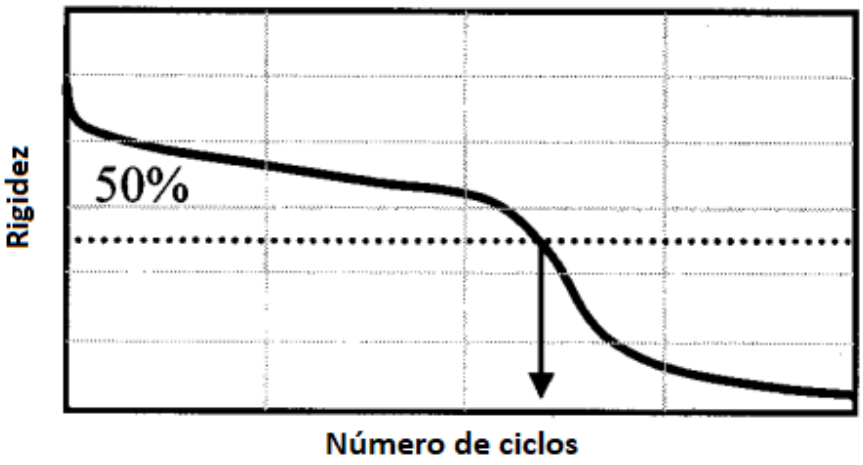

Figura 4. Rigidez vs número de ciclos en ensayo de flexión en 4 puntos
Fuente: Lundstrom, Benedetto y Isacsson, 2004

Estudios posteriores de otros investigadores como Hussain Bahia et al (1998) confirmaban esta observación, y el criterio del punto de falla del asfalto como el 50 % de la rigidez inicial

se ha vuelto ampliamente aceptado en el campo de la ingeniería de pavimentos. Sin embargo, a pesar de que el criterio fue adoptado provisionalmente para definir la falla en el AASHTO TP8-94 y que se usó en múltiples versiones de la norma AASHTO T 321, no es utilizado actualmente en estándares AASHTO. No obstante, en la normativa establecida en el CR-2020 se continúa aplicando este criterio de falla.

2.3.2.2. Criterio Rigidez (S) x Número de ciclos (N)

Este criterio fue desarrollado mediante el estudio de la relación entre rigidez y ciclos de carga en mezclas asfálticas utilizando el ensayo de fatiga por tracción indirecta. Con esto se observó que la rigidez de los materiales asfálticos disminuye al aumentar los ciclos de carga, pero la tasa de disminución de la rigidez varía según la magnitud de la carga, reduciendo cuando el ensayo se realiza a deformación constante, por lo que con el criterio S x N se toma en cuenta la variación progresiva de la rigidez. Además, claramente el producto de la rigidez y los ciclos de carga aumenta con el aumento de ciclos hasta que alcanza un valor máximo en el punto de falla donde empieza a decrecer, como se observa en la figura a continuación.

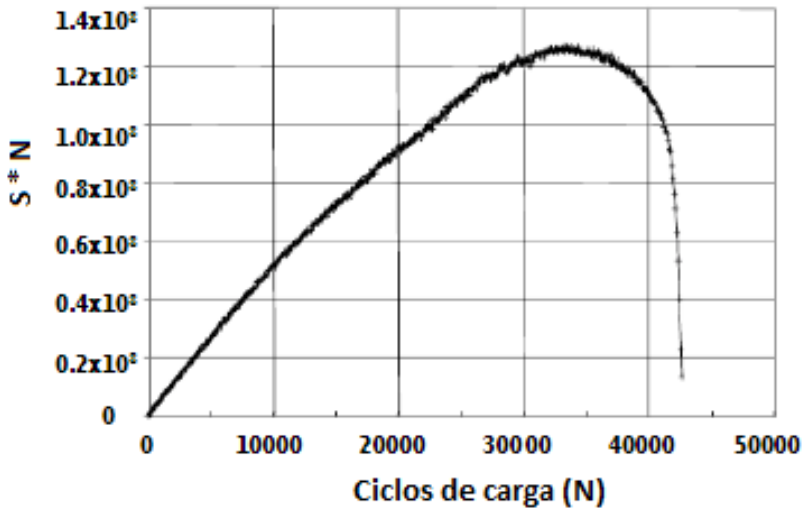

Figura 5. Producto de rigidez y ciclos de carga vs ciclos de carga en ensayo de tracción indirecta
Fuente: Rowe, et al (2000)

Según Rowe, et al. (2000) cuando la tasa de daño se acelera a medida que se forma una grieta aguda, el producto S x n se reduce. El máximo producto indica el punto de transición entre la formación de microfisuras y la propagación de una fisura macroscópica.

Así, posteriormente se estableció en la norma AASHTO T321-14, que incorporó el criterio del punto de falla como el producto máximo de rigidez y ciclos de carga. Desde entonces, este criterio se utiliza en varios estándares y protocolos de prueba para evaluar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas alrededor del mundo. Entre las principales agencias y países que consideran este criterio para diseñar pavimentos asfálticos destacan:

- Estados Unidos: Este método es utilizado por la Asociación Estadounidense de Carreteras y Transporte (AASHTO).
- Canadá: Este método es utilizado por el Programa de Investigación de Carreteras de la Superpavimentación.
- Australia: Este método es utilizado por la Asociación de Autoridades de Transporte de Australia y Nueva Zelanda (Austroads).
- Reino Unido: Este método es utilizado por la Agencia de Carreteras Nacionales.
- Brasil: Este método es utilizado por el Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte (DNIT).

2.4. NORMATIVA NACIONAL REFERIDA A LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA (CR-2020)

Primeramente, se destaca que las especificaciones de susceptibilidad al agrietamiento por fatiga son establecidas según el tipo de mezcla, considerando el volumen de tránsito y el tipo de capa en el que se empleará la mezcla asfáltica. El CR-2020 (MOPT, 2020) establece los siguientes tipos de mezcla asfáltica:

Cuadro 2.Tipos de mezcla asfáltica en caliente de acuerdo con su uso

Designación	Aplicación por tipo de mezcla y volumen de tránsito
Mezcla AB	Mezcla asfáltica en caliente para, capas o sobrecapas asfálticas y bacheo donde la superficie existente consiste en mezcla asfáltica. Hasta 10 millones ESAL´s (volumen medio)
Mezcla C	Capas asfálticas intermedias (alto desempeño). Más de 10 millones ESAL´s (alto volumen)
Mezcla D	Capas asfálticas de rodadura (alto desempeño). Más de 10 millones ESAL´s (alto volumen)

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Considerando las condiciones anteriormente descritas, se presentan los requisitos de desempeño que se deben cumplir para la aceptación del diseño de mezcla y para las actualizaciones del diseño que se realicen, esto se describe a continuación.

Cuadro 3. Requisitos de desempeño para mezclas asfálticas

Parámetro		Requisito mezcla			Método de ensayo
		Tipo AB	Tipo C	Tipo D	
Fatiga a flexotracción para las siguientes deformaciones unitarias (ciclos de carga)	400 µm	-	≥ 450000	≥ 300000	AASHTO T321
	600 µm	-	≥ 50000	≥ 25000	

De lo que se extrae para la fatiga a flexotracción, se debe cumplir con límites entre 300000 y 450000 repeticiones para 400 µs, según el tipo de mezcla y entre 50000 y 25000 repeticiones para 600 µs, según el tipo de mezcla igualmente.

2.5. PARÁMETROS INCLUIDOS EN EL ANÁLISIS DE RESULTADOS

2.5.1. Número de repeticiones en el ensayo de viga a flexotracción (AASHTO T321) (N)

El número de repeticiones N corresponde a la cantidad de cargas necesarias para alcanzar el fallo por fatiga. En específico, de acuerdo con la normativa costarricense y con los resultados de ensayo utilizados en este informe, se vincula este número al momento en que la mezcla alcanza un 50% de su rigidez inicial según lo estipula AASHTO en su norma T321. Este criterio se utilizó hasta su edición del 2007 rectificada en 2011, AASHTO T321-07 (2011). Posteriormente, en la edición del 2014, se incluyó el criterio de falla de la rigidez normalizada (S x N).

2.5.2. Porcentaje de ligante asfáltico por peso total de mezcla (P_b PTM)

Se refiere al porcentaje de ligante asfáltico en una mezcla asfáltica respecto al peso total de la muestra de mezcla asfáltica (PTM). Para obtenerlo, se lleva al ligante asfáltico a temperaturas superiores a su flash point, de manera que este se queme y se pueda determinar la masa de ligante mediante ignición. En primer lugar, se debe determinar la masa seca del espécimen. Luego se coloca el espécimen dentro del horno hasta que el cambio de la masa de este no exceda el 0.01 % durante 3 minutos consecutivos.

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Los resultados de contenido de ligante pueden verse afectados debido al tipo de agregado y al horno de ignición utilizado para la prueba. Por esta razón, se deben determinar factores de corrección por contenido de agua y por el tipo de agregado.

2.5.3. Rigidez inicial del espécimen del ensayo de viga a flexotracción (AASHTO T321) (E)

El módulo de rigidez, en lo que respecta a la flexión de la viga, es definida como una relación entre el esfuerzo de tracción máximo y la deformación por tracción máxima. A medida que el daño por fatiga se acumula debido a carga repetida, el módulo de rigidez de la mezcla se reduce. Este parámetro según AASHTO T321 es determinado como se expone en la ecuación.

$$S = \left[\frac{\sigma_t}{\epsilon_t}\right] \qquad [8]$$

El esfuerzo máximo pico a pico σ_t está dado por:

$$\sigma_t = \left[\frac{0{,}357 * P}{b * h^2}\right] \qquad [9]$$

Donde:

P = Carga pico a pico aplicada (N)

b = ancho del espécimen (m)

h = altura del espécimen (m)

La deformación unitaria máxima pico a pico ϵ_t está dada por:

$$\epsilon_t = \left[\frac{12\,\delta h}{3L^2 - 4a^2}\right] \qquad [10]$$

Donde:

δ = Deflexión máxima pico a pico en el centro de la viga (m)

a = espacio entre abrazaderas (0,119 m)

L = longitud de la viga (0,357 m)

La investigación de Pellinen *et al* (2004), sugiere que hasta el 80 % de la rigidez de la mezcla lo proporciona la rigidez del ligante asfáltico. De igual manera, la vida de fatiga de la mezcla bituminosa según AASHTO T321-07 se define como el número de ciclos correspondiente al 50 % de la rigidez inicial módulo. En el estándar AASHTO T321-07

(2007) sugiere el uso de una relación exponencial para la comparación paramétrica de los datos del módulo de rigidez. Adicionalmente, en el estándar se considera la rigidez inicial como el valor de este parámetro alcanzado en el ciclo número 50 de la prueba (Varma *et al*, 2016). Esto para lograr la medición en una condición más similar entre especímenes, descartando errores que se podrían dar al medir antes de realizar ninguna carga, vinculados a la colocación irregular de espécimen principalmente.

2.5.4. Vacíos de aire (V_a)

Se refiere al volumen total de aire contenido entre las partículas de agregado recubiertas por asfalto, en la mezcla asfáltica compactada. Asegurarse de que la mezcla asfáltica tenga los vacíos apropiados contribuye a la estabilidad de la mezcla asfáltica, mejora su comportamiento ante cargas de tráfico, permite un adecuado comportamiento ante las condiciones ambientales y también evita la exudación por post-compactación. Los vacíos de aire se expresan como un porcentaje de la relación entre la gravedad específica bruta y la densidad máxima teórica de la mezcla asfáltica.

Los vacíos de aire se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$V_a = 100 \left[\frac{(G_{mm} - G_{mb})}{G_{mm}}\right] \qquad [11]$$

Donde:

G_{mm} = Gravedad máxima teórica de la mezcla asfáltica

G_{mb} = Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada

2.6. LIMITACIONES DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se indican los parámetros que no fueron incluidos dentro del análisis de resultados. Esto se debe a que existen resultados preliminares que indican dificultades para calcular la gravedad específica y la absorción de la fracción fina de los agregados.

La norma *AASHTO T84 Gravedad específica y absorción del agregado fino* cubre esta problemática en el apéndice X1, en el que deja clara la afectación que el material que pasa la malla de 0.075 mm (N° 200) tiene en los resultados de gravedad específica y de absorción del agregado fino. Esta afectación se debe a que el relleno mineral puede formar una película que recubre el resto del agregado, o bien que, por fuerzas intermoleculares, el agua

revista las partículas de relleno mineral. Ambas situaciones dificultan la correcta determinación del estado de superficie saturada seca del agregado fino.

Ante esta situación, la norma recomienda lavar el agregado fino para eliminar las partículas con tamaño menor a 75 μm, y posteriormente asumir que la gravedad específica de estas es igual a la del agregado fino. Resultados preliminares de una investigación del LanammeUCR apuntan a que esta suposición podría no cumplirse para agregados costarricenses.

2.6.1. Gravedad específica bruta seca de los agregados (G_{sb})

La gravedad específica bruta del agregado se refiere a la relación entre la masa en aire de un volumen de agregado seco en horno, incluyendo para el cálculo del volumen la masa de agua contenida en los vacíos permeables (sin incluir los espacios interparticulares) después de haber sumergido la muestra en agua por un periodo de entre 15 y 19 horas a una temperatura dada, con el peso de un volumen equivalente de agua destilada libre de gas a una temperatura dada.

2.6.2. Gravedad máxima teórica (G_{mm})

La gravedad máxima teórica de la mezcla asfáltica se refiere a la relación entre la masa de un volumen de mezcla asfáltica sin tomar en cuenta los vacíos de aire (es decir, agregado y ligante) y la masa de un mismo volumen de agua destilada. Este volumen es obtenido mediante la colocación de la mezcla asfáltica suelta en un contenedor con agua que, posteriormente, es agitado mecánicamente y expuesto al vacío, de tal manera que el aire atrapado en la mezcla se va liberando.

2.6.3. Porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba})

Es el porcentaje del asfalto que es absorbido en los vacíos permeables del agregado mineral, expresado como un porcentaje de la masa de agregado. Esta porción del ligante asfáltico no contribuye al desempeño del material. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_{ba} = 100 \left[\frac{(G_{se} - G_{sb})}{(G_{sb} \cdot G_{se})} \right] G_b \qquad [12]$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica del agregado

G_{sb} = Gravedad específica bruta del agregado combinado

G_b = Gravedad específica del ligante asfáltico

2.6.4. Porcentaje de asfalto efectivo (P_{be})

El porcentaje de asfalto efectivo se refiere al porcentaje total de asfalto de la mezcla asfáltica menos el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado mineral. Esta porción del ligante asfáltico tiene un papel determinante en el desempeño de la mezcla. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_{be} = P_b - \left[\frac{P_{ba}}{100} \cdot P_s\right] \qquad [13]$$

Donde:

P_b = Porcentaje de ligante asfáltico

P_{ba} = Porcentaje de asfalto absorbido

P_s = Porcentaje de agregado mineral

2.6.5. Relación polvo/asfalto (P/A)

Es la relación entre el porcentaje de agregado mineral que pasa la malla de 0.075 mm (N°200) y el porcentaje de asfalto efectivo. Es un parámetro importante de controlar pues puede variar la rigidez del ligante y afectar de manera directa al desempeño de la mezcla asfáltica. Se calcula de la siguiente manera:

$$P/A = \frac{P_{\#200}}{P_{be}} \qquad [14]$$

Donde:

$P_{\#200}$ = Porcentaje de agregado mineral que pasa la malla de 0.075 mm (N°200)

P_{be} = Porcentaje de asfalto efectivo

3. DATOS CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO

Para esta investigación se utilizaron datos históricos de muestras de mezcla asfáltica existentes en el LanammeUCR a las que se les ha realizado el ensayo de vida a fatiga en vigas compactadas sometidas a flexotracción (AASHTO T321). Específicamente, la base de datos contiene la siguiente información:

Cuadro 4. Detalle de la base de datos

Categoría	Información específica	
Identificación	Número de muestra Número de informe	Empresa Planta
Agregado	Gbs agregado grueso Gbs agregado fino	Gbs agregado combinado Absorción combinada
Granulometría	Tamaño máximo nominal Porcentaje pasando 25 mm (1“) Porcentaje pasando 19 mm (¾“) Porcentaje pasando 12.5 mm (½“) Porcentaje pasando 9.5 mm (⅜“) Porcentaje pasando 4.75 mm (N°4)	Porcentaje pasando 2.36 mm (N°8) Porcentaje pasando 1.18 mm (N°16) Porcentaje pasando 0.6 mm (N°30) Porcentaje pasando 0.3 mm (N°50) Porcentaje pasando 0.075 mm (N°200)
Ligante asfáltico	Gb (15 °C) Gb (25 °C)	Tipo (modificado, convencional) Modificante (si aplica)
Volumetría MAC	Gmb mezcla compactada Gmm Va diseño Gse Pb Pba	Pbe Ps VMA VFA P/A
Resultados Fatiga (T321)	Deformación unitaria Va viga (promedio) Va viga (desv. est.) Rigidez inicial (promedio) Rigidez inicial (desv. est.)	Rigidez final (promedio) Rigidez final (desv. est.) N ciclos (promedio) N ciclos (desv. est.)

En total, se utilizó información de 130 muestras de mezcla asfáltica. La fuente de estos datos proviene, principalmente, de ensayos solicitados por la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR para mezclas utilizadas en proyectos de infraestructura vial en la red vial nacional de Costa Rica, por lo que corresponden a mezclas asfálticas ligadas a procesos de producción en plantas industriales de mezclas asfálticas. También, en menor cantidad, se obtuvieron datos de un proyecto de investigación realizado en el LanammeUCR con mezclas asfálticas preparadas en el laboratorio. El detalle de estos dos grupos de muestras se presenta a continuación.

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

3.1. MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS EN PLANTA

Estos resultados se obtuvieron a través de los ensayos que solicita la Unidad de Auditoría Técnica como parte de su labor de fiscalización de los proyectos de infraestructura vial costarricense.

Se trata de mezclas asfálticas de tamaño máximo nominal de 19.1 mm y 12.5 mm, con asfalto sin modificar, o modificado, fabricadas por 9 plantas distintas. El detalle de estas se muestra en el Cuadro 5.

Para efectos de este informe, se codificarán las plantas numerándolas del 1 al 9 (P1 a P9), siendo las 3 primeras las que concentran la mayor cantidad de muestras en la base de datos. De manera similar, los modificantes utilizados por cada planta se designarán como M1 (TER), M2 (SBR) y M1-F (TER con relleno mineral de aporte), así como Importado 1 e Importado 2 para asfaltos modificados importados utilizados en un proyecto de investigación del LanammeUCR.

Cuadro 5. Detalle de las muestras por planta productora

	Cantidad de muestras de mezcla asfáltica			
Planta	**Convencional**	**Modificado**	**Modificante**	**Total**
Planta 1 (P1)	16	21	M2	37
Planta 2 (P2)	17	19	M1	36
Planta 3 (P3)	0	19	M1F	19
Planta 4 (P4)	4	1	M1	5
Planta 5 (P5)	2	2	M1	4
Planta 6 (P6)	1	0	-	1
Planta 7 (P7)	14	0	-	14
Planta 8 (P8)	3	0	-	3
Planta 9 (P9)	0	5	M2	5
Total	**57**	**67**		**124**

En la Figura 6 se observa que el 54 % de las muestras corresponde a mezclas asfálticas con asfalto modificado. Considerando lo anterior y sumado a la proliferación del uso de mezclas asfálticas modificadas en proyectos de infraestructura vial de gran importancia en Costa Rica, este informe concentra gran parte del análisis en el comportamiento de la

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

mezcla asfáltica modificada y como este se diferencia de las mezclas asfálticas convencionales.

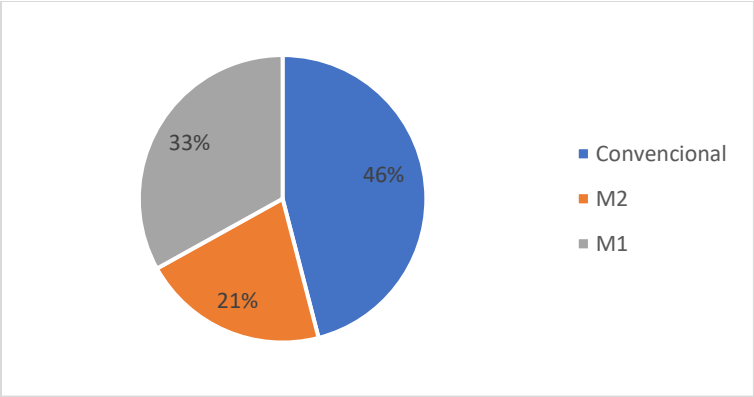

Figura 6. Distribución de las muestras de acuerdo con la modificación del asfalto

3.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS EN EL LANAMMEUCR

Esta categoría está comprendida por 6 mezclas asfálticas elaboradas para proyectos de investigación del LanammeUCR. De estas, dos corresponden a mezclas con asfalto sin modificar, y las restantes cuatro fueron elaboradas con asfaltos modificados.

Estas últimas se modificaron con polímeros que se utilizan comercialmente en Costa Rica, además, se incluyen dos mezclas con asfaltos modificados en una planta extranjera y que fueron importados al LanammeUCR con fines de investigación.

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LA BASE DE DATOS

Se inicia con un análisis exploratorio de los datos disponibles, de manera que se puedan identificar tendencias que permitan relacionar la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga, medido mediante el número de ciclos resultante del ensayo AASHTO T321, y las propiedades de sus materiales componentes o parámetros volumétricos de la MAC.

En la Figura 7 se muestran las correlaciones entre el número de ciclos (vigaNCiclosPromedio) y 5 parámetros volumétricos de la MAC y la rigidez inicial de las vigas del ensayo de fatiga. En este caso, se dividieron los resultados del ensayo de viga a flexotracción a 600 µs y 400 µs. La variable con el mayor efecto positivo en el N° de ciclos es el porcentaje de asfalto (pb). En el caso de las variables con un coeficiente de correlación negativo, tenemos las de rigidez inicial de la viga sometida a flexotracción (rigidezInicialVigaPromedio) y la gravedad máxima teórica (gmm).

También, a partir de la magnitud de los coeficientes de correlación (que se muestran en la Figura 7. C), se observa que los resultados del ensayo AASHTO T321 a 600 µs exhiben mayor correlación con los parámetros de interés que los resultados del mismo ensayo realizado a una deformación unitaria de 400 µs.

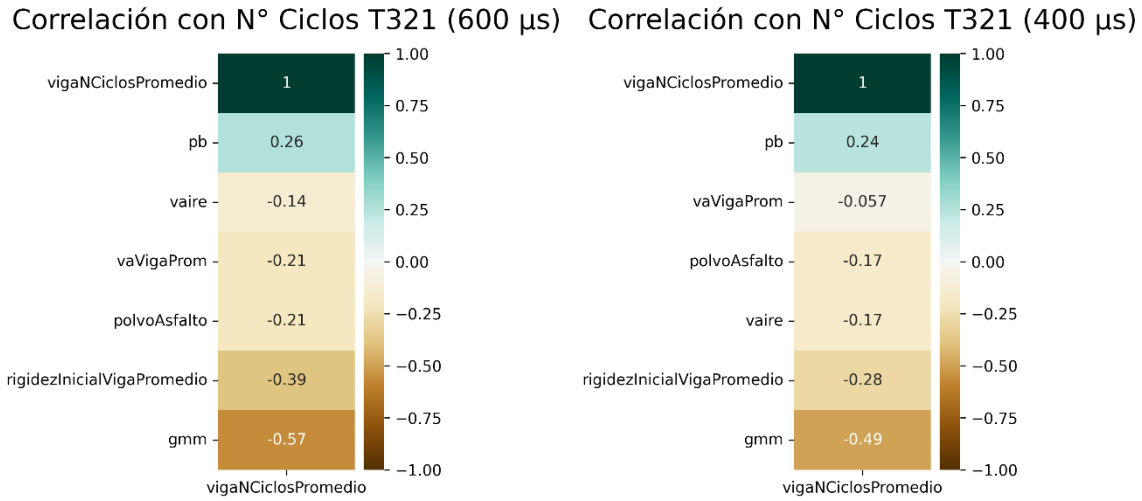

Figura 7. Correlación con N° Ciclos T321 (por deformación)

Es importante destacar que estos coeficientes de correlación cuantifican la fortaleza de la relación lineal entre dos variables. La magnitud y signo de estos coeficientes ayudan a comprender, de manera inicial y exploratoria, la interacción entre las variables; pero, no permiten identificar relaciones no lineales adecuadamente.

En la Figura 8 y Figura 9 se presentan los mapas de calor de la correlación entre todas las variables. En estos no se observan correlaciones fuertes entre las variables, incluso en algunas variables que, de acuerdo con la mecánica del material, sí se esperaba observar alta correlación. Por ejemplo, se esperaba una alta correlación entre el porcentaje de asfalto (pb) y la rigidez inicial de la viga ensayada a flexotracción (rigidezInicialVigaPromedio); sin embargo, los coeficientes de correlación de -0.17 y -0.16 evidencian lo contrario.

Esto se debe a que en estos mapas los datos se han filtrado únicamente por la deformación unitaria del ensayo AASHTO T321. Por ejemplo, los datos no se separaron por planta, por tipo de modificante, o propiedades físicas de los agregados. En la sección *4.7 Modelos de regresión lineal múltiple para el Número de ciclos*, se presentarán modelos que desagregan los datos tomando en cuenta otras características, lo que mejora la correlación entre parámetros como el porcentaje de asfalto y la rigidez de la mezcla.

La gravedad máxima teórica (gmm) destaca como la variable con mayor correlación respecto al número de ciclos promedio. Esta variable se incluyó pues constituye, con algunas limitaciones, un indicador indirecto para el porcentaje de asfalto efectivo. Si las propiedades de los agregados y su granulometría se mantienen constantes, una disminución en la gravedad máxima teórica implicaría una reducción en el asfalto efectivo y, de acuerdo con el comportamiento esperado, una reducción en el número de ciclos del ensayo de viga a flexotracción. Este comportamiento se ratifica al observar la alta magnitud y el signo negativo del coeficiente de correlación.

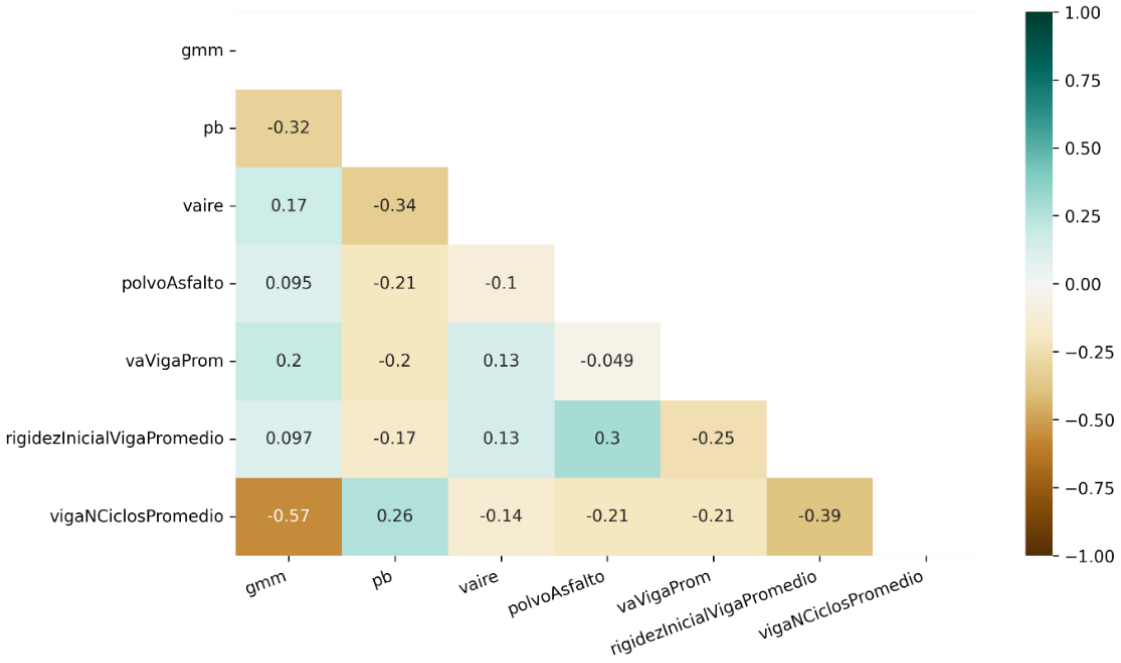

Figura 8. Mapa de calor de correlación (600 µs)

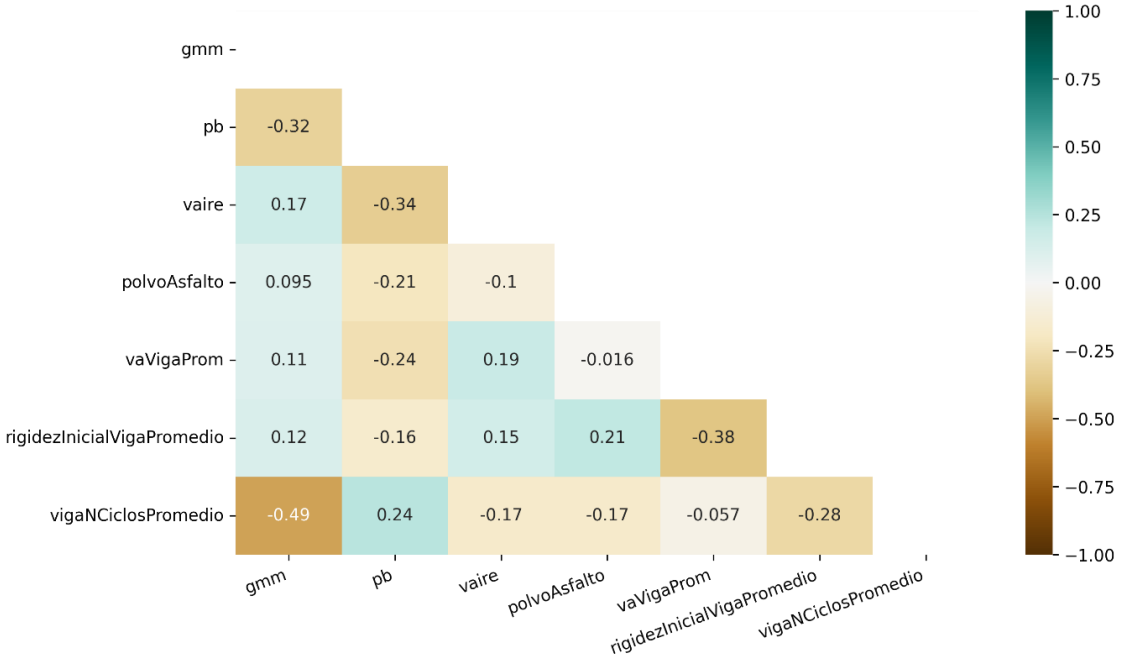

Figura 9. Mapa de calor de correlación (400 µs)

Al filtrar los datos de las 3 principales plantas productoras de mezclas modificadas y elaborar los mapas de correlación (Figura 10), se observa lo siguiente:

- En relación con el número de ciclos, las mezclas modificadas de la planta P2(M1) tienen los mayores coeficientes de correlación. La rigidez inicial y el porcentaje de asfalto muestran correlaciones fuertes (negativas y positivas, respectivamente) con el número de ciclos.

- Las mezclas modificadas de la planta P1(M2) muestran un comportamiento similar, pero con valores de coeficiente de correlación menores.

- Estas tendencias cambian para la planta P3(M1-F), en las que la gravedad máxima teórica y el porcentaje de asfalto son las variables que presentan mayor correlación con el número de ciclos.

- Los coeficientes de correlación mejoran al analizar por separado a las mezclas modificadas.

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

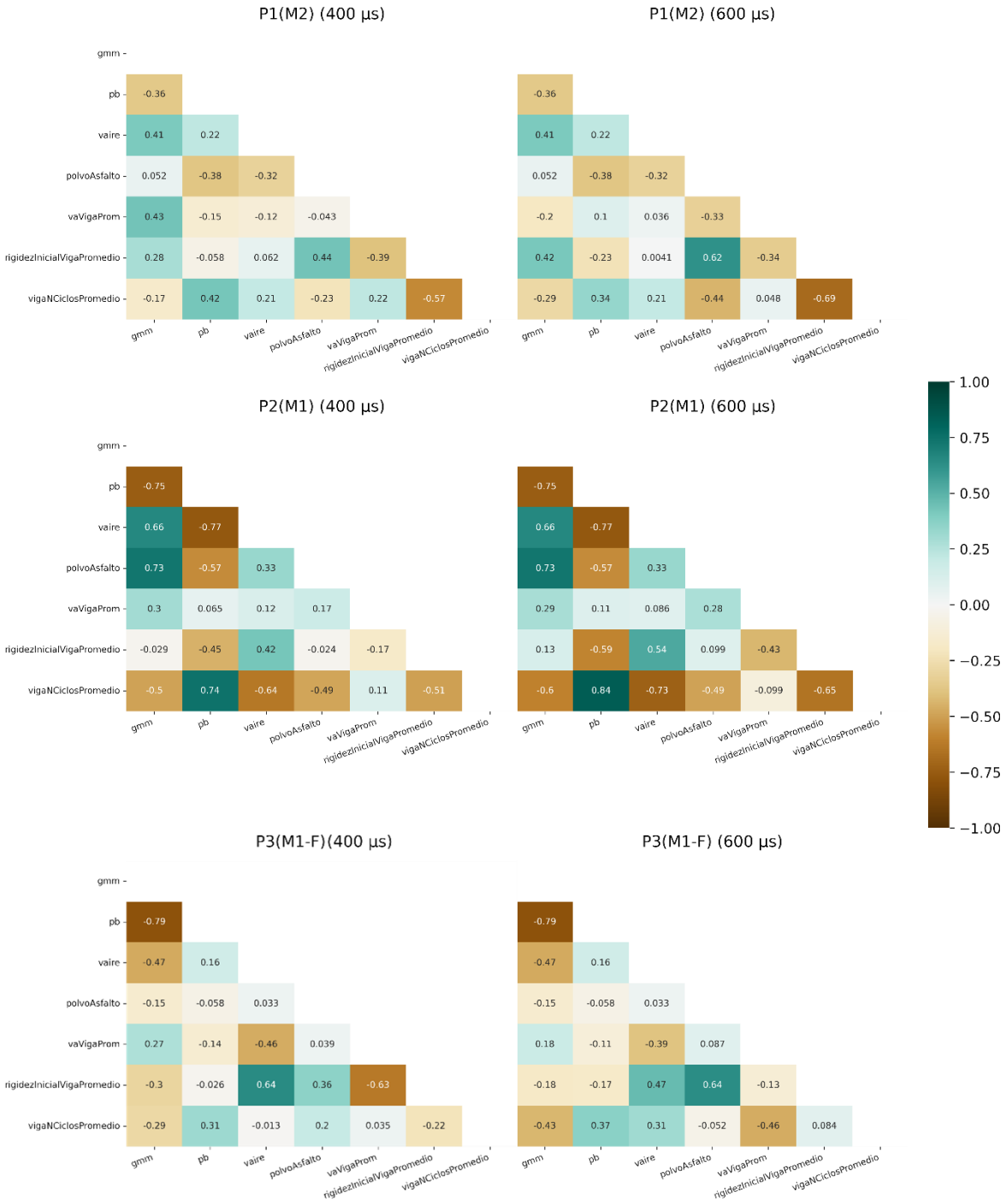

Figura 10. Mapas de calor de la correlación, mezclas modificadas, por planta y deformación

4.2. DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE CICLOS ASOCIADO A MEZCLAS CONVENCIONALES Y MODIFICADAS SEGÚN SU CONTENIDO DE ASFALTO

En esta sección se exploran las diferencias en el número de ciclos del ensayo de viga a flexotracción para muestras elaboradas con asfaltos convencionales y modificados. Para esto, se analizó en conjunto y por separado a las tres plantas productoras con mayor cantidad de muestras: P1, P2 y P3, los modificantes empleados en estas plantas productoras corresponden a M2, M1 y M1-F, respectivamente.

Preliminarmente, a partir de un análisis exploratorio inicial, se identificó que la mejora en la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga en las mezclas modificadas para una misma planta era más significativa en aquellas mezclas con contenidos de asfalto mayores. Luego de esta etapa inicial, se llevaron a cabo, para 3 rangos de porcentaje de asfalto, pruebas de hipótesis para verificar si la media del número de ciclos de las mezclas modificadas era significativamente diferente a de las mezclas convencionales.

Los rangos de porcentaje de asfalto seleccionados para el análisis son:

- Rango bajo: Pb (% PTM) < 5.25
- Rango intermedio: 5.25 ≤ Pb (% PTM) < 5.75
- Rango alto: 5.75 ≤ Pb (% PTM)

Adicionalmente, se utilizó una prueba t de dos muestras para varianzas iguales, con la hipótesis nula:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

Y la hipótesis alternativa:

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Para cumplir con los requisitos de normalidad, antes de realizar las pruebas estadísticas, se aplicó una transformación con logaritmo natural a los datos. A continuación, se presentan los resultados de estas pruebas estadísticas, para cada uno de los siguientes casos:

Mezclas modificadas P1 (Modificante M2) vs. todas las muestras convencionales

En la Figura 11 se muestran gráficas de dispersión del número de ciclos respecto al porcentaje de asfalto, así como los tres rangos de porcentaje de asfalto seleccionados para el análisis. Se puede observar, para el caso del número de ciclos a 600 µs y 400 µs, y para el rango de porcentaje de asfalto más alto, que las mezclas modificadas parecen tener un mejor desempeño en el ensayo que su contraparte convencional.

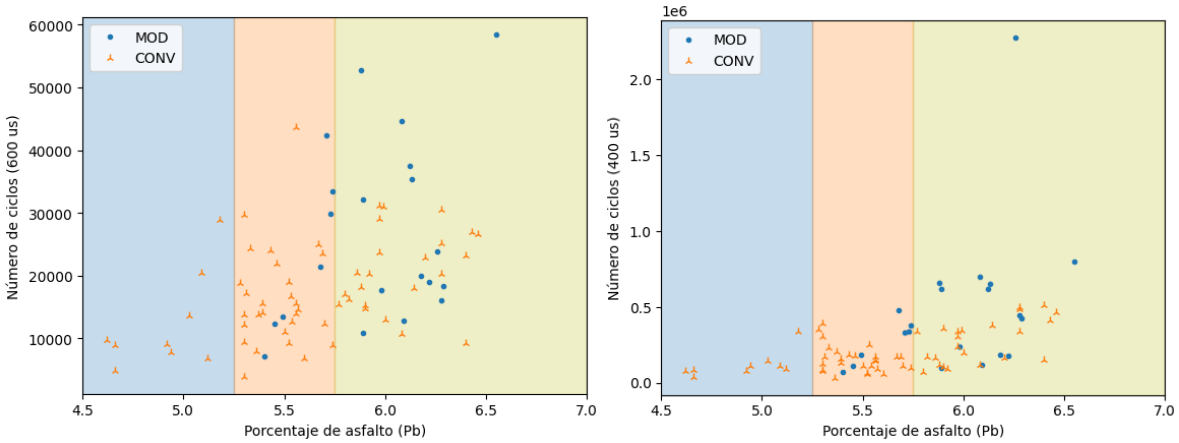

Figura 11. Comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P1 M2)

En el Cuadro 6 se muestran los resultados de la prueba de hipótesis, que respaldan parcialmente lo evidenciado en la Figura 11. En este caso, la prueba de hipótesis únicamente destaca una diferencia significativa en las medias del número de ciclos a 400 µs, para el rango alto de porcentaje de asfalto.

Cuadro 6.Resultados de la prueba de hipótesis de la comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P1 M2)

		Cuenta		Número de ciclos				
Deform. T321	**Rango Pb**	**Conv.**	**Mod.**	**Conv.**	**Mod.**	**Estadístico t**	**P-value**	**¿Significativo?***
400	[0, 5.25[	10	0	-	-	-	-	-
	[5.25, 5.75[	28	7	159328	271870	2.002	0.054	+NO
	[5.75, 25[	23	14	278523	573160	2.253	0.031	+SÍ
600	[0, 5.25[	10	0	-	-	-	-	-
	[5.25, 5.75[	28	7	16418	22879	1.292	0.205	+NO
	[5.75, 25[	23	14	20832	28546	1.672	0.104	+NO

* Para un 95 % de confianza; +: media modificadas > media convencionales, -: media modificadas < media convencionales
** Cuando alguna de las muestras es de tamaño menor o igual a 1, no se calculan algunas casillas

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Mezclas modificadas P2 (Modificante M1) vs. todas las muestras convencionales

En este caso, se observa una diferencia más clara en el número de ciclos asociado a las mezclas modificadas respecto a las mezclas convencionales en el rango alto de porcentaje de asfalto, tanto para los resultados del ensayo a 600 µs y a 400 µs.

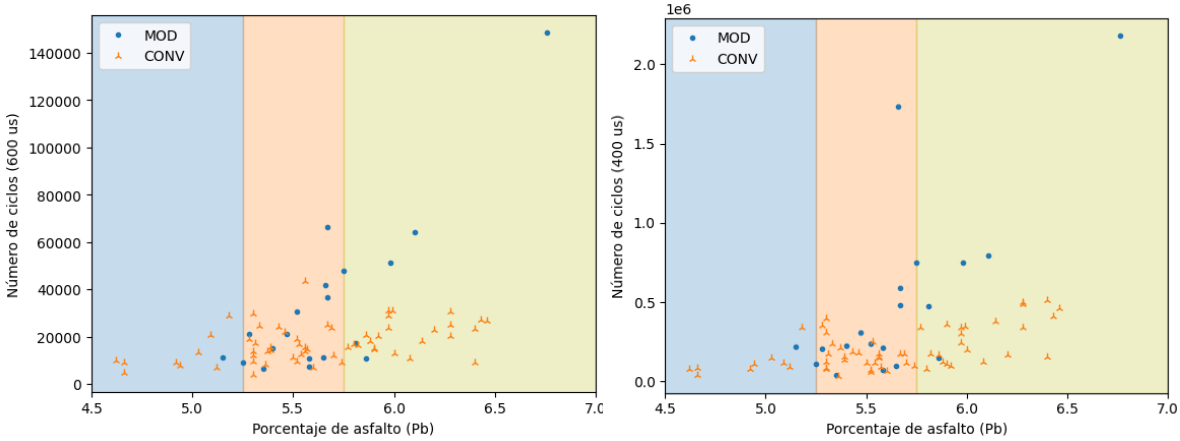

Figura 12. Comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P2 M1)

Lo observado en la Figura 12 se ratifica con los resultados de la prueba de hipótesis que se presentan en el Cuadro 7. En este se indica que, con un 95 % de confianza, se puede concluir que existe una diferencia significativa entre la media del número de ciclos asociado las mezclas modificadas de la planta P2 y la media del número de ciclos asociado a las mezclas convencionales, para el rango alto de porcentaje de asfalto.

Cuadro 7. Resultados de la prueba de hipótesis de la comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P2 M1)

		Cuenta		Número de ciclos				
Deform. T321	**Rango Pb**	**Conv.**	**Mod.**	**Conv.**	**Mod.**	**Estadístico t**	**P-value**	**¿Significativo?***
400	[0, 5.25[	10	1	111602	220070	-	-	+NO
	[5.25, 5.75[	28	12	159328	359644	1.829	0.075	+NO
	[5.75, 25[	23	6	278523	848901	3.265	0.003	+SÍ
600	[0, 5.25[	10	1	11458	11185	-	-	+NO
	[5.25, 5.75[	28	12	16418	23173	1.014	0.317	+NO
	[5.75, 25[	23	6	20832	56599	3.053	0.005	+SÍ

* Para un 95 % de confianza; +: media modificadas > media convencionales, -: media modificadas < media convencionales
** Cuando alguna de las muestras es de tamaño menor o igual a 1, no se calculan algunas casillas

Mezclas modificadas P3 (Modificante M1-F) vs. todas las muestras convencionales

Los resultados del análisis para la planta P3 son completamente distintos a los de las plantas P1 y P2. De la Figura 13 se puede notar que, a diferencia de las plantas P1 y P2, la planta P3 elabora mezclas asfálticas con contenidos de asfalto que en su mayoría coinciden con los rangos de porcentaje de asfalto bajo e intermedio.

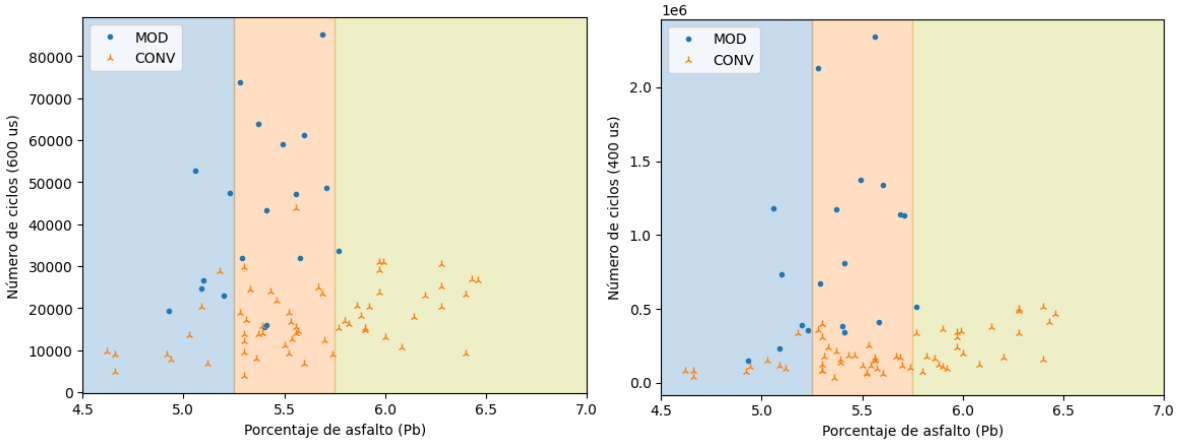

Figura 13. Comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P3 M1-F)

Sin embargo, para la planta P3, la mejora en la resistencia a la fatiga se evidencia para contenidos de asfalto menores. Estos resultados particulares pueden estar asociados a que la planta P3 utiliza relleno mineral calizo o relleno mineral activo en sus mezclas, cuyas características de absorción en comparación con las de los agregados típicos costarricenses generaría un incremento en el asfalto efectivo presente en la mezcla, adicionalmente la planta cuenta con un proceso industrializado de modificación de asfaltos.

El asfalto efectivo es determinante en el desempeño de la mezcla asfáltica. Específicamente en relación con la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga, un aumento en el asfalto efectivo modificado puede mejorar las características de rigidez, flexibilidad y recuperación de la mezcla asfáltica. Sin embargo, tal y como se explicó en el apartado 2.6, existen resultados preliminares que indican que, debido a las dificultades de caracterizar adecuadamente la gravedad específica de los agregados finos con presencia con tamaño menor a 0.075 mm, el cálculo del asfalto efectivo puede no ser representativo de la cantidad de asfalto libre en la mezcla asfáltica.

En el Cuadro 8 se muestran los resultados de las pruebas de hipótesis realizadas para la planta P3. Los resultados son acordes a lo observado en la Figura 13, evidenciando que sí existe una diferencia significativa entre la media del número de ciclos asociado las mezclas modificadas de la planta P3 y la media del número de ciclos asociado a las mezclas convencionales, para los rangos bajo e intermedio de porcentajes de asfalto.

Cuadro 8. Resultados de la prueba de hipótesis de la comparación entre el N° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales (P3 M1-F)

		Cuenta		Número de ciclos				
Deform. T321	**Rango Pb**	**Conv.**	**Mod.**	**Conv.**	**Mod.**	**Estadístico t**	**P-value**	**¿Significativo?***
400	[0, 5.25[	10	6	111602	507516	4.170	0.0009436	+SÍ
	[5.25, 5.75[	28	12	159328	1103959	9.418	0.0000000	+SÍ
	[5.75, 25[	23	1	278523	513556	-	-	NA
600	[0, 5.25[	10	6	11458	32305	4.097	0.0010878	+SÍ
	[5.25, 5.75[	28	12	16418	48128	6.051	0.0000005	+SÍ
	[5.75, 25[	23	1	20832	33757	-	-	NA

* Para un 95 % de confianza; +: media modificadas > media convencionales, -: media modificadas < media convencionales
** Cuando alguna de las muestras es de tamaño menor o igual a 1, no se calculan algunas casillas

De este análisis se concluye que, en la mayoría de los casos, el incremento de los porcentajes de asfalto modificado hacia rangos más altos, tiene efectos positivos y estadísticamente significativos en la mejora de la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de las mezclas asfálticas, evaluada a través del número de ciclos del ensayo de viga a flexotracción.

4.3. CUMPLIMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES NACIONALES (CR-2020)

Mezclas producidas en planta: cumplimiento de las especificaciones de susceptibilidad al agrietamiento por fatiga del CR-2020

En la Figura 14 se presentan los diagramas de cajas y bigotes para el número de ciclos asociado a las mezclas asfálticas producidas en planta, separadas por deformación unitaria aplicada, por planta y por tipo de mezcla (modificada y convencional).

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

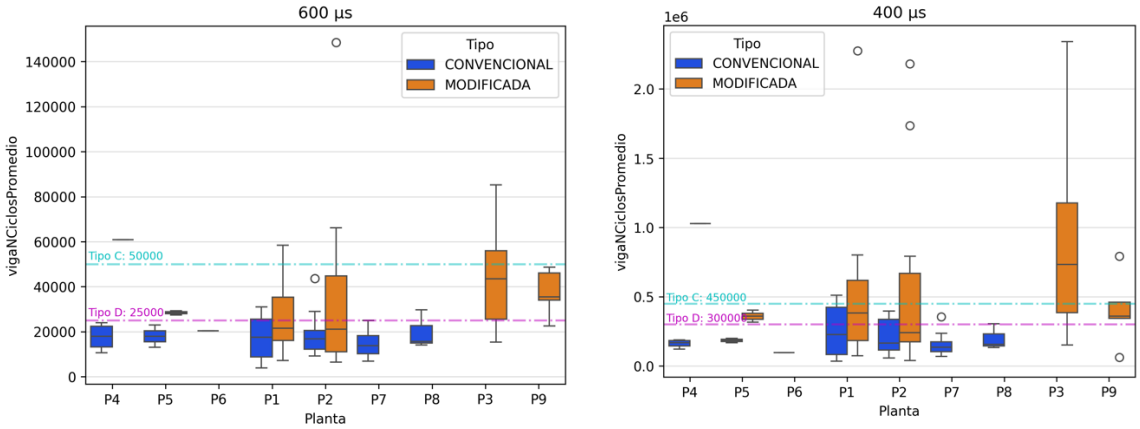

Figura 14. Gráficos de cajas y bigotes para número de ciclos, por planta y tipo de mezcla, especificaciones de fatiga CR-2020

A partir de la Figura 14 es posible observar que un alto porcentaje de las mezclas convencionales no logra ni siquiera alcanzar el número de ciclos establecido para las mezclas tipo D, el menos exigente de la normativa costarricense y que aplica a capas de rodadura de alto desempeño. Sin embargo, debe notarse que las mezclas convencionales usualmente noEn el caso de las mezclas modificadas, el porcentaje de cumplimiento aumenta considerablemente, con un 69 % de las mezclas superando lo establecido para el ensayo AASHTO T 321 a 400 µs y un 57 % para 600 µs.

En el Cuadro 9 se observa como el cumplimiento de las especificaciones para mezclas tipo C, para capas asfálticas intermedias de alto desempeño, es aún más limitado. Sólo un 7 % de las mezclas convencionales pudo alcanzar lo especificado para 400 µs, mientras que ninguna muestra pudo superar la normativa para 600 µs. En el caso de las mezclas modificadas, se evidencia un cumplimiento mayor al de las mezclas convencionales (46 % y 19 %, para 400 µs y 600 µs, respectivamente).

Cuadro 9. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020, por tipo de mezcla

			Cuenta		Porcentaje cumplimiento (%)	
Deform. T321	**Tipo**	**Cuenta**	**Tipo C***	**Tipo D****	**Tipo C***	**Tipo D****
400	**CONV**	57	4	15	7	26
	MOD	67	31	46	46	69
600	**CONV**	57	0	9	0	16
	MOD	67	13	38	19	57

* Tipo C: 450000 ciclos (400 us), 50000 ciclos (600 us)
** Tipo D: 300000 ciclos (400 us), 25000 ciclos (600 us)

Es importante destacar que algunas de las mezclas asfálticas pudieron haber sido diseñadas para ser tipo AB (para capas y sobrecapas asfálticas o bacheo de mediano volumen de tránsito), especialmente las mezclas convencionales, por lo que no estarían sujetas a las especificaciones de fatiga de mezclas tipo C o D. Sin embargo, en el caso de las mezclas modificadas, que son concebidas como mezclas de alto desempeño y de costo considerablemente mayor, se esperarían cumplimientos de especificación tipo C o D más cercanos al 100 %.

En el Cuadro 10, que presenta la información de cumplimiento de especificación desagregada por planta, se observa que las plantas P4, P5 y P9 presentan cumplimientos altos de especificación. Sin embargo, estas empresas representan apenas un 12 % de las mezclas modificadas incluidas en la base de datos.

En el caso de las plantas P1, P2 y P3, que concentran el restante 88 % de las mezclas modificadas, únicamente la planta P3 presenta porcentajes de cumplimiento relativamente cercanos al 100 %. Este resultado complementa lo expuesto anteriormente para esta empresa productora, que se discute en secciones como la 4.1 y 4.2.

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Cuadro 10. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020, por planta y tipo de mezcla

				Cuenta		Porcentaje cumplimiento (%)	
Deform. T321	**Tipo**	**Planta**	**Cuenta**	**Tipo C***	**Tipo D****	**Tipo C***	**Tipo D****
400	CONVENCIONAL	P1	16	4	8	25	50
		P2	17	0	5	0	29
		P4	4	0	0	0	0
		P5	2	0	0	0	0
		P6	1	0	0	0	0
		P7	14	0	1	0	7
		P8	3	0	1	0	33
	MODIFICADA	P1	21	8	13	38	62
		P2	19	8	9	42	47
		P3	19	12	17	63	89
		P4	1	1	1	100	100
		P5	2	0	2	0	100
		P9	5	2	4	40	80
600	CONVENCIONAL	P1	16	0	5	0	31
		P2	17	0	3	0	18
		P4	4	0	0	0	0
		P5	2	0	0	0	0
		P6	1	0	0	0	0
		P7	14	0	0	0	0
		P8	3	0	1	0	33
	MODIFICADA	P1	21	2	9	10	43
		P2	19	4	8	21	42
		P3	19	6	14	32	74
		P4	1	1	1	100	100
		P5	2	0	2	0	100
		P9	5	0	4	0	80

* Tipo C: 450000 ciclos (400 us), 50000 ciclos (600 us)

** Tipo D: 300000 ciclos (400 us), 25000 ciclos (600 us)

En las secciones 4.1 y 4.2 se identificó que el porcentaje de asfalto incide de manera positiva en la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de una mezcla asfáltica. Es decir, a mayores porcentajes de asfalto, el número de ciclos que resisten las mezclas tiende a aumentar.

En el Cuadro 11 se muestra el porcentaje de cumplimiento de las especificaciones nacionales de fatiga de las mezclas provenientes de las tres principales plantas presentes en la base de datos analizada (P1, P2 y P3), separadas por tipo de mezcla, planta productora y rango de porcentaje de asfalto. Se observa que, principalmente para las

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

mezclas modificadas, el porcentaje de cumplimiento de especificación es mayor para los rangos de porcentaje de asfalto más altos.

Estos resultados apuntan a que la modificación del asfalto, en conjunto con porcentajes de asfalto más altos, es una combinación más conveniente para lograr que las mezclas asfálticas cumplan las especificaciones nacionales de agrietamiento por fatiga.

Cuadro 11. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020, por deformación unitaria, tipo de mezcla, planta y rango de porcentaje de asfalto

					Cuenta		Porcentaje cumplimiento (%)	
Deformación T321 (µs)	Tipo	Planta	Rango Pb (%)	Cuenta	Tipo C*	Tipo D**	Tipo C*	Tipo D**
400	CONV	P1	[0, 5.25[	2	0	0	0	0
			[5.25, 5.75[	4	0	0	0	0
			[5.75, 25[	10	4	8	40	80
		P2	[0, 5.25[	2	0	1	0	50
			[5.25, 5.75[	9	0	1	0	11
			[5.75, 25[	6	0	3	0	50
	MOD	P1	[5.25, 5.75[	7	1	4	14	57
			[5.75, 25[	14	7	9	50	64
		P2	[0, 5.25[	1	0	0	0	0
			[5.25, 5.75[	12	3	4	25	33
			[5.75, 25[	6	5	5	83	83
		P3	[0, 5.25[	6	2	4	33	67
			[5.25, 5.75[	12	9	12	75	100
			[5.75, 25[	1	1	1	100	100
600	CONV	P1	[0, 5.25[	2	0	0	0	0
			[5.25, 5.75[	4	0	0	0	0
			[5.75, 25[	10	2	5	20	50
		P2	[0, 5.25[	2	0	1	0	50
			[5.25, 5.75[	9	1	1	11	11
			[5.75, 25[	6	0	1	0	17
	MOD	P1	[5.25, 5.75[	7	2	3	29	43
			[5.75, 25[	14	6	6	43	43
		P2	[0, 5.25[	1	0	0	0	0
			[5.25, 5.75[	12	4	4	33	33
			[5.75, 25[	6	4	4	67	67
		P3	[0, 5.25[	6	2	3	33	50
			[5.25, 5.75[	12	10	10	83	83
			[5.75, 25[	1	1	1	100	100

* Tipo C: 450000 ciclos (400 us), 50000 ciclos (600 us)

** Tipo D: 300000 ciclos (400 us), 25000 ciclos (600 us)

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Mezclas producidas en laboratorio: cumplimiento de las especificaciones de susceptibilidad al agrietamiento por fatiga del CR-2020

En la Figura 15 se presentan los diagramas de cajas y bigotes para el número de ciclos asociado a las mezclas asfálticas producidas en el LanammeUCR, separadas por deformación del ensayo, modificante y procedencia. Es claro que, a diferencia de las mezclas modificadas en planta, las mezclas modificadas en laboratorio tienen mejores resultados del ensayo de viga a flexotracción y cumplen en su mayoría con lo especificado para mezclas de alto desempeño tipo C y D, pues fueron diseñadas para este propósito.

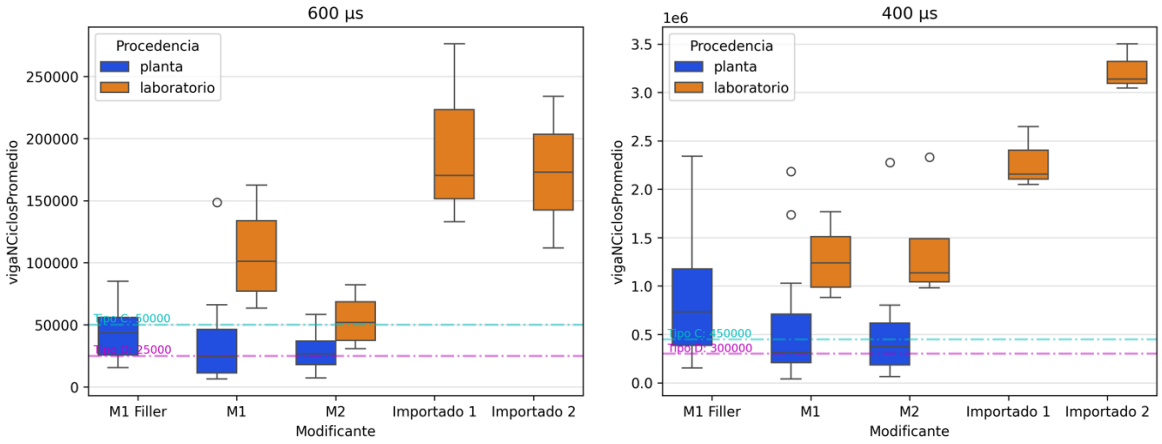

Figura 15. Gráficos de cajas y bigotes para número de ciclos, mezclas modificadas en laboratorio, especificaciones de fatiga CR-2020

Cabe destacar que, a diferencia de las mezclas modificadas en planta, los diagramas de cajas y bigotes no están construidos utilizando los promedios de los especímenes de cada muestra. Para las muestras de laboratorio se contaba con una sola muestra por modificante, por lo que se utilizaron los datos de cada espécimen por separado para construir los gráficos. Esto implica que, aunque la mezcla en laboratorio con modificante M2 parece incumplir con la normativa para mezclas tipo C a 600 µs, sí cumple con esta normativa si se considera el promedio del número de ciclos obtenido para esta mezcla, sin embargo, la variabilidad del ensayo sigue siendo un aspecto por tomar en cuenta.

En el Cuadro 12 se muestra información detallada del cumplimiento de las especificaciones. Se puede observar en las mezclas producidas en laboratorio para los modificantes M1 y M2 la misma tendencia presentada en la subsección anterior. Adicionalmente, podemos

observar que el modificante M2 presenta porcentajes de cumplimiento menores respecto al M1 (exceptuando los resultados a 400 µs para mezclas tipo D). También, se establece que las mezclas modificadas en laboratorio contaron con características que permitieron superar las especificaciones nacionales en porcentajes que van desde el 108 % para M2 a 600 µs, hasta el 1076 % para el asfalto importado 2 a 400 µs. Lo anterior podría estar relacionado a un proceso de producción más controlado, mejor calidad de la materia prima y procesos de producción, variabilidad de los procesos productivos en planta o condiciones en el tratamiento de la mezcla cuando es muestreada en campo, entre otras.

Cuadro 12. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020, por modificante y procedencia para mezclas producidas en laboratorio

				Cuenta		Porcentaje cumplimiento (%)		Respecto a especificación (%)	
Deform. T321	**Modificante**	**Procedencia**	**Cuenta**	**Tipo C***	**Tipo D****	**Tipo C***	**Tipo D****	**Tipo C***	**Tipo D****
400	**Importado 1**	**laboratorio**	1	1	1	100	100	508	762
	Importado 2	**laboratorio**	1	1	1	100	100	718	1076
	M1	**laboratorio**	1	1	1	100	100	283	424
		planta	22	9	12	41	55	115	172
	M2	**laboratorio**	1	1	1	100	100	310	465
		planta	26	10	17	38	65	102	153
600	**Importado 1**	**laboratorio**	1	1	1	100	100	386	773
	Importado 2	**laboratorio**	1	1	1	100	100	346	692
	M1	**laboratorio**	1	1	1	100	100	214	428
		planta	22	5	11	23	50	68	136
	M2	**laboratorio**	1	1	1	100	100	108	217
		planta	26	2	13	8	50	57	115

* Tipo C: 450000 ciclos (400 us), 50000 ciclos (600 us)
** Tipo D: 300000 ciclos (400 us), 25000 ciclos (600 us)

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

4.4. DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE CICLOS PARA LA FALLA DEPENDIENDO DE LA PLANTA PRODUCTORA

En la Figura 16 se muestran las gráficas de dispersión para el número de ciclos promedio respecto al porcentaje de asfalto, separados por planta productora.

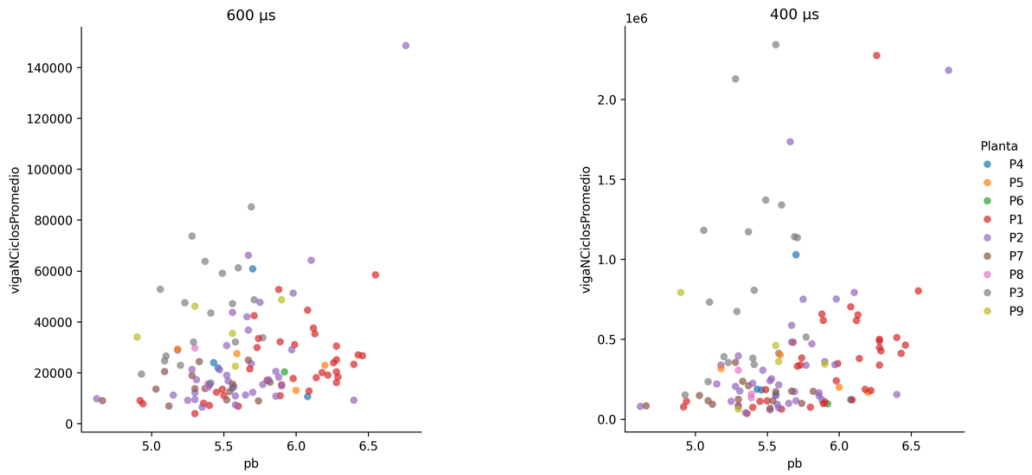

Figura 16. Número de ciclos promedio (N) vs. Porcentaje de asfalto (Pb), por planta productora

En la Figura 17 se muestra el diagrama de cajas y bigotes de los resultados del ensayo de viga a flexotracción, separados por planta y por tipo de mezcla (modificada o convencional). En el caso de las mezclas convencionales, se observa un número de ciclos consistente para cada empresa, con coeficientes de variación del 64 % para 400 µs y 45 % para 600 µs. Esta menor dispersión en los resultados de ensayo, sin importar la empresa productora, también se evidencia en rango intercuartílico (IQR) de 198410 y 10754 ciclos, para 400 µs y 600 µs, respectivamente.

Lo anterior evidencia que, la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de mezclas sin modificar es consistente entre las mezclas producidas por las nueve empresas analizadas. Adicionalmente, se observa una menor variabilidad en los resultados asociados al ensayo realizado a 600 µs.

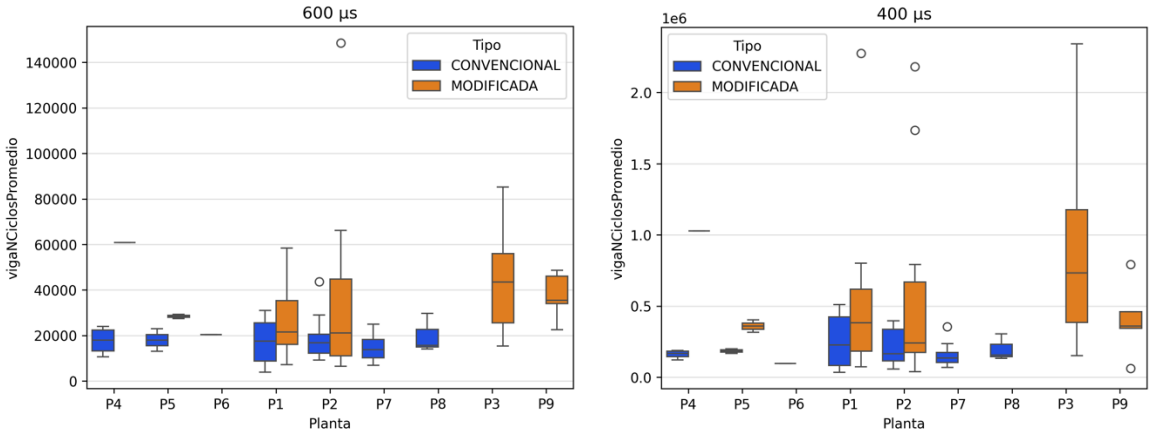

Figura 17. N ° de Ciclos para mezclas modificadas y convencionales, por planta

En el caso de las mezclas modificadas, la consistencia entre empresas disminuye, con mayores diferencias entre plantas productoras. En relación con el número de ciclos, destacan principalmente las plantas productoras P3 y P4, cuyos promedios de número de ciclos a 400 µs superan en un 45 % y 68 %, respectivamente, al número de ciclos promedio de todas las mezclas modificadas. De manera similar, para los resultados a 600 µs, las plantas P3 y P4 superan en un 11 % y 60 % al promedio de todas las mezclas modificadas.

En cuanto a la variabilidad de los resultados de las mezclas modificadas, en el Cuadro 13 se observan coeficientes de variación del 92 % y 68 % para 400 µs y 600 µs, respectivamente. Esto, en conjunto con los IQR (rango intercuartil) mayores (528244 y 29854 ciclos, para 400 µs y 600 µs, respectivamente) indica una mayor variabilidad en la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga asociada a las mezclas modificadas producidas por diferentes plantas, evidenciando que podrían existir diferencias en los procesos productivos.

La calidad de la modificación del ligante asfáltico, los contenidos de asfalto con respecto al óptimo y el control de las propiedades volumétricas de estas mezclas asfálticas pueden tener un papel importante en la variabilidad de los resultados de ensayo de las mezclas modificadas.

Cuadro 13. Estadísticas descriptivas de las mezclas modificadas y convencionales, por deformación

		Número de ciclos T321								
Deformación T321	**Tipo**	**Cuenta**	**Media**	**Desv.Est.**	**CV**	**Mín.**	**Q1**	**Q2**	**Q3**	**Máx.**
400	**CONV**	57	199408	128006	0.642	35420	107700	157205	306110	510569
	MOD	67	598981	549978	0.918	40503	222532	412513	750776	2342700
600	**CONV**	57	17358	7725	0.445	3912	12150	15660	22904	43680
	MOD	67	34300	23340	0.680	6463	17449	30667	47313	148554

Tomando en cuenta únicamente a las plantas P1, P2 y P3, que en conjunto concentran el 88 % de las mezclas modificadas en la base de datos (ver Cuadro 14), destacan las siguientes observaciones (ver Figura 18):

- Como ya se había identificado anteriormente, y tal y como se muestra en la Figura 18, las mezclas modificadas de la planta de producción P3 presentan números de ciclo del ensayo de viga a flexotracción más altos que las plantas P1 y P2.

- La planta P3 presenta números de ciclo del ensayo de viga a flexotracción para la falla más altos que las plantas P1 y P2, sin embargo, emplea porcentajes de asfalto totales considerablemente menores a las plantas P1 y P2.

- Aun cuando la planta P3 presenta números de ciclo del ensayo de viga a flexotracción más altos que las plantas P1 y P2, las rigideces iniciales de sus mezclas se encuentran en un rango intermedio respecto a las de las plantas P1 y P2.

- La planta P1 utiliza porcentajes de asfalto más altos que la planta P2, sin embargo, esta diferencia no repercute positivamente en el aumento del número de ciclos para la falla de las mezclas de la planta P1 respecto a la planta P2.

- La planta P1 utiliza porcentajes de asfalto más altos que la planta P2. Esta diferencia sí tiene un impacto en la reducción de la rigidez inicial de las mezclas de la planta P1 respecto a la planta P2.

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

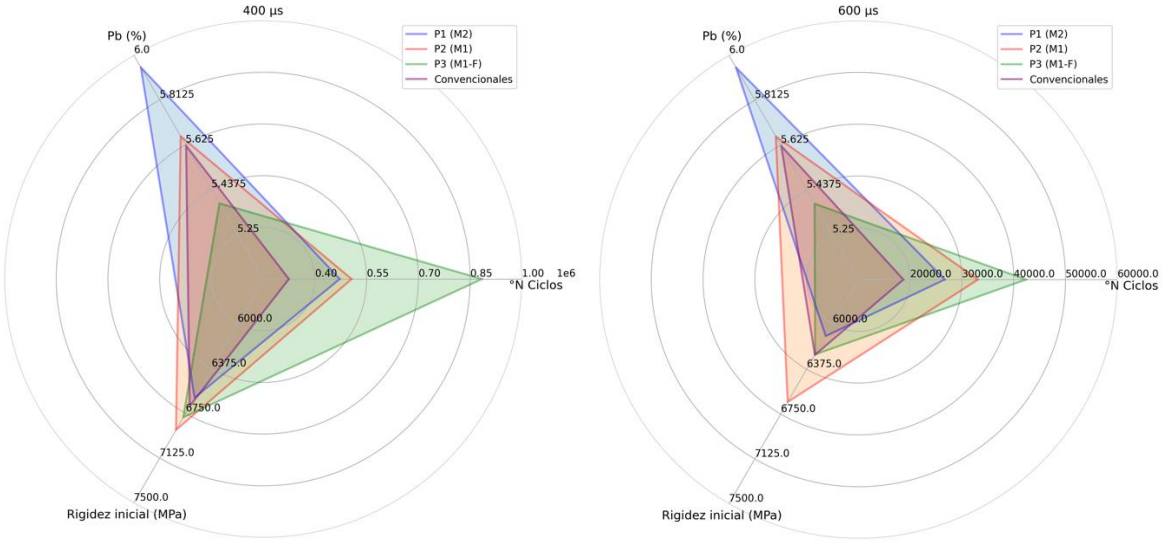

Figura 18. Gráficos de radar para mezclas modificadas de plantas P1, P2, P3 y todas las mezclas convencionales, por deformación

Las diferencias significativas en los resultados del ensayo de viga a flexotracción de la planta P3 podrían deberse al uso de relleno mineral calizo o relleno activo, lo cual es una diferencia en el proceso de diseño que no había sido implementado previamente en Costa Rica, mejor proceso de modificación y mejor control de calidad del proceso de modificación por contar con una planta de modificación industrial, entre otras razones.

El uso de mayores porcentajes de asfalto de la planta P1 respecto a la planta P2 se traduce en mezclas de menor rigidez para la planta P1. Este resultado no es necesariamente positivo, puesto que aun cuando una mezcla con menor rigidez se relaciona con mejores resultados en los ensayos de susceptibilidad al agrietamiento por fatiga esta tendencia no se observa en los resultados. El tipo de la modificación y la calidad con que este proceso se lleve a cabo también son factores que afectan el desempeño ante el fisuramiento por fatiga.

Adicionalmente, en la Figura 18, se observa como las mezclas convencionales, a pesar de tener porcentajes de asfalto altos, son las mezclas que tienen el desempeño más bajo en los resultados del ensayo de viga a flexotracción. Estas mezclas también exhiben rigideces iniciales altas. Esto podría deberse a una práctica común en la industria que consiste en dosificar cantidades mayores de relleno mineral para disminuir el contenido de asfalto sin que se evidencie en la volumetría de la mezcla.

Cuadro 14. Resumen de los datos de número de ciclos, porcentaje de asfalto y rigidez inicial, por planta

					Promedios	
Deform. T321	**Tipo**	**Planta**	**Cuenta**	**Número de ciclos**	**Pb**	**Rigidez inicial (MPa)**
400	**CONVENCIONAL**	**P1**	16	256568	5.85	6535
		2	17	199265	5.59	6815
		P4	4	161297	5.63	6669
		P5	2	183955	6.10	7458
		P6	1	95865	5.92	6526
		P7	14	154821	5.36	6764
		P8	3	199068	5.36	6066
	MODIFICADA	**P1**	21	472730	5.95	6620
		P2	19	506801	5.66	6888
		P3	19	884534	5.38	6782
		P4	1	1028881	5.70	6608
		P5	2	359500	5.39	7486
		P9	5	404230	5.45	4142
600	**CONVENCIONAL**	**P1**	16	17543	5.85	6278
		P2	17	18492	5.59	6488
		P4	4	17611	5.63	6054
		P5	2	17967	6.10	6391
		P6	1	20327	5.92	5881
		P7	14	14873	5.36	6133
		P8	3	19808	5.36	5658
	MODIFICADA	**P1**	21	26657	5.95	6097
		P2	19	33098	5.66	6649
		P3	19	42375	5.38	6250
		P4	1	60808	5.70	6740
		P5	2	28367	5.39	7135
		P9	5	37357	5.45	4982

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

4.5. DIFERENCIAS EN EL NÚMERO DE CICLOS ASOCIADO A MEZCLAS ASFÁLTICAS PRODUCIDAS EN PLANTA Y EN LABORATORIO

En la base de datos se incluyeron mezclas asfálticas modificadas elaboradas en planta y en el laboratorio, lo que permitió evidenciar una marcada diferencia entre el número de ciclos que resisten.

En la Figura 19 se observa como tanto para los resultados a 400 µs y 600 µs, las mezclas modificadas en laboratorio lograron alcanzar un número mayor de repeticiones que las modificadas en planta. Esta diferencia puede deberse a varias razones, entre ellas la calidad del modificante utilizado, la calidad y control adecuado del proceso de modificación, las características físicas de los agregados utilizados, tratamientos adicionales de las muestras producidas en planta previo a la realización del ensayo, entre otras.

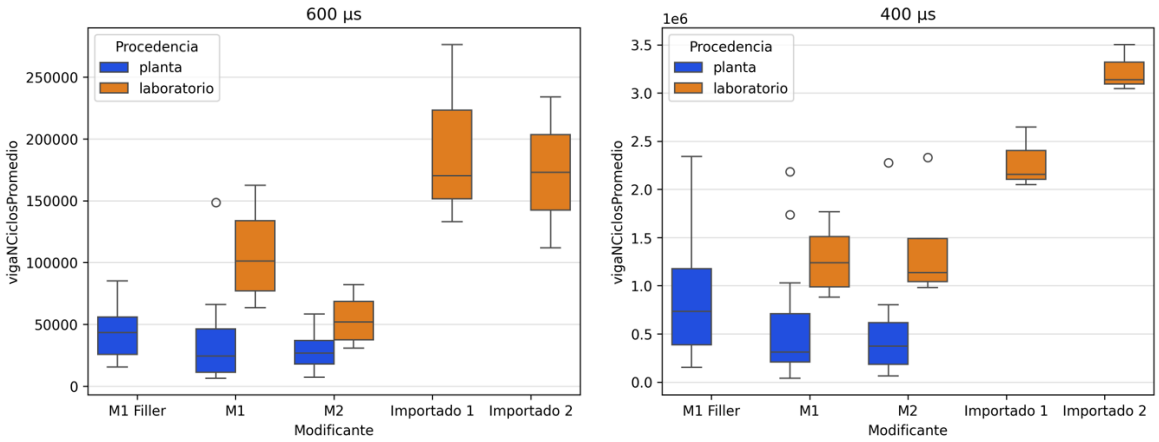

Figura 19. Gráficos de cajas y bigotes para número de ciclos de mezclas modificadas en planta y en laboratorio

Adicionalmente, se presentan los resultados de una investigación desarrollada en el laboratorio en el 2017, en la que se evaluó el desempeño de mezclas elaboradas con asfalto modificado importado. Ambas muestras, identificadas como “Importado 1” e “Importado 2”, alcanzaron un número de ciclos promedio mucho mayor que los alcanzados por las muestras modificadas en laboratorio y en planta.

Con base en los análisis realizados para las mezclas modificadas fabricadas en planta se evidencia que tanto la modificación del asfalto como el contenido de asfalto (efectivo) son variables que inciden y mejoran la susceptibilidad a la fatiga de las mezclas asfálticas, con los resultados obtenidos para los asfaltos modificados importados comparados con los

utilizados en Costa Rica para mezclas fabricadas en laboratorio se evidencia que el tipo de modificación sería una variable para garantizar la calidad de la mezcla asfáltica.

Cuadro 15. Resumen de propiedades de las mezclas elaboradas en planta y en laboratorio

					Promedios	
Deformación T321 (µs)	**Modificante**	**Procedencia**	**Cuenta**	**N° Ciclos**	**Pb (%)**	**Rigidez inicial (Mpa)**
400	**Importado 1**	**laboratorio**	3	2285102	5.83	4895.0
	Importado 2	**laboratorio**	3	3229206	5.82	5393.7
	M1	**laboratorio**	6	1272709	6.12	6190.0
		planta	22	517141	5.63	6929.6
	M1-F	**planta**	19	884534	5.38	6782.4
	M2	**laboratorio**	4	1395434	6.12	6318.8
		planta	26	459557	5.86	6143.8
600	**Importado 1**	**laboratorio**	3	193238	5.83	4588.3
	Importado 2	**laboratorio**	3	172908	5.82	5384.0
	M1	**laboratorio**	6	107018	6.12	5624.8
		planta	22	33927	5.63	6697.2
	M1-F	**planta**	19	42375	5.38	6249.8
	M2	**laboratorio**	4	54181	6.12	6124.5
		planta	26	28715	5.86	5883.0

En el Cuadro 15 se resumen los valores promedio de número de ciclos, porcentaje de asfalto y rigidez inicial para las mezclas, categorizadas por la deformación unitaria del ensayo, el tipo de modificante y su procedencia. De este cuadro se destacan varias observaciones:

- Las mezclas elaboradas en laboratorio utilizando modificantes M1 y M2, resultaron en números de ciclo de entre 315 % y 189 % más altos que sus contrapartes elaboradas en planta.

- Si bien las mezclas elaboradas en laboratorio utilizando los modificantes M1 y M2 resultaron con desempeños mucho mayores en el ensayo de viga a flexotracción, estas también fueron elaboradas con porcentajes de asfalto mayores (en promedio se utilizó un 0.4 % más de asfalto PTM en las mezclas de laboratorio).

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

- Al comparar las mezclas elaboradas en laboratorio utilizando los modificantes M1 y M2 con las mezclas elaboradas en planta con estos mismos modificantes y con contenidos de asfalto similares a las de laboratorio (entre 6.09 y 6.22 % PTM), las mezclas de laboratorio muestran números de ciclo entre un 285 % y 256 % más altos que las de planta.

- Las mezclas elaboradas con asfaltos modificados “Importado 1” e “Importado 2” tuvieron un desempeño mucho mayor que las mezclas modificadas en planta y en laboratorio con los modificantes utilizados en nuestro país. Esto, a pesar de que los porcentajes de asfalto utilizados en estas mezclas eran similares a las elaboradas en planta, y considerablemente menores a las elaboradas en laboratorio.

- De manera similar, se observan rigideces iniciales menores en las mezclas elaboradas con asfaltos modificados “Importado 1” e “Importado 2”, aun cuando sus porcentajes de asfalto son similares a los de las mezclas elaboradas en planta, y considerablemente menores a las elaboradas en laboratorio.

- Las mezclas elaboradas en planta utilizando el modificante M1 con relleno mineral o relleno mineral activo (M1-F) fueron las mezclas de planta que exhibieron un mejor comportamiento de susceptibilidad al agrietamiento por fatiga, sin embargo, siguen sin alcanzar el número de ciclos que resisten las mezclas elaboradas en el laboratorio.

Lo destacado en la última observación se muestra gráficamente en la Figura 20. Puesto que la rigidez juega un papel muy importante en la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de una mezcla asfáltica, se recomienda indagar más sobre los fenómenos que influyen en la rigidez de la mezcla asfáltica y su relación con el tipo de modificante y el porcentaje de asfalto utilizado.

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

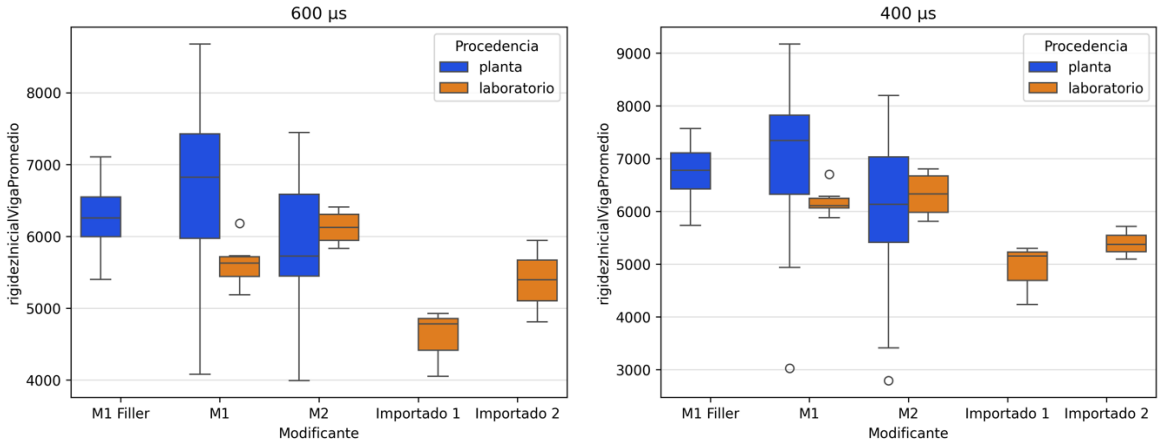

Figura 20. Gráficos de cajas y bigotes para rigidez inicial de mezclas modificadas en planta y en laboratorio

4.6. ANÁLISIS DE PRECIOS DE LAS MEZCLAS CONVENCIONALES Y MODIFICADAS EN COSTA RICA

A partir de los precios para la mezcla asfáltica en caliente, obtenidos de los contratos de conservación vial del 2023, se elabora la Figura 21. En esta se observa una comparación entre los precios de estos dos ítems.

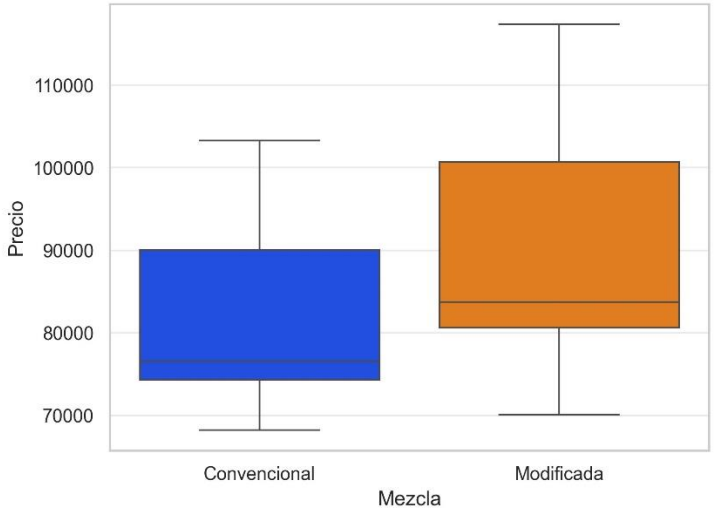

Figura 21. Gráfico de cajas y bigotes para los precios (CRC/ton) de la MAC, por tipo de mezcla

En promedio, las mezclas modificadas de estos contratos son un 9.3 % más caras que las mezclas convencionales. Esta diferencia en algunas empresas alcanza hasta un 13.8 %, mientras que en otras llega a ser apenas un 5.0 %.

En la Figura 22 se muestra un gráfico que compara los precios y cantidades históricas de la mezcla asfáltica en caliente colocada como parte del mantenimiento de la Red Vial Nacional, entre los años 2012 y 2020. En estos se incluyen únicamente los renglones de pago M45(A) y M45(E) correspondientes a Mezcla asfáltica en caliente y Mezcla asfáltica en caliente modificada con polímero.

Se puede observar que, en promedio, el precio de las mezclas convencionales es menor al de las mezclas modificadas. Sin embargo, para el mantenimiento de ese periodo, la cantidad de mezcla modificada que se colocó fue significativamente menor a la mezcla convencional.

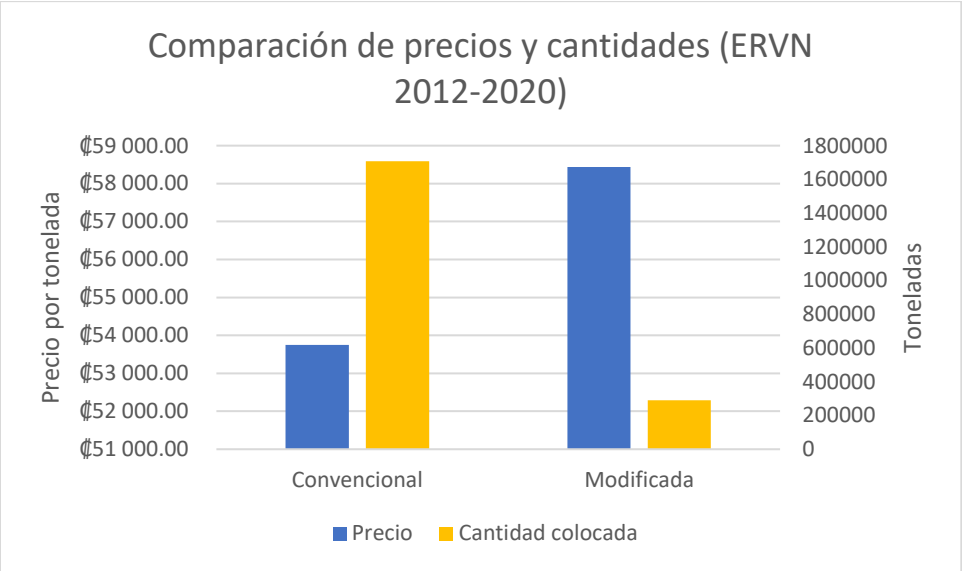

Figura 22. Precios y cantidades de mezcla asfáltica para mantenimiento vial en Costa Rica (2012-2020)

Fuente: UGERVN LanammeUCR

4.7. MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA EL NÚMERO DE CICLOS

Para determinar las variables que más aportan para explicar la variabilidad de los datos en el modelo, se realizaron diversas regresiones tipo *lasso* (regularización tipo I) que permiten limitar el sobreajuste de un modelo de regresión lineal múltiple y eliminar variables que no aportan significativamente al modelo.

Para esto, se realizó una regresión lineal inicial utilizando todos los datos de mezclas de planta en la base de datos. Se incluyeron algunas variables binarias y una variable adicional que se detallan en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Variables y parámetros para las regresiones

Variable	Tipo	Descripción
Alpha	Coeficiente	Penalización al modelo por incluir variables con coeficiente distinto de cero
b	Coeficiente	Intercepto de la regresión
C	Binaria	1: mezcla convencional 2: mezcla modificada
M1	Binaria	1: mezcla con modificante M1 2: mezcla con otro modificante
M2	Binaria	1: mezcla con modificante M2 2: mezcla con otro modificante
M1F	Binaria	1: mezcla con modificante M1F 2: mezcla con otro modificante
d400	Binaria	1: resultados a 400 µs 2: resultados a 600 µs
tmn19	Binaria	1: tamaño máximo nominal de 19 mm 2: tamaño máximo nominal de 12.5 mm
pb_div_pbOpt	Regular	$pb_div_pbOpt = \frac{Pb}{Pb_{opt}}$

Los resultados de la primera regresión se muestran en el Cuadro 17, en donde destacan como variables de mayor persistencia la rigidez inicial, la gravedad máxima teórica, la variable binaria de deformación del ensayo (d400), la de modificación (C) y la de modificación con el modificante M1F.

Luego se separaron los datos por deformación unitaria del ensayo (400 µs y 600 µs) y se realizaron las regresiones correspondientes. Para este caso se elimina la variable d400 pues sería redundante. Los resultados se muestran en el Cuadro 18 y Cuadro 19, las variables más persistentes son rigidez inicial y la variable binaria de modificación (C).

Al separar los datos de mezclas de planta modificadas por deformación unitaria del ensayo (400 y 600 µs) y eliminar la variable binaria de modificación (C), las variables de mayor persistencia son rigidez inicial, gravedad máxima teórica y la variable binaria de modificación M2. Los resultados se muestran en el Cuadro 20 y Cuadro 21.

Posteriormente, se analizaron las mezclas modificadas de las plantas P1, P2 y P3 individualmente, separando el análisis por deformación unitaria del ensayo (400 µs y 600 µs). Para estos análisis se eliminaron las variables binarias asociadas al modificante (M1, M2, M1F). En la planta P1 y P2, las variables más persistentes fueron el porcentaje de asfalto, rigidez inicial y la variable binaria para el tamaño máximo nominal de 19 mm (tmn19). Para la planta P3, las variables más recurrentes fueron la rigidez inicial y el porcentaje pasando la malla número de 0.075 mm (N° 200).

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Cuadro 17. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas de planta

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	C	M1	M2	M1F	pas#200	d400	tmn19	pb_div_pbOpt
0	48953	0.43	216793	-82.69	-17.24	-254457	-35532	-211177	184854	23499	425063	-24449	-712201
1000	-199728	0.42	114344	-77.93	-44.23	-138212	47650	-58799	244571	21321	417028	-36355	0
9000	16182	0.36	65784	-64.25	-68.69	-121161	0	0	177119	16192	379649	-3472	0
11000	89615	0.35	54272	-63.46	-70.85	-118651	0	0	159391	14481	371506	0	0
20000	464027	0.29	0	-61.80	-78.87	-107112	0	0	81527	4857	335487	0	0
23000	484240	0.28	0	-59.69	-79.78	-99610	0	0	62428	0	322602	0	0
33000	476729	0.22	0	-55.23	-84.17	-76432	0	0	0	0	280175	0	0
52000	434727	0.15	0	-47.69	-79.72	0	0	0	0	0	200469	0	0
100000	411328	0.01	0	-28.34	-102.35	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 18. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas de planta (ensayo a deformación de 400 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	C	M1	M2	M1F	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	-2457577	-1.12	689384	-167.87	1012103	-492071	-62954	-468103	613857	55619	-8220	-2452837
1000	-112544	-0.91	470089	-156.94	0	-380462	0	-309327	624011	51354	-30772	-1183591
3000	-350436	-0.73	285217	-144.38	0	-328287	0	-202191	573108	49061	-48532	0
16000	41694	-0.51	185950	-129.19	0	-231099	0	-45944	522168	44566	0	0
21000	280452	-0.45	142144	-127.18	0	-202461	0	0	494818	40384	0	0
40000	1214503	-0.29	0	-130.25	0	-178748	0	0	309938	23403	0	0
54000	1330184	-0.18	0	-127.73	0	-145429	0	0	206429	0	0	0
82000	1328156	-0.21	0	-127.44	0	-81362	0	0	0	0	0	0

Cuadro 19. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas de planta (ensayo a deformación de 600 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	C	M1	M2	M1F	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	31750	0.58	20948	-8.90	-0.69	-15651	4604	-12436	15584	-1193	-3630	-51608
100	15168	0.56	13146	-8.71	-2.89	-8169	9781	-1982	18904	-968	-4194	0
400	23777	0.53	10774	-8.53	-3.80	-10361	5478	-2480	13409	0	-2638	0
1000	39024	0.41	7316	-7.73	-5.17	-11213	0	-408	6065	0	0	0
1100	42819	0.39	6632	-7.74	-5.27	-10903	0	0	5353	0	0	0
1700	66713	0.32	2732	-7.99	-5.46	-10179	0	0	0	0	0	0
2300	81048	0.26	0	-7.99	-4.90	-7902	0	0	0	0	0	0
4200	74557	0.07	0	-7.51	-3.08	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 20. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de planta (ensayo a deformación de 400 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	M1	M2	M1F	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	-3475533	0.01	560631	-249.95	788715	-82843	-579899	281665	140455.287	-157364.76	75019
1000	-1388778	0.02	536629	-246.73	0	0	-497391	359696	134849.858	-144960.28	0
32000	497400	-0.08	166437	-197.57	0	0	-296027	165245	98041.8763	0	0
45000	1465429	-0.15	0	-188.56	0	0	-229070	83829	82455.2323	0	0
79000	1581073	-0.10	0	-154.09	0	0	-89825	0	17762.6629	0	0
88000	1595846	-0.08	0	-143.77	0	0	-41029	0	0	0	0

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Cuadro 21. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de planta (ensayo a deformación de 600 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	M1	M2	M1F	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	-32249	-0.07	34516	-12.61	-4.72	8340	-10931	19566	-531.449	-2301.31	-47466
100	-37403	-0.09	26846	-12.88	-6.65	8047	-7223	17094	0	-4137.13	0
300	-10023	-0.05	23544	-13.21	-7.66	0	-13802	7725	157.015	-3489.44	0
1400	72101	0.01	9635	-13.78	-11.71	0	-8069	0	0	-490.59	0
1600	81686	0.00	7724	-13.72	-12.24	0	-6459	0	0	0	0
2400	124052	-0.02	0	-13.83	-14.16	0	-559	0	0	0	0
2600	123618	-0.05	0	-13.78	-14.28	0	0	0	0	0	0

Cuadro 22. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P1 (ensayo a deformación de 400 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	-1709697	0.25	549900	-78.17	537477	16383	-100879.06	-2091029
100	-324026	0.25	521514	-75.68	0	9447	-107277.58	-1957911
500	-297775	0.25	445912	-76.78	0	0	-122590.44	-1467047
1800	-234367	0.23	219469	-80.43	0	-24826	-166653.68	0
42000	950095	0.13	0	-88.92	0	0	-64337.52	0

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Cuadro 23. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P1 (ensayo a deformación de 600 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	543306	0.19	27709	-5.79	-200203	-1747	-9305.41	-143257
100	46430	0.27	9300	-8.67	0	-2297	-13424.90	-7608
200	48604	0.28	7590	-8.83	0	-2061	-13335.99	0
800	57157	0.33	4341	-9.14	0	0	-11141.27	0
1700	81050	0.32	0	-8.94	0	0	-8769.26	0

Cuadro 24. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P2 (ensayo a deformación de 400 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	-5332380	0.26	175993	-61.32	1962290	-41791.49	149764.61	418480.73
400	-141682	0.32	163921	-72.10	0	-27098.76	165684.75	149583.94
600	-92294	0.32	182386	-73.52	0	-26122.18	168118.30	0.00
12600	884001	0.03	18387	-100.38	0	0.00	37823.05	0.00
13900	1010333	0.00	0	-103.40	0	0.00	23757.98	0.00

Cuadro 25. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P2 (ensayo a deformación de 600 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	877428	-0.38	51317	-7.73	-377872	-5015.45	19507.44	-127383.35
100	-106603	0.04	39808	-9.85	0	-4709.14	10929.05	0.00
1700	4785	-0.13	22223	-15.48	0	0.00	4249.38	0.00
2700	89748	-0.37	11526	-18.96	0	0.00	0.00	0.00

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Cuadro 26. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P3 (ensayo a deformación de 400 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	80566474	-957.31	-3176929	-566.27	-24941802	265580	306478	2151542
100	-5209693	-411.57	1224391	-703.73	0	741109	0	0
1900	2569709	-516.69	0	-691.83	0	584599	0	0

Cuadro 27. Resultados de regresión lasso para todas las mezclas modificadas de la planta P3 (ensayo a deformación de 600 µs)

Alpha	b	R^2	pb	rigidezInicial	gmm	pas#200	tmn19	pb_div_pbOpt
0	2951610	-12.54	52655	36.53	-1503947	16394	24135	156406
10	-2210615	-33.99	306766	45.80	0	37918	30382	0
290	-1009309	-113.86	94403	79.87	0	0	63716	0
470	-240020	-60.31	0	44.73	0	0	23911	0
520	-136640	-27.00	0	22.77	0	7265	0	0

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Se puede observar en algunos cuadros (como es el caso del Cuadro 18, Cuadro 21,Cuadro 25, Cuadro 26 y Cuadro 27) que los coeficientes de correlación de algunas regresiones son valores negativos. Esto indica que el error cuadrado de estas regresiones es mayor que el error cuadrado de la media.

Se decidió definir variables de interés, basándose en la persistencia observada anteriormente, e incluir estas en un modelo de regresión lineal múltiple sin regularización. En este caso se realizaron las regresiones para cada una de las tres plantas principales (P1, P2 y P3), tomando en cuenta solamente a las mezclas modificadas y separando los datos por deformación unitaria del ensayo (400 y 600 µs), según se muestra en el Cuadro 28.

Cuadro 28. Resumen de las regresiones lineales múltiples para cada planta principal de mezcla modificada (por deformación)

Deformación unitaria (µs)	Planta	R2	b	pb	rigidezInicial	tmn19
400	P1 (M2)	0.44	219700	238700	-180.05	-221000
	P2 (M1)	0.53	-2447000	550900	-57.72	340700
	P3 (M1-F)	0.89	38770000	-4578000	-1613.47	-1390000
600	P1 (M2)	0.65	42570	6228	-8.54	-13270
	P2 (M1)	0.61	-91320	31340	-9.42	10210
	P3 (M1-F)	0.49	363400	-38760	-12.70	-37370

Se observan coeficientes de determinación (R^2) positivos, que indican que la variabilidad de los datos es mejor explicada mediante los modelos realizados para los resultados de ensayo a una deformación unitaria de 600 µs.

4.8. VALORACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA DEL CR-2020 EN FUNCIÓN DE LAS MEZCLAS ANALIZADAS

A partir de los datos recopilados, se pudo observar como las mezclas asfálticas modificadas no cumplían simultáneamente con las especificaciones establecidas en el CR-2020 para el número de ciclos del ensayo AASHTO T321 a 400 µs y 600 µs.

En la Figura 23 se grafican los resultados del ensayo a 400 µs respecto a los resultados de 600 µs pero, únicamente para las mezclas modificadas en planta. Además, se resaltan con líneas de guiones y puntos los límites establecidos en la especificación nacional (verde para

las mezclas tipo D y azul para el tipo C). También se sombrean, con el mismo esquema de colores por tipo de mezcla, las áreas en las que una mezcla estaría en cumplimiento de ambas especificaciones.

De acuerdo con la recta de mejor ajuste, las especificaciones tipo D son, para efectos prácticos, coherentes entre sí. Considerando que para un número de ciclos a 400 µs de 300000, la ecuación de la recta indica que el número de ciclos a 600 µs corresponde a 25586. Este número de ciclos es muy cercano al establecido en la normativa nacional (25000 ciclos).

Caso contrario, sí se observa una diferencia significativa en las especificaciones para mezclas tipo C y la recta de mejor ajuste. En este caso, un número de ciclos a 400 µs de 450000, resulta en un número de ciclos a 600 µs de 29951.

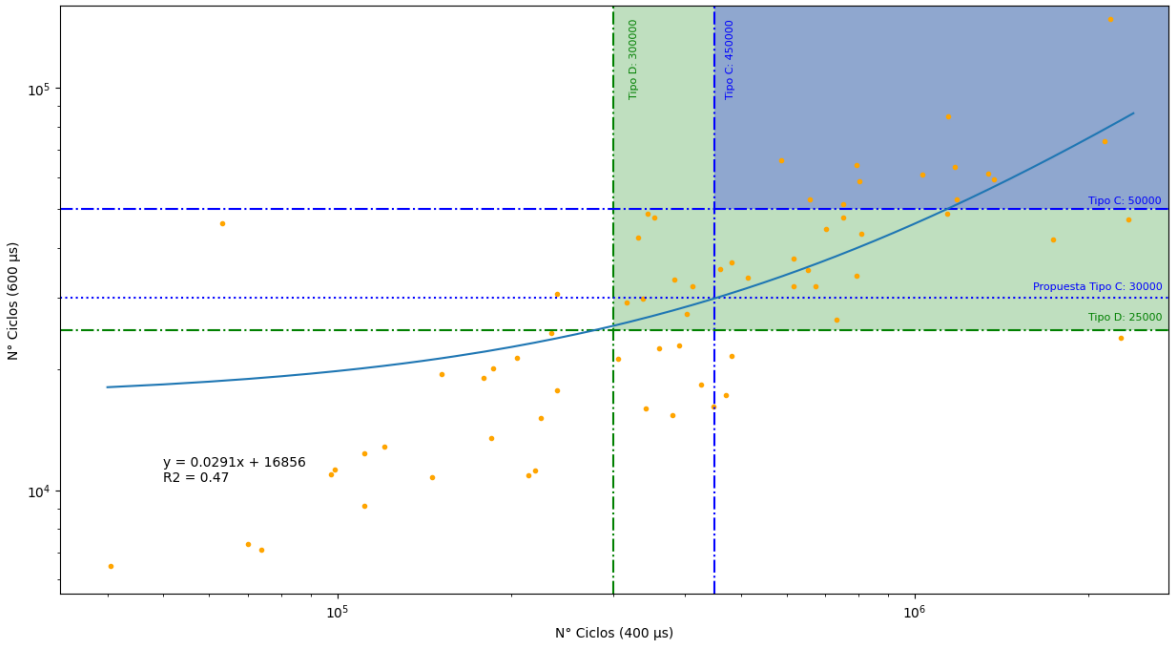

Figura 23. Coherencia de las especificaciones CR-2020 (mezclas modificadas)

Es evidente que, al reducir la especificación para mezclas tipo C a 30000 ciclos a 600 µs, los porcentajes de cumplimiento aumentan. El porcentaje de cumplimiento, tal y como se observa en el Cuadro 29, aumenta un total de 38 puntos porcentuales; es decir, un aumento del 200 % en el cumplimiento de las mezclas modificadas.

Cuadro 29. Cumplimiento de las especificaciones de fatiga del CR-2020 y las especificaciones propuestas, por tipo de mezcla

			Especificaciones CR-2020				Especificaciones propuestas			
			Cuenta		Porcentaje cumplimiento (%)		Cuenta		Porcentaje cumplimiento (%)	
Deform. T321	**Tipo**	**Cuenta**	**Tipo C***	**Tipo D****	**Tipo C***	**Tipo D****	**Tipo C†**	**Tipo D††**	**Tipo C†**	**Tipo D††**
400	**CONV**	57	4	15	7	26	4	15	7	26
	MOD	67	31	46	46	69	31	46	46	69
600	**CONV**	57	0	9	0	16	3	9	5	16
	MOD	67	13	38	19	57	34	38	51	57

* Tipo C: 450000 ciclos (400 us), 50000 ciclos (600 us)
** Tipo D: 300000 ciclos (400 us), 25000 ciclos (600 us)
† Tipo C propuesto: 450000 ciclos (400 us), 30000 ciclos (600 us)
†† Tipo D propuesto: 300000 ciclos (400 us), 25000 ciclos (600 us)

Se recomienda profundizar en las razones por las que las mezclas asfálticas producidas en plantas costarricenes no logran cumplir simultáneamente con las especificaciones de 400 µs y 600 µs establecidas para las mezclas tipo C.

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

5. CONCLUSIONES

5.1. SOBRE LAS CORRELACIONES ENTRE EL NÚMERO DE CICLOS DEL ENSAYO DE VIGA A FLEXOTRACCIÓN Y LAS VARIABLES VOLUMÉTRICAS

Mediante el análisis exploratorio de la base de datos se identificaron correlaciones generales entre el número de ciclos del ensayo de viga a flexotracción y algunas variables volumétricas de interés: porcentaje de asfalto, rigidez inicial de las vigas y gravedad máxima teórica.

Las correlaciones observadas hasta este momento, si bien seguían las tendencias esperadas, no eran muy fuertes. Esto se debe a que los mapas de calor de la correlación fueron elaborados utilizando todas las muestras, que tenían características diferentes.

Al realizar el análisis para las tres plantas principales productoras de mezclas modificadas por separado los comportamientos se mantienen, pero las magnitudes de los coeficientes cambiaron significativamente. La planta P2(M1) mostró los mayores coeficientes de correlación.

A partir de estas diferencias observadas entre el comportamiento de las correlaciones de las mezclas modificadas y convencionales, y de las correlaciones de las tres principales productoras de mezclas modificadas, se evidencia que la modificación y el tipo de modificación es una variable importante y que debe tomarse en cuenta para el análisis de estos datos.

En la mayoría de los casos, la mejora en el resultado de números de ciclo del ensayo de viga a flexotracción para las mezclas modificadas se vuelve significativa estadísticamente cuando se analizan los rangos de porcentaje de asfalto más altos (a partir de 5.75 % PTM).

Las mezclas de la planta P3(M1-F) alcanzaron estas mejoras en número de ciclos en porcentajes de asfalto bajos e intermedios. El uso de filler mineral calizo y filler activo en estas mezclas podría significar un aumento del asfalto efectivo sin que esto implique necesariamente un aumento en el porcentaje de asfalto. Lo anterior se vería reflejado en una menor susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de estas mezclas.

5.2. SOBRE EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA NACIONAL PARA LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA

En el caso de las mezclas modificadas, el porcentaje de cumplimiento aumenta significativamente, indicando que la modificación es un factor que impacta positivamente en el cumplimiento de especificaciones y en la susceptibilidad de estas mezclas ante el agrietamiento por fatiga.

De igual forma, se observa que los porcentajes de cumplimiento aumentan entre mayor es el rango de porcentaje de asfalto de la mezcla. Esto quiere decir que, en conjunto con la modificación, los porcentajes altos de asfalto también tienen un impacto positivo en el cumplimiento de especificaciones y en la susceptibilidad de estas mezclas ante el agrietamiento por fatiga.

Las mezclas modificadas en laboratorio superaron las especificaciones nacionales de fatiga en porcentajes que van desde el 108 % hasta el 1076 %. Esto indica que la calidad del proceso de modificación y la calidad del modificante o asfalto modificado impactan significativamente la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de las mezclas asfálticas.

Las mezclas convencionales presentan resultados consistentes del ensayo de viga a flexotracción sin importar la planta productora de las mezclas. Adicionalmente, la variabilidad de los resultados es menor para aquellos obtenidos cuando el ensayo se realizó a una deformación controlada de 600 µs.

A partir de los datos recopilados, se pudo observar como las mezclas asfálticas modificadas no cumplían simultáneamente con las especificaciones establecidas en el CR-2020 para el número de ciclos del ensayo AASHTO T321 a 400 y 600 µs.

De acuerdo con la recta de mejor ajuste, las especificaciones tipo D son, para efectos prácticos, coherentes entre sí. Considerando que para un número de ciclos a 400 µs de 300000, la ecuación de la recta indica que el número de ciclos a 600 µs corresponde a 25586. Este número de ciclos es muy cercano al establecido en la normativa nacional.

Caso contrario, sí se observa una diferencia significativa en las especificaciones para mezclas tipo C y la recta de mejor ajuste. En este caso, un número de ciclos a 400 µs de 450000, resulta en un número de ciclos a 600 µs de 29951. Lo anterior indica que las mezclas producidas en plantas costarricenses no logran cumplir simultáneamente con las

especificaciones de fatiga para mezclas tipo C. Se recomienda profundizar en las razones por las que estas mezclas no logran cumplir simultáneamente con las especificaciones tipo C, pero sí con las tipo D.

5.3. SOBRE LA VARIABILIDAD DE LOS RESULTADOS DE ENSAYO

La variabilidad aumenta en los resultados del ensayo de viga a flexotracción de las mezclas modificadas. Esto es esperable debido a que los procesos de modificación varían de planta a planta, incluyendo factores como el modificante, control de calidad de la modificación, control de los parámetros volumétricos y uso de filler activo o menos absorbente.

Las mezclas modificadas de la planta de producción P3 presentan números de ciclo del ensayo de viga a flexotracción más altos que las plantas P1 y P2.

La planta P3 presenta números de ciclo del ensayo de viga a flexotracción para la falla más altos que las plantas P1 y P2, sin embargo, emplea porcentajes de asfalto totales considerablemente menores a las plantas P1 y P2.

Aun cuando la planta P3 presenta números de ciclo del ensayo de viga a flexotracción más altos que las plantas P1 y P2, las rigideces iniciales de sus mezclas se encuentran en un rango intermedio respecto a las de las plantas P1 y P2.

Los resultados de la planta P3 pueden explicarse por el uso de relleno mineral calizo y relleno activo, mejor proceso de modificación y mejor control de calidad del proceso de modificación por contar con una planta de modificación industrial, entre otras razones.

La planta P1 utiliza porcentajes de asfalto más altos que la planta P2, sin embargo, esta diferencia no repercute positivamente en el aumento del número de ciclos para la falla de las mezclas de la planta P1 respecto a la planta P2. Sin embargo, sí tiene un impacto en la reducción de la rigidez inicial de las mezclas de estas plantas.

Tanto para los resultados a 400 µs como para los de 600 µs, las mezclas modificadas en laboratorio lograron alcanzar un número mayor de repeticiones que las modificadas en planta. Esta diferencia puede deberse a varias razones, entre ellas, la calidad del modificante utilizado, la calidad y control adecuado del proceso de modificación.

5.4. SOBRE EL ANÁLISIS DE COSTO GENERAL EN RELACIÓN CON EL DESEMPEÑO, LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA Y EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA

En promedio, las mezclas modificadas de los contratos de conservación vial del 2023 son un 9.3 % más caras que las mezclas convencionales. Esta diferencia en algunas empresas alcanza hasta un 13.8 %, mientras que en otras llega a ser apenas un 5.0 %.

A pesar de que existe este costo adicional asociado a las mezclas modificadas, no todas estas cumplen con lo requerido en el CR-2020 en relación con el agrietamiento por fatiga. Estos incumplimientos son mayores para aquellas mezclas que utilizan porcentajes de asfalto más bajos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adhikari, S., & You, Z. (2010). *Fatigue Evaluation of Asphalt Pavement using Beam Fatigue Apparatus.* Obtenido de Morehead: https://scholarworks.moreheadstate.edu/msu_faculty_research/399/

Al-Khateeb, G., & Shenoy, A. (2004). En G. Al-Khateeb, & A. Shenoy, *A distinctive fatigue failure criterion. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions. 73* (págs. 585-622).

Baghaee, T., Rehan, M., & Mahrez, A. (2011). A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *SCIENTIFIC RESEARCH AND ESSAYS, 6*(4), 670-682. doi:https://doi.org/10.5897/SRE10.946

Blankenship, P., & Iker, N. (2002). Interlayer and Design Considerations to Retard Reflective Cracking. . *Transportation Research Record. 1896.10.3141/1896-18*.

Canestrari, F., & Ingrassia, L. (2020). A review of top-down cracking in asphalt pavements: Causes, models, experimental tools and future challenges. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7*(5), 541-572. doi:https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.08.002

CONAVI. (2023). *Informe de Ejecución Presupuestaria 2023.* Obtenido de https://conavi.go.cr/documents/20126/36955/Informe+de+Ejecuci%C3%B3n+Presupuestaria+Conavi+2023.pdf/e0d18b1b-b850-26d6-e1d9-6d005c927f3a?t=1710520877080

Institute of Transportation Studies - University of California. (1994). *Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixes.* Obtenido de https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/shrp-a-404.pdf

Instituto Mexicano del Transporte. (2005). *Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas.* Obtenido de https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt272.pdf

Laname. (2024). *Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica: Años 2022-2023.* Obtenido de https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/2728/EIC-Lanamme-INF-1532-2023%20EvaRVN%202022-2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Martínez, M., & Pérez, I. (2015).). Mechanistic-empirical pavement design guide: features and distinctive elements. *Revista de la construcción, 14(1), 718-915*.

Molina, G. (2020). Diseño estructural de pavimento y viabilidad económica de tres rutas cantonales en la comunidad de Turrialba. Proyecto de graduación para optar por el grado de licenciatura en ingeniería en construcción. *Diseño estructural de pavimento y viabilidad económica de tres rutas cantonales en la comunidad de Turrialba*. Cartago, Costa Rica.

MOPT. (2010). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes. San José, Costa Rica.

Pellinen, T., Christensen, D., Rowe, G., & Sharrock, M. (2004). Funciones de transferencia de fatiga. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1896*, 77–87.

Riffo, K. (2013). Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. *Análisis de modelos de desempeño de MEPDG para el diseño de pavimentos rígidos en ola región de Bío-Bío*.

Rowe, G., & Bouldin, M. G. (2000). Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures. En G. Rowe, & M. G. Bouldin, *Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures* (págs. 754-763).

Varma, R., Padmarekha, A., Anjaneyulu, M., & Murali, K. (2016). Influence of post-processing methods for ranking of fatigue life of bituminous mixture. *Transportation Researich Procedia*, 567-575.