

Análisis de la variabilidad asociada a ensayos de fatiga en mezclas asfálticas

Analysis of the variability associated with fatigue tests in asphalt mixes

Melissa Karina Mora Valverde

Universidad de Costa Rica
Costa Rica
melikmora@gmail.com

Mónica Jiménez Acuña

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
monica.jimenez@ucr.ac.cr

José Pablo Aguiar Moya

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Wendy Sequeira Rojas

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
wendy.sequeira@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 30 de octubre de 2020 / **Fecha de aprobación:** 16 de febrero de 2021

RESUMEN

El presente artículo sintetiza el análisis de la variabilidad asociada a ensayos de fatiga, realizado en tres tipos de mezclas asfálticas en caliente y producidas en plantas asfálticas de Costa Rica. Los ensayos estudiados fueron: overlay (Tex-248-F), prueba de curva semi-circular (SCB, ASTM D8044-16) y la prueba de viga sometida a flexión en 4 puntos (AASHTO T321-17).

El problema radica en que existe mucha variabilidad en los resultados de los ensayos mencionados, generando que el análisis de dichos resultados sea cuestionado. Se debe tener en cuenta que el análisis de fatiga en mezclas asfálticas para carreteras en Costa Rica está regulado por el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica (CR-2010), del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), y este se basa en la metodología Superpave y el ensayo AASHTO T 321. Por lo tanto, el trabajo se desarrolló, con el fin de generar insumos, para evaluar distintos ensayos y su aplicabilidad en los procesos de diseño y construcción de carreteras de Costa Rica. Esto podría permitir en un futuro redefinir la legislación y regulaciones en este tema en Costa Rica. El estudio requirió, una recolección de información bibliográfica, una fase experimental, que incluía la caracterización de los materiales y especímenes, y las pruebas de fatiga. Con esto, se realizó el análisis de la variabilidad de los resultados; buscando encontrar factores de sensibilidad, tendencias en el comportamiento de las mezclas, así como ventajas y desventajas de los métodos.

Se verificó que la variabilidad depende de diferentes factores, en mayor medida de las propiedades de la mezcla. También, se identificó que el ensayo más variable fue el de la viga a flexo-tracción en cuatro puntos y que la prueba semi-circular requirió el menor tiempo y esfuerzo comparado con las demás pruebas.

Palabras clave: Análisis de variabilidad, ensayos, fatiga, MAC, pavimento flexible, overlay (OT), ensayo semi-circular (SCB), flexo-tracción en cuatro puntos (4PBB).

ABSTRACT

This research paper synthesizes the analysis of the variability associated with fatigue tests on three types of hot asphalt mixtures and produced in plants in Costa Rica. The tests studied were: overlay (Tex-248-F), semi-circular curve test (SCB, ASTM D8044-16) and the beam test subjected to 4 point bending (AASHTO T321-17).

These tests present a lot of variability in the results, which causes the analysis of the results could be questioned. It should be considered that the fatigue analysis in asphalt mixtures for highways in Costa Rica is regulated by the General Specifications Manual for the Construction of Highways, Roads and Bridges of Costa Rica (CR-2010) of the Ministry of Public Works and Transport (MOPT, by its acronym in Spanish), and that it is based on the Superpave methodology and the AASHTO T 321 test. Therefore, the work was developed to generate inputs to evaluate different tests and their applicability in the design and construction processes of Costa Rica highways. This could allow redefining national specifications on this topic, in the future.

The study required a collection of bibliographic information, an experimental phase, which included the characterization of the materials and specimens, and fatigue tests. Then, the analysis of the variability of the results was carried out, looking forward to sensitivity factors, trends in the behavior of mixtures, as well as advantages and disadvantages of the methods.

It was verified that the variability depends on different factors to a greater extent on the properties of the mixture. Finally, it was identified that the most variable test was the four-point bending-traction beam test and the semi-circular test required the least time and effort compared to the other tests.

Keywords: *Variability analysis, fatigue tests, hot asphalt mixtures, overlay, semi-circular test (SCB), four-point flexural-traction beam.*

INTRODUCCIÓN

El deterioro por fatiga en mezclas asfálticas es un tema importante de analizar ya que, debido al daño acumulado, después de años de funcionamiento, este es uno de los principales mecanismos de falla de estructuras de pavimento flexible. La fatiga se asocia a la respuesta resiliente de la estructura, dando lugar a fallas estructurales y funcionales en el pavimento, que se producen principalmente en la capa asfáltica y se generan por las cargas cíclicas impuestas por el parque automotor (Rondón *et al.*, 2012).

Los ensayos de fatiga son parte fundamental para la caracterización de las mezclas asfálticas, ya que estos se relacionan directamente con la capacidad de soportar carga a largo plazo de una mezcla asfáltica, siendo esta una característica fundamental para el diseño estructural de los pavimentos y el adecuado análisis financiero del mismo (Loría y Arce, 2003).

Costa Rica cuenta con varios laboratorios con equipo apropiado para el estudio de algunos ensayos de fatiga, lo que permite generar, ampliar y adaptar investigaciones o normas en el tema y generar un avance en la materia y un mejoramiento del desempeño y calidad de las vías.

Se puede afirmar que las mezclas asfálticas están formadas por una variedad de materiales, lo que las hace sumamente heterogéneas. Por esta razón y junto con otros factores asociados al proceso de ensayo, la variabilidad en los resultados de ensayos de fatiga es un hecho esperado.

Según Domínguez (2018), la fatiga en los materiales se da progresivamente, pues aumenta a mayor cantidad de ciclos de carga. Además, es localizado y puede terminar originando la aparición de grietas o hasta la fractura completa de la estructura después de un número suficiente de repeticiones de carga. Por lo tanto, si se desea diseñar y construir una estructura de pavimento duradera, resistente al deterioro, la fatiga se vuelve un fenómeno importante de controlar y minimizar.

Este estudio de fatiga de los materiales aportó un avance para alcanzar diseños adecuados de pavimentos. Además, una razón que demostró la necesidad de este estudio fue la falta de estándares que definieran el correcto diseño de los mismos, basándose en insuficientes regulaciones al respecto en Costa Rica. Por lo tanto, el estudio pretendió encontrar y estudiar, las causas de tan alta variabilidad en los resultados de los ensayos de fatiga, utilizados en Costa Rica, o bien, de fácil implementación. Lo anterior para eventualmente poder considerar estos factores en la actualización de especificaciones en Costa Rica.

Este proyecto, permitió profundizar en el tema de fatiga de los materiales en Costa Rica, para que de esta manera se puedan alcanzar diseños más adecuados de los pavimentos. Se evaluaron tres tipos de ensayos de laboratorio sobre fatiga en mezclas asfálticas, overlay (Tex-248-F), el método estándar de prueba para determinar la vida útil de fatiga de mezclas de asfalto compactado sometidas a flexión repetida (AASHTO T321-17) y el método de prueba estándar para la evaluación de la resistencia al agrietamiento de la mezcla de asfalto utilizando la prueba de curva semi-circular (SCB)

a temperaturas intermedias (ASTM D8044-16), con el fin de analizar su variabilidad, identificando posibles fuentes de error y relaciones que permitan redefinir la legislación y regulaciones en Costa Rica en este tema, debido a que los resultados de estos ensayos actualmente presentan variaciones muy grandes.

OBJETIVO

El objetivo principal del estudio consistió en analizar la variabilidad asociada a tres ensayos de fatiga en tres tipos de mezclas asfálticas en caliente (cuyas características se presentan en la metodología, en la sección de materiales), producidas en planta de Costa Rica.

Por lo tanto, para alcanzar el objetivo se procedió a realizar la caracterización de las mezclas asfálticas, analizar la

variabilidad del ensayo de fatiga overlay (Tex-248-F). También, se examinó la variabilidad del método estándar de prueba para determinar la vida útil de fatiga de mezclas de asfalto compactado sometidas a flexión repetida (AASHTO T321-17). Luego, se identificó la variabilidad del método de prueba estándar para la evaluación de la resistencia al agrietamiento de la mezcla de asfalto utilizando la prueba de curva semi-circular (SCB) a temperaturas intermedias (ASTM D8044-16). Finalmente, se comparó los resultados experimentales de los ensayos de fatiga en estudio para identificar la variabilidad asociada a estos.

METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados en el estudio, se siguió la metodología de investigación mostrada en la Figura 1.

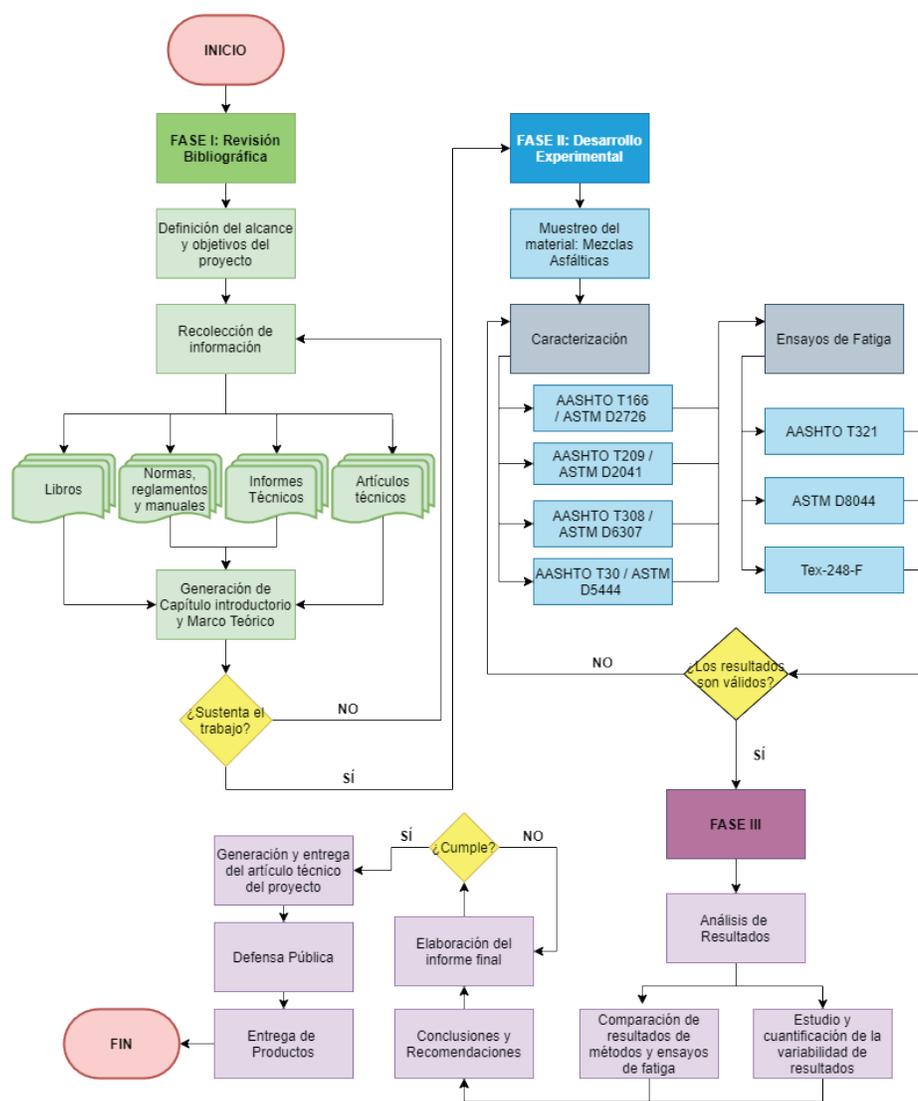


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología

MATERIALES

Cómo se observa en la Figura 1, se inició con una fase de revisión bibliográfica, adquiriendo fundamentos teóricos y conociendo la reglamentación y normativa costarricense. Luego, se procedió con la caracterización de los materiales, la cual comprendió el desarrollo de los ensayos: granulometría del agregado extraído (AASHTO T30 / ASTM D5444), gravedad específica bruta para especímenes compactados (AASHTO T166 / ASTM D2726), gravedad específica máxima teórica (AASHTO T209 / ASTM D2041) y contenido de asfalto por ignición (AASHTO T308 / ASTM D6307), cuyos resultados se muestran en la Figura 2, y los Cuadros 1 y 2.

Cabe destacar que las mezclas asfálticas en caliente escogidas, fueron diseñadas y producidas en plantas asfálticas de Costa Rica, con el fin de estudiar diseños de uso común dentro del territorio costarricense y estas fueron: 1) Mezcla convencional, de tamaño máximo nominal (TMN) de 12,5 mm, con fuente de agregado de San Carlos, Alajuela, Costa Rica. 2) Mezcla convencional, con un TMN de 12,5 mm igualmente, pero con fuente de agregado de Guápiles, Limón, Costa Rica. 3) Mezcla modificada con Elvaloy y ácido polifosfórico (PPA), de TMN de 19,00 mm, con fuente de agregado de Guápiles, Limón, Costa Rica.

Cuadro 1. Resumen de los resultados del contenido de asfalto con correcciones y GMM gravedad máxima teórica, por mezcla

Mezcla	Contenido de agua (%)	Contenido de asfalto PTM (%)	Gmm
Convencional (12,5) / San Carlos	0,4963	6,2	2,471
Convencional (12,5) / Guápiles	0,2181	5,97	2,481
Modificada (19,0) / Guápiles	0,4172	5,98	2,478

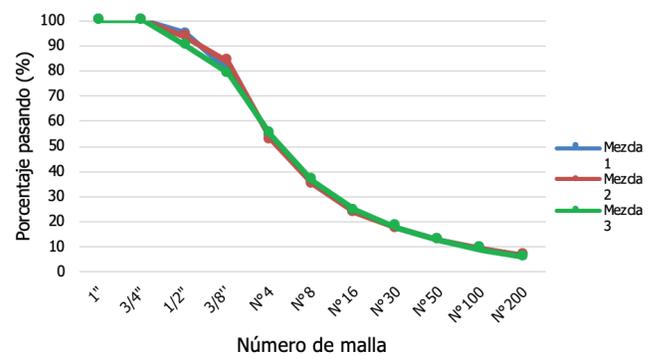


Figura 2. Granulometría del agregado, por mezcla

Cuadro 2. Resumen de gravedad específica bruta, porcentaje de vacíos y absorción de agua, en especímenes cortados, para las mezclas 1, 2 y 3

Ensayo	Mezcla Convencional (12,5) / San Carlos			Mezcla Convencional (12,5) / Guápiles			Mezcla Modificada (19) / Guápiles		
	Gbs promedio	Absorción de agua (%)	Vacíos (%)	Gbs promedio	Absorción de agua (%)	Vacíos (%)	Gbs promedio	Absorción de agua (%)	Vacíos (%)
Vigas B1	2,296	1,1	7,1	2,318	0,6	6,6	2,293	1,3	7,5
Vigas B2	2,313	1,5	6,4	2,296	1,1	7,4	2,291	1,3	7,5
Vigas B3	2,299	2,4	6,9	2,296	1	7,5	2,297	1,3	7,3
Overlay	2,304	1,5	6,8	2,309	1,2	6,9	2,307	1,3	6,9
SCB	2,31	1,5	6,5	2,308	1,1	7,0	2,313	1,0	6,6

B1: Bloque 1, B2: Bloque 2 y B3: Bloque 3, cada bloque está compuesto por 4 vigas. SCB: Ensayo semi-circular

Ensayos de fatiga

Una vez preparadas las mezclas a evaluar, se procedió con la realización de los ensayos de fatiga: viga a flexo-tracción en cuatro puntos (AASHTO T321), viga semi-circular (ASTM D8044) y overlay test (Tex-248-F).

Estos ensayos de fatiga fueron escogidos debido a que el ensayo de la viga a flexo-tracción es el único que se utiliza en Costa Rica a nivel de especificación y de proyectos; los ensayos de overlay y semi-circular (SCB) son de importancia a nivel internacional. Además, cuentan con duraciones de ensayo más bajas con respecto al ensayo de la viga, no requieren de equipo muy especializado para su desarrollo y son los que se podrían implementar fácilmente en Costa Rica.

El Cuadro 3 muestra el tamaño de la muestra utilizada, se escogió una cantidad adicional de especímenes con el fin de captar mejor el efecto de la variabilidad y poder cuantificar si esta se mantiene o si existe la presencia de valores extremos. Se descartaron datos atípicos mediante un análisis estadístico de diagrama de cajas.

La variabilidad en los resultados de fatiga se entiende, para este caso, como la oscilación de los resultados en rangos muy amplios, afectando la precisión de estos. Como se mencionó anteriormente, esto produce que los resultados sean cuestionados por los profesionales o personas interesadas en el área. En el proyecto, la variabilidad fue estudiada utilizando el coeficiente de variación (CV), una medida de dispersión estadística. Esta, es una medida relativa del grado de variabilidad, hace referencia a la relación entre, la media de una variable y su variabilidad, y no depende de la escala de la variable. El análisis de variabilidad se realizó en la variable del número de ciclos a la falla para el ensayo overlay; en la energía de deformación, para el ensayo semi-circular y en el número

de ciclos de fatiga y rigidez por número de ciclos de fatiga (S_{xn}), para el ensayo de la viga a flexo-tracción. Los resultados podrían estar afectados por factores como: materiales, equipo o preparación de la muestra.

Por otra parte, existen factores que pueden afectar la variabilidad de los resultados como la preparación de especímenes, el cual es un proceso delicado, por lo cual se recomienda seguir las instrucciones dadas por cada norma. También, se realizó el método de secado de muestras, utilizando un horno de secado al vacío, disminuyendo la influencia negativa de la humedad en los resultados. Estos factores podrían influir en el aumento de la variabilidad de los resultados, sin embargo, en el presente estudio no se cuantificó su efecto.

Ensayo overlay (Tex-248-F)

Los parámetros utilizados para este ensayo fueron: frecuencia de 0,1 Hz, longitud de ciclo de 10 s y temperatura de 25±0,5°C, tensión aplicada, a un desplazamiento máximo constante de 0,025 pulgadas. (0,635 mm), porcentaje de vacíos del 7±1%, para especímenes recortados. Además, se agregó un tiempo de 10 minutos, como período de relajación y estabilización de temperatura, antes de la prueba, con carga cero. La prueba se ejecutó hasta una reducción del 93% de la carga máxima, midiendo desde el primer ciclo de apertura. O bien, si no se alcanzó esta reducción dentro de 1200 ciclos, el equipo detuvo la prueba automáticamente. El epóxico utilizado para adherir la muestra al equipo, tiene una resistencia a la tracción de 4,1 MPa (600 psi) y un tiempo de secado de 24 h. En cuanto al corte de las muestras, la cara superior del espécimen no fue cortada, por lo que la superficie queda rugosa. Lo anterior, con el fin de lograr un comportamiento homogéneo del porcentaje de vacíos de las muestras, tanto en muestras inferiores como superiores del bloque compactado, la parte rugosa quedó libre de pegamento, y la parte cortada, quedó en contacto con las placas mediante el epóxico.

Cuadro 3. Tamaño de la muestra

Ensayo	Especímenes por norma por mezcla	Especímenes adicionales, por mezcla	Total de especímenes, por mezcla	Valores atípicos para el conjunto de mezclas	Envejecimiento (85°C)
AASHTO T321	400 µε: 4	400 µε: 2	400 µε: 6	3	5 días
	600 µε: 4	600 µε: 2	600 µε: 6	1	5 días
ASTM D8044	Ranura 25 mm: 4	Ranura 25 mm: 2	Ranura 25 mm: 6	3	5 días
	Ranura 32 mm: 4	Ranura 32 mm: 2	Ranura 32 mm: 6	3	5 días
	Ranura 38 mm: 4	Ranura 38 mm: 2	Ranura 38 mm: 6	2	5 días
Tex-248-F	3	2	5	5	5 días

µε: microstrain (deformación)

Ensayo viga semi-circular

Las tres profundidades de ranura nominales utilizadas fueron 25 mm, 32 mm y 38 mm, con un ancho de ranura de <3,5 mm. Ambas caras semicirculares del espécimen debían ser cortadas, pero para este caso, solo las caras internas fueron cortadas, las externas se dejaron con superficie rugosa, como lo muestra la Figura 3. Lo anterior con el mismo fin que para las muestras overlay.



Figura 3. Especímenes ensayo viga semi-circular

Se tomaron en cuenta los parámetros de prueba siguientes: una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$, una velocidad de deformación constante de 0,5 mm/min, con una frecuencia de muestreo de 10 Hz, el porcentaje de vacíos de aire objetivo fue de $7,0 \pm 0,5\%$; además, se aplicó una precarga de 45 N durante 30 s para asegurar que la muestra se asiente correctamente. La prueba finalizó automáticamente cuando la carga aplicada disminuyó al 25% de la carga máxima.

Ensayo de viga a flexo-tracción en cuatro puntos

El equipo utilizado fue capaz de proporcionar una carga sinusoidal repetida en una frecuencia de 10 Hz. Además, de someter las muestras a flexión de cuatro puntos, con rotación libre y traslación horizontal en todos los puntos de carga y reacción. La temperatura de prueba utilizada fue de 20°C . Las deformaciones aplicadas fueron de: 4 muestras (vigas) a 400 microstrain y 4 muestras a 600 microstrain, por mezcla. La rigidez inicial fue calculada en el ciclo número 50, la relación de Poisson predeterminada fue de 0,4. La condición de parada fue: la rigidez de terminación, la cual se dio al 50% de la rigidez inicial y el número máximo de ciclos permitidos fue de diez millones de ciclos.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Variabilidad de Ensayos de Fatiga

El Cuadro 4, muestra un resumen de la variabilidad de los resultados de laboratorio, obtenidos al realizar los tres ensayos de fatiga seleccionados, en las tres mezclas asfálticas mencionadas. Esto permite observar de manera general, si existe o no alguna tendencia en el comportamiento de las mezclas.

En el Cuadro 4, se observa que la mezcla 1 presentó la mayor variabilidad en los ensayos de viga semi-circular y de la viga a flexo-tracción. Además, la mezcla 2 presenta una tendencia a la menor variabilidad, en los 3 ensayos estudiados. Este comportamiento podría estar asociado a la rigidez de la

Cuadro 4. Resumen de la variabilidad para cada tipo de mezcla, según cada ensayo

Ensayo / Condición	CV (%)							
	Overlay	SCB (Energía de deformación)			Viga flexo-tracción (Número de ciclos)		Viga flexo-tracción (Sxn)	
		Número de ciclos a la falla	Ranura 25 mm	Ranura 32 mm	Ranura 38 mm	400 $\mu\epsilon$	600 $\mu\epsilon$	400 $\mu\epsilon$
Mezcla 1	6	10,79	13,85	23,83	49,8	31,7	50,0	36,5
Mezcla 2	5	10,30	1,92	16,13	14,8	22,9	19,3	28,6
Mezcla 3	28	7,50	12,76	11,68	25,6	26,0	20,0	35,6
Rangos	5% - 28%	1,9% - 24%			14% - 50%		19% - 50%	

Notas: CV: Coeficiente de variación, SCB: ensayo ASTM D8044-16
Sxn: rigidez por número de ciclos de fatiga

mezcla, pues la mezcla 1, se consideró como la mezcla más rígida, según ensayos de caracterización y resultados de resistencia. Sin embargo, la mezcla 3 es la menos rígida, por lo tanto, en este caso podrían estar afectando otros factores como el contenido de asfalto, naturaleza del agregado, presencia y tipo de polímeros y tamaño máximo nominal de la muestra.

El ensayo que se consideró más variable es el ensayo de la viga a flexo-tracción. En este caso, es deseable tener un coeficiente de variación constante para los distintos niveles de la prueba, sin embargo, esto tampoco se cumple, pues se tiene un rango de variabilidad bastante amplio, entre 14,8% y 50,0%, considerándose una desventaja para el ensayo pues afecta su repetividad y la representatividad de la media disminuye.

La Figura 4 muestra los gráficos que representan cómo se distribuye en cada mezcla, los coeficientes de variación según el ensayo. Por ejemplo, para la mezcla 1, el %CV del ensayo de la viga a flexo-tracción, para la variable Sxn a 400 microstrain,

representó un 23% con respecto a las demás variables, casi 8 veces más variable que el %CV del ensayo overlay.

Cabe destacar que las mezclas asfálticas son mezclas sumamente heterogéneas, por lo tanto, sus comportamientos y respuestas son influenciados por muchos factores y componentes. Las propiedades de los materiales que la conforman juegan un papel muy importante en su desempeño y variabilidad de los resultados.

Además de los datos encontrados, comparando con los resultados de la caracterización de los materiales, se observó que para el ensayo overlay, el CV en el número de ciclos a la falla fue mayor para la mezcla modificada con polímeros, con mayor TMN y para las muestras con el menor CV del porcentaje de vacíos. Por otra parte, no se observó alguna tendencia en el comportamiento de la variabilidad con distintos contenidos de asfalto.

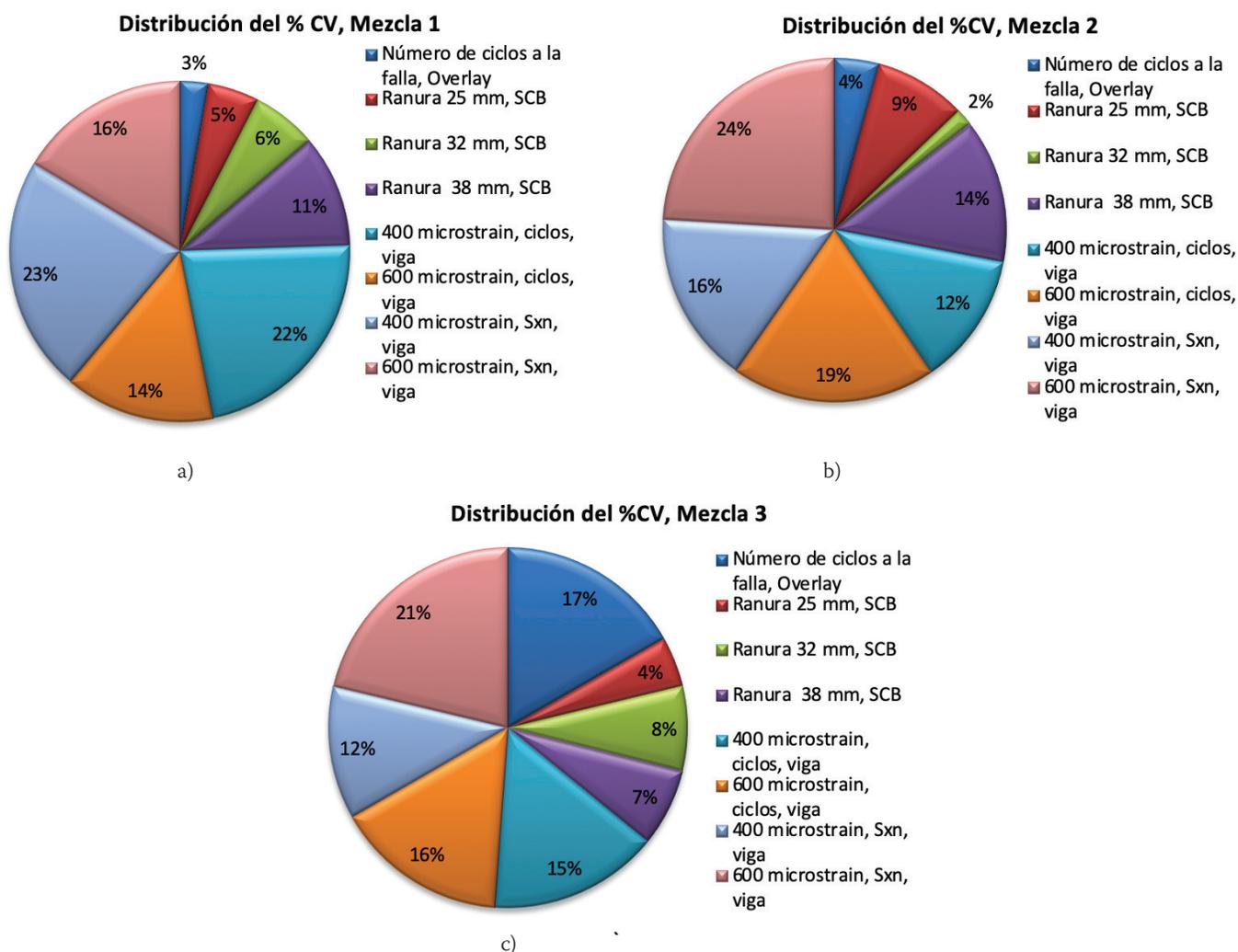


Figura 4. Gráficos de distribución del %CV para a) mezcla 1, b) mezcla 2, c) mezcla 3

Analizando el ensayo SCB, el CV de la energía de deformación, aumentó en las muestras con mayor contenido de asfalto y con mayor tamaño de ranura, sin embargo, no mostró tendencia a aumentar o disminuir la variabilidad de la energía de deformación con propiedades como presencia de polímeros, TMN del agregado o el CV del porcentaje de vacíos.

La variabilidad de la energía de deformación a la falla en el ensayo SCB se relacionó con los siguientes factores: el contenido de asfalto, tamaño de la ranura y su tiempo de ensayo, es decir, con un fallo más rápido, mayor variabilidad en los resultados. Además, se determinó que es el ensayo que muestra la menor variabilidad en sus resultados, tanto en variabilidad como en duración y requiere del menor esfuerzo comparado con las demás pruebas, desde un punto de vista de cantidad de tiempo. Por otro lado, excluye el tiempo de uso y curado del epóxico (el cual es necesario para el ensayo overlay), tampoco requiere de un transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT por sus siglas en inglés).

Con respecto al ensayo de la viga a flexo-tracción, el CV para las variables S_{xn} y número de ciclos a la falla aumentó cuando había un menor CV en el porcentaje de vacíos y en las muestras con mayor contenido de asfalto, pero no presentó tendencias a aumentar o disminuir, para muestras con polímeros o en las variaciones del TMN del agregado.

Se observó, además, que la mezcla 1 presentó la mayor variabilidad en todos los casos y la mezcla 2 mostró los resultados más homogéneos. Por otro lado, el parámetro S_{xn} fue el más variable para todas las mezclas, por lo que se recomienda trabajar con el número de ciclos de fatiga. Se determinaron factores que afectaron la variabilidad de los parámetros en estudio, estos fueron el contenido de asfalto y el CV del porcentaje de vacíos. Por último, el ensayo de la viga a flexo-tracción (AASHTO T321-17) fue el que mostró la mayor variabilidad de sus resultados y duración de desarrollo, lo cual dificultó la interpretación de los resultados y la repetibilidad del ensayo.

La norma overlay recomienda probar las muestras dentro de los 5 días posteriores al moldeo, sin embargo, la condición anterior no se logró cumplir en el desarrollo de este proyecto por razones de disponibilidad de personal, equipos y por el tiempo de envejecimiento determinado. Según Walubita *et al.* (2012), un tiempo de espera más prolongado, propicia que los aglomerantes de asfalto comiencen a oxidarse y a endurecerse. Es decir, que la mezcla sea más rígida y quebradiza con una

menor resistencia al agrietamiento, de ahí una disminución del número de ciclos con el aumento del tiempo de sesión. Razón por la cual, esta condición es una posible fuente de variabilidad en los resultados.

Para el ensayo overlay, los factores que afectaron la variabilidad de los resultados fueron: uso de epóxico para la fijación de la muestra al equipo, un tiempo de espera más prolongado entre el moldeo y la falla de los especímenes, propiciando que los aglomerantes de asfalto comenzaran a oxidarse y a endurecerse, el CV del porcentaje de vacíos, porcentaje promedio de vacíos, la presencia de polímeros y el tamaño máximo nominal de la mezcla.

Además, el ensayo no fue sensible a diferencias entre mezclas, es decir, la mezcla que se consideraba más rígida era la mezcla 1 y fue la que resistió mayor cantidad de ciclos, la mezcla 3, modificada con polímero y, por lo tanto, con mejor desempeño, fue la que resistió menor cantidad de ciclos. Como menciona Walubita y otros (2012), la aplicación de este ensayo como una prueba confiable de susceptibilidad al agrietamiento en el laboratorio, es un desafío por sus problemas de repetibilidad y variabilidad, aunque Parker (2010), considera la prueba como candidato justo para la aplicación en procesos de diseño de mezcla de rutina. Una de las mayores desventajas encontradas durante el proceso, fue en el ensayo overlay con el uso de epóxico para fijar la muestra al equipo e iniciar el ensayo, pues esto influyó en la variabilidad de los resultados, aumentó costos y tiempos de trabajo.

Como se observa, no necesariamente el contenido de asfalto es el único parámetro de influencia en la resistencia a la fatiga (esto es aplicable a los tres ensayos en estudio), debido a que también hay presencia de aditivos y modificaciones de mezclas, los cuales se utilizan para mejorar el comportamiento de la carpeta asfáltica, ante una determinada característica. En conclusión, no se puede estudiar un factor aislándolo del resto de posibles variables, pues las mezclas al ser elementos tan heterogéneos, varios factores podrían estar influyendo simultáneamente en la variabilidad de los resultados.

La simplicidad en un método de prueba, así como la facilidad de preparación de las muestras, son factores que se determinaron importantes a considerar en los procesos de diseño de mezclas. Y los ensayos SCB y overlay, se encontraron sencillos de preparar y fáciles de manejar, además adecuados para extracción de núcleos de campo.

Clasificaciones

Se generaron dos clasificaciones, una basada en la variabilidad de los resultados y otra basada en la duración del ensayo. El Cuadro 5, muestra la primera clasificación, basada en los resultados de variabilidad del Cuadro 4. Se puede observar que fueron 8 las condiciones que se analizaron, clasificadas por mezcla. Se le asignó el número 1 a la condición que mostraba la menor variabilidad y el número 8 a la condición con mayor variabilidad.

Por ejemplo, para la mezcla 1, el ensayo overlay tenía un CV de 6% y el ensayo de la viga a flexo-tracción, para la variable Sxn en su condición de 400 microstrain, tenía un CV de 50%, por lo tanto, al ensayo overlay se le dio una clasificación de 1 y al ensayo de la viga, una clasificación de 8, y así sucesivamente para las demás condiciones y para la Mezcla 2 y 3. Para obtener la clasificación parcial, se realizó una suma horizontal de los valores dados a las mezclas 1, 2 y 3 (Cuadro 5), entonces, para la suma menor, se le asignó el número 1, y para la suma mayor se le asignó el número 8. La clasificación general, se generó con el fin de, unificar la variabilidad presente en cada ensayo y poder realizar una comparación, este se determinó únicamente observando los resultados la clasificación parcial, donde hay una notable diferencia entre los valores, por ejemplo, se observa que, para el ensayo de la viga a tracción, predomina la presencia de clasificaciones por encima de 5.

El Cuadro 6 muestra la segunda clasificación generada, basada en la duración de los ensayos, se muestran las respectivas duraciones en minutos de cada ensayo y para cada mezcla. Se le asignó el número 1 al ensayo que tiene la menor duración y el número 3, al ensayo con mayor duración. Por ejemplo, el ensayo SCB tuvo duraciones en un rango de 3,98 min a 5,01 min, lo cual representa el menor rango, dándosele una clasificación de 1. Para el caso del ensayo de la viga a flexo-tracción, este presentó rangos de duración de 395,43 min a 2123,63 min, superando notablemente los otros dos ensayos, y por eso se le da la clasificación de 3.

En ambas clasificaciones (Cuadros 5 y 6), se observa que los ensayos poseen la misma clasificación. Es decir, el ensayo que mostró la menor variabilidad en sus resultados y la menor duración de ejecución fue el ensayo semi-circular (ASTM D8044). Y el ensayo con la mayor variabilidad en sus resultados y mayor duración de ejecución, con diferencias significativas, fue el ensayo de la viga a flexo-tracción (AASHTO T321-17).

Cuadro 5. Clasificación basada en la variabilidad de los resultados

Ensayo	Condición		Variabilidad				Clasificación General
			Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Clasificación Parcial	
Overlay	Número de ciclos a la Falla (OT)		1	2	7	3	2
SCB	Energía de Deformación a la Falla (U)	R 25 mm	2	3	1	1	1
		R 32 mm	3	1	3	2	
		R 38 mm	4	5	2	4	
Viga a flexo-tracción	Número de ciclos de fatiga	400 $\mu\epsilon$	7	4	5	5	3
		600 $\mu\epsilon$	5	7	6	6	
	Sxn	400 $\mu\epsilon$	8	6	4	6	
		600 $\mu\epsilon$	6	8	8	8	

R: Ranura, $\mu\epsilon$: microstrain (deformación)

Cuadro 6. Clasificación basada en la duración de los ensayos

Ensayo	Condición	Duración promedio (min)			Ranking
		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	
Overlay	-	29,20	26,33	23,00	2
SCB	R 25 mm	5,01	4,18	3,98	1
	R 32 mm	4,91	4,34	4,12	
	R 38 mm	4,23	4,70	4,10	
Viga	400 $\mu\epsilon$	395,43	757,46	2123,63	3
	600 $\mu\epsilon$	103,54	111,26	137,43	

R: Ranura, $\mu\epsilon$: microstrain (deformación)

CONCLUSIONES

Se logró analizar la variabilidad de los ensayos de fatiga, mediante el análisis del coeficiente de variación y realizar la caracterización de los materiales en estudio, con resultados satisfactorios.

Se compararon los resultados experimentales de los ensayos de fatiga en estudio mediante gráficos y cuadros, esto permitió definir que la mezcla 1, presentó la mayor variabilidad en los ensayos de viga semi-circular y de la viga a flexo-tracción. También, la mezcla 2 tuvo una tendencia a la menor variabilidad, en los 3 ensayos estudiados. Además, el ensayo que se consideró más variable fue el de la viga a flexo-tracción, con rangos entre 14,8% y 50,0% considerándose una desventaja para el ensayo, pues afecta su repetitividad y la representatividad de la media disminuye.

Se determinó que el ensayo que mostró la menor variabilidad en sus resultados y la menor duración de ejecución fue el ensayo semi-circular (ASTM D8044). Y el ensayo con la mayor variabilidad en sus resultados y mayor duración de ejecución, con diferencias significativas, fue el ensayo de la viga a flexo-tracción (AASHTO T321-17). La variabilidad encontrada fue importante, llegando a valores hasta del 50%, lo que afectaría la repetitividad de los ensayos y la precisión en los resultados, limitando su confiabilidad.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que el ensayo de la viga a flexo-tracción (AASHTO T321-17) sea de uso únicamente de investigación ya que no se considera sencillo y se vuelve poco práctico, debido a la complejidad del equipo, dimensiones de la muestra y largos tiempos de prueba. Además, si se desea considerar este ensayo para procesos de diseño de mezclas Superpave o pruebas de garantía de calidad, la duración del ensayo podría atrasar dichos procesos, o generar incertidumbre debido a la variabilidad de los resultados.

Se considera necesario el control, monitoreo, evaluación y realización de ensayos acelerados de secciones a escala natural para estudiar el comportamiento de la estructura total del pavimento, calibraciones e inclusión de modelos de predicción en el diseño estructural de pavimentos flexibles.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, por el préstamo de equipo y tutela de los ensayos para cumplir con el desarrollo del proyecto. Asimismo, se agradece al equipo asesor, conformado por: José Aguiar, Mónica Jiménez y Wendy Sequeira, por su orientación durante el proceso práctico y redacción. Por último, se reconoce el apoyo de las empresas: Constructora Meco y Constructora Herrera, por la donación del material necesario para el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

- Domínguez, J. (22 de enero 2018). La fatiga de los materiales y su tolerancia al daño. *El Mundo*. Recuperado de <https://www.elmundo.es/economia/2018/01/16/5a5de0e4e5fdeaad3c8b45e5.html>
- Loría, G., y Arce, M. (2003). *Análisis de fatiga en mezclas asfálticas* (LM-PI-PV-IN-XX-02). Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1200>
- Parker, B. (2010). *Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete fatigue cracking resistance*. Tesis de maestría, Texas A&M University.
- Rondón, H., Reyes, F., Gonzáles, L., y Vásquez, S. (2012). *Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas*. Bogotá, Colombia: Ecoediciones
- Walubita, L., Faruk, A., Das, G., Tanvi, H., Zhang, J., y Scullion, T. (2012). *The Overlay Tester: A Sensitivity Study To Improve Repeatability And Minimize Variability In The Test Results* (FHWA/TX-12/0-6607-1). Recuperado de <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-6607-1.pdf>