

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Evaluación de procedimientos de ensayo y análisis de la influencia del
envejecimiento en la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas
asfálticas en laboratorio**

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Luis Gustavo Muñoz Masis

Director de Proyecto de Graduación:
Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

HOJA DE APROBACIÓN

Tribunal de graduación:



Director: Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.

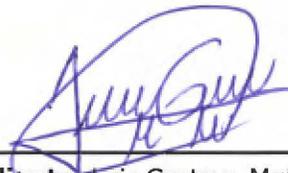


Asesora: Ing. Mónica Jiménez Acuña



Asesora: Ing. Jonathan Agüero Valverde, Ph.D.

Estudiante:



Estudiante: Luis Gustavo Muñoz Masis

DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Fecha: 2020, Junio, 16

El suscrito, Luis Gustavo Muñoz Masis, cédula 6-0399-0882, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B14593, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación: **Evaluación de procedimientos de ensayo y análisis de la influencia del envejecimiento en la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en laboratorio**, bajo la dirección del **Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph. D.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

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

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

DEDICATORIA

En memoria de mis abuelos, y con mucho amor para mis seres queridos que siempre me apoyaron y creyeron en mí.

AGRADECIMIENTOS

A mi novia Queral Acuña Sancho por todo el amor, paciencia, comprensión, apoyo, traspasadas y compañía incondicional brindados durante todo mi proceso universitario.

A mi abuelo Romualdo Masis Rojas (Q.P.D.) por ser un ejemplo de vida y por todos los consejos y la fortaleza brindada en los momentos más difíciles de mi carrera.

A mis padres, suegros y hermana, por darme la oportunidad de superarme y crecer profesionalmente.

A Laura Solano, Valeria Chacón y Luis Carlos Fonseca, por ser los mejores compañeros, amigos y cómplices en todas las traspasadas, enojos y éxitos que compartimos en tantos años juntos.

A Marvin Aguilar, por ser ese compañero de mil batallas que me soporta diariamente y quien me insta a no dormir para que estudie.

A José Pablo Aguiar y Mónica Jiménez por hacer posible el desarrollo de este proyecto y atender todas mis inquietudes.

A Mario Cordero, Alexander Jiménez y Ronald Sancho, por su ayuda, enseñanza y paciencia durante todos los procesos de laboratorio realizados.

A José Agustín Sanabria Ulloa, quien me transmitió muchos de sus conocimientos, siempre estuvo anuente a colaborar, evacuar mis dudas e idear soluciones ante los inconvenientes encontrados a lo largo de este proceso.

Un agradecimiento muy especial y profundo para mi asesora y principal soporte a lo largo de mi investigación, la Ing. Fabiola Miranda Argüello, MSc (Q.P.D.), quien siempre estuvo atenta y dispuesta para impulsarme y ayudarme a lo largo de mi carrera. Gracias por haberme formado y transmitirme todos los conocimientos posibles en materia de pavimentos durante más de tres años. Gracias de todo corazón por haber sido más que mi jefa, mi amiga, y esa persona especial en los momentos difíciles que nos tocó vivir. Hasta pronto querida Fabiola, Dios te tenga en su santa gloria.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.1.1 Problema específico	1
1.1.2 Importancia	3
1.1.3 Antecedentes.....	4
1.2 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.2.1 Alcance.....	6
1.2.2 Limitaciones.....	8
1.3 OBJETIVOS.....	9
1.3.1 Objetivo general	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	9
1.4 METODOLOGÍA.....	10
1.4.1 Fase I: Revisión bibliográfica.....	10
1.4.2 Fase II: Ensayos de laboratorio.....	11
1.4.3 Fase III: Análisis de resultados	12
1.4.4 Fase IV: Informe final.....	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 MEZCLA ASFÁLTICA	13
2.2 FATIGA.....	13
2.3 ENERGÍA DISIPADA.....	16
2.4 FRACTURA.....	17
2.4.1 Energía de fractura (GC).....	18
2.4.2 Factor de intensidad de esfuerzo (K).....	21
2.4.3 Jc-Integral	21
2.5 ENSAYOS DE FATIGA Y FRACTURA EN MAC	22
2.5.1 Pruebas de laboratorio a esfuerzo y deformación constante	23
2.5.2 Variables que afectan la resistencia a la fatiga de las MAC	25
2.5.3 Ensayo de viga a flexión en cuatro puntos	26
2.5.4 Ensayo de resistencia al agrietamiento con especímenes semicirculares a flexión (ASTD D8044-16)	30
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	34
3.1 DISEÑOS DE MAC.....	34
3.1.1 Materiales utilizados en los diseños de MAC	36
3.2 ELECCIÓN DE ENSAYO ALTERNATIVO (SCB).....	38
3.3 PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES DE ENSAYO	39

3.3.1 Graduaciones de los agregados.....	39
3.3.2 Adición de cal, mezcla con agua y secado en horno para mezcla con 1% de cal.....	40
3.3.3 Mezclado convencional a mano, envejecimiento en horno a corto plazo y compactación de especímenes.....	42
3.3.4 Procedimiento de corte de especímenes.....	46
3.3.5 Análisis volumétrico de los especímenes de ensayo.....	49
3.3.6 Acondicionamiento de especímenes en laboratorio a largo plazo.....	50
3.4 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.....	50
3.4.1 Ensayo de vigas a flexión en cuatro puntos.....	51
3.4.2 Ensayo de flexión semicircular.....	53
CAPÍTULO 4. DETERMINACIÓN DE PROPUESTAS PARA ACONDICIONAMIENTO DE ESPECÍMENES EN LABORATORIO A LARGO PLAZO.....	56
4.1 ACONDICIONAMIENTO CON MAYOR TEMPERATURA Y MENOR TIEMPO DE EXPOSICIÓN.....	56
4.2 ACONDICIONAMIENTO CON RADIACIÓN ULTRAVIOLETA (UV).....	63
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
5.1 ANÁLISIS GENERAL DEL % DE VACÍOS EN LOS ESPECÍMENES UTILIZADOS.....	70
5.2 ENSAYO DE VIGA A FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS.....	71
5.2.1 Comparación de resultados para criterios de falla contemplados.....	78
5.2.2 Análisis estadístico multifactorial para ensayo de vigas a flexión en cuatro puntos.....	87
5.3 ENSAYO DE FLEXIÓN SEMICIRCULAR.....	89
5.4 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO PARA LAS MAC SEGÚN EL PROCEDIMIENTO DE ENSAYO REALIZADO.....	103
5.6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.....	104
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
6.1 CONCLUSIONES.....	107
6.2 RECOMENDACIONES.....	110
CAPÍTULO 7. FUENTES DE CONSULTA.....	112
CAPÍTULO 8. APÉNDICE.....	116

Índice de figuras

Figura 1. Metodología de trabajo.	10
Figura 2. Curva de resistencia a la fatiga en función de los ciclos de carga.	14
Figura 3. Fases de degradación de fatiga.....	16
Figura 4. Energía de fractura total.	20
Figura 5. Energía de fractura hasta la falla o carga máxima.	20
Figura 6. Comportamiento de especímenes ante cargas a esfuerzo y deformación constante.	24
Figura 7. Ensayo de fatiga a cuatro puntos en mezcla asfáltica.	27
Figura 8. Curva del método de Rowe y Bouldin para el módulo normalizado.	29
Figura 9. Curva típica del deterioro para el ensayo de vigas a flexión.....	30
Figura 10. Curva típica de carga versus desplazamiento por ancho de ranura.	31
Figura 11. Curva típica de la energía de deformación en función del ancho de ranuras.	32
Figura 12. Montaje del ensayo de resistencia al agrietamiento con especímenes semicirculares.	33
Figura 13. Equipo utilizado para modificar el asfalto con SBS.	35
Figura 14. Curva granulométrica utilizada en las mezclas asfálticas de 12,5 mm TMN.	37
Figura 15. Ejemplo de granulometría utilizada para la mezcla de CT.	40
Figura 16. Proceso sustitución y mezclado en seco con el 1 % de cal.	41
Figura 17. Proceso de adición y mezclado con el 1% de cal y el 4 % de agua.....	41
Figura 18. Adición de asfalto y mezclado final de las MAC.....	42
Figura 19. Compactador ASC utilizado para elaborar los bloques de MAC.....	43
Figura 20. Bloques base de MAC compactados con el compactador ASC.	44
Figura 21. Molde y CGS utilizados para elaboración de especímenes cilíndricos base de MAC.	44
Figura 22. Ejemplares cilíndricos compactados con ayuda del CGS.....	45
Figura 23. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo de vigas a flexión.	46
Figura 24. Tracto inicial del proceso de corte de vigas de MAC.	47
Figura 25. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo de flexión semicircular.	48
Figura 26. Equipo para ensayo de viga a flexión en cuatro puntos.	51
Figura 27. UTM-25 y dispositivo de apoyo elaborado en el LanammeUCR.	53
Figura 28. Acondicionamiento de vigas a 90 °C dentro de un horno.	57
Figura 29. Variación del módulo normalizado en función de los ciclos para cada combinación.....	58
Figura 30. Variación de la energía disipada en función de los ciclos para cada combinación.	59
Figura 31. Variación de la energía disipada acumulada en función de los ciclos para cada combinación.....	59
Figura 32. Variación del ángulo de fase en función de los ciclos para cada combinación.	60
Figura 33. Variación de la rigidez a la flexión en función de los ciclos para cada combinación.	60
Figura 34. Película de asfalto formada en la parte inferior del espécimen envejecido 2 días a 95 °C.	62
Figura 35. Viga con acondicionamiento de 3 días a 90 °C.	63

Figura 36. Espectro emitido por las lámparas UV empleadas en la cámara de envejecimiento.	64
Figura 37. Configuración de la cámara de envejecimiento utilizada.	65
Figura 38. Especímenes SC en proceso de acondicionamiento.	67
Figura 39. Monitoreo térmico durante el envejecimiento por radiación UV aplicado.	68
Figura 40. Rigidez en función de los ciclos para MAC de control a 600 μ S.	72
Figura 41. Rigidez en función de los ciclos para MAC de control a 400 μ S.	73
Figura 42. Rigidez en función de los ciclos para MAC con 1% de cal a 600 μ S.	74
Figura 43. Rigidez en función de los ciclos para MAC con 1% de cal a 400 μ S.	74
Figura 44. Rigidez en función de los ciclos para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a 600 μ S.	75
Figura 45. Rigidez en función de los ciclos para MAC con 1% de CAL + 2% de SBS a 400 μ S.	76
Figura 46. Rigideces para MAC de control a 400 μ S según los criterios de falla.	78
Figura 47. Rigideces para MAC de control a 600 μ S según los criterios de falla.	78
Figura 48. Ciclos para MAC de control a 400 μ S según los criterios de falla.	79
Figura 49. Ciclos para MAC de control a 600 μ S según los criterios de falla.	80
Figura 50. Rigideces para MAC con 1% de cal a 400 μ S según los criterios de falla.	81
Figura 51. Rigideces para MAC con 1% de cal a 600 μ S según los criterios de falla.	81
Figura 52. Ciclos para MAC con 1% de cal a 400 μ S según los criterios de falla.	82
Figura 53. Ciclos para MAC con 1% de cal a 600 μ S según los criterios de falla.	83
Figura 54. Rigideces para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a 400 μ S según los criterios de falla.	84
Figura 55. Rigideces para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a 600 μ S según los criterios de falla.	84
Figura 56. Ciclos para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a 400 μ S según los criterios de falla.	85
Figura 57. Ciclos para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a 600 μ S según los criterios de falla.	86
Figura 58. Energía de deformación en función de la ranura para MAC de CT, 5 días a 85 °C.	90
Figura 59. Energía de deformación en función de la ranura para MAC de CT, 3 días a 90 °C.	91
Figura 60. Energía de deformación en función de la ranura para MAC de CT, 11,5 días UV.	92
Figura 61. Energía de deformación en función de la ranura para MAC CAL, 5 días a 85 °C.	93
Figura 62. Energía de deformación en función de la ranura para MAC CAL, 3 días a 90°C.	94
Figura 63. Energía de deformación en función de la ranura para MAC CAL, 11,5 días UV.	95
Figura 64. Energía de deformación en función de la ranura para MAC SBS, 5 días a 85 °C.	97
Figura 65. Energía de deformación en función de la ranura para MAC SBS, 3 días a 90 °C.	98
Figura 66. Energía de deformación en función de la ranura para MAC SBS, 11,5 días UV.	99

Índice de cuadros

Cuadro 1. Factores que afectan la resistencia al daño por fatiga de MAC.	25
Cuadro 2. Características generales de las MAC de 12,5 TMN utilizadas.	36
Cuadro 3. Granulometría de 12,5 mm TMN utilizada para las mezclas asfálticas ensayadas.	37
Cuadro 4. Dimensiones finales y tolerancias de los especímenes de ensayo.	49
Cuadro 5. Combinaciones de temperatura-tiempo de exposición realizadas.	58
Cuadro 6. Pruebas pareadas para los distintos acondicionamientos térmicos propuestos.	61
Cuadro 7. Condiciones para radiación UV en la cámara de acondicionamiento propuesta.	66
Cuadro 8. Tiempos de exposición en la cámara de envejecimiento para ensayo acelerado	67
Cuadro 9. Factores utilizados en los ANOVA realizados para cada ensayo.	69
Cuadro 10. Comparaciones de vida de fatiga o número de ciclos promedio a la falla.	77
Cuadro 11. Rigidez final promedio utilizando criterio de falla de Rowe & Bouldin.	87
Cuadro 12. ANOVA de tres factores para viga a flexión en cuatro puntos.	88
Cuadro 13. Comparación de energía de fractura promedio para la MAC de control.	93
Cuadro 14. Comparación de energía de fractura promedio para la MAC con 1% de cal.	96
Cuadro 15. Comparación de energía de fractura promedio para la MAC con 1% cal y 2% SBS.	100
Cuadro 16. ANOVA de tres factores para ensayo de flexión semicircular.	101
Cuadro 17. Parámetros principales para clasificar el desempeño a la fatiga de las MAC.	102
Cuadro 18. Comparación binaria de los procedimientos de ensayo ejecutados.	105
Cuadro 19. Resumen de la tasa de alivio de energía de deformación crítica (Jc).	109
Cuadro 20. Resultados para MAC de CT con acondicionamiento de 5 días a 85 °C.	116
Cuadro 21. Resultados para MAC de CT con acondicionamiento de 3 días a 90 °C.	116
Cuadro 22. Resultados para MAC de CT con acondicionamiento UV durante 11,5 días.	117
Cuadro 23. Resultados para MAC de CAL con acondicionamiento de 5 días a 85 °C.	117
Cuadro 24. Resultados para MAC de CAL con acondicionamiento de 3 días a 90 °C.	118
Cuadro 25. Resultados para MAC de CAL con acondicionamiento UV durante 11,5 días.	118
Cuadro 26. Resultados para MAC de SBS con acondicionamiento de 5 días a 85 °C.	119
Cuadro 27. Resultados para MAC de SBS con acondicionamiento de 3 días a 85 °C.	119
Cuadro 28. Resultados para MAC de SBS con acondicionamiento UV durante 11,5 días.	120



26 de junio de 2020
IC-0662-2020

**Señor
Luis Gustavo Muñoz Masís
Presente**

Estimado estudiante:

Según el artículo 39 del reglamento de Trabajos Finales de Graduación, la Escuela de Ingeniería Civil se complace en otorgarle la aprobación con distinción de su Trabajo Final de Graduación denominado ***Evaluación de procedimientos de ensayo y análisis de la influencia del envejecimiento en la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en un laboratorio.***

Por este motivo le manifestamos nuestras más sinceras felicitaciones por su dedicación y empeño.

Atentamente,

FLOR DE
MARIA
MUÑOZ
UMAÑA
(FIRMA)

Firmado
digitalmente por
FLOR DE MARIA
MUÑOZ UMAÑA
(FIRMA)
Fecha: 2020.06.28
22:40:26 -06'00'

Ing. Flor Muñoz Umaña, M.Sc.
Directora
Escuela de Ingeniería Civil

Muñoz Masis, Luis Gustavo

Evaluación de procedimientos de ensayo y análisis de la influencia del envejecimiento al determinar la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en laboratorio
Proyecto de graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:

L.G. Muñoz M., 2020

(x), 115 [5]h; ils. col. – 35 refs.

RESUMEN

El análisis del agrietamiento por fatiga en laboratorio permite verificar, evaluar y clasificar la calidad y desempeño de las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) utilizadas en la construcción o mantenimiento de nuestras carreteras. La normativa vigente (CR 2010) contempla únicamente un procedimiento de ensayo para el análisis de la vida de la fatiga de las MAC. Este procedimiento requiere un equipo especializado, es caro y los resultados se obtienen en un periodo bastante extenso.

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar procedimientos de ensayo y diferentes tipos de acondicionamiento a largo plazo en laboratorio, para el análisis de la fatiga de mezclas asfálticas en caliente. Esto con el fin de proponer un procedimiento de ensayo alternativo al normado actualmente y un acondicionamiento a largo plazo en laboratorio, que ofrezcan resultados representativos para la evaluación del agrietamiento por fatiga en MAC, en un periodo menor y con un costo relativamente más bajo.

Se evaluaron dos procedimientos de ensayo para el análisis de fatiga en MAC: el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos (AASHTO T321) y el ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044). Se evaluaron tres procesos de acondicionamiento a largo plazo combinados con tres tipos de MAC (control, modificada con cal más SBS y modificada con cal). Todas las MAC poseían una granulometría de 12,5 mm de tamaño máximo nominal.

De acuerdo con los análisis de varianzas multifactoriales realizados (95% de confianza) los resultados de los acondicionamientos a largo plazo evaluados muestran que no hay diferencias significativas entre los procedimientos propuestos. Además, de los resultados de los procedimientos de ensayo evaluados se desprende que la clasificación realizada para las MAC analizadas es igual (95% confianza), independientemente del ensayo.

Palabras clave: fatiga, mezcla asfáltica, acondicionamiento, barrido térmico, desempeño.

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.

Escuela de Ingeniería Civil.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con (Vargas, Aguiar, Leiva, & Loría, 2014) el agrietamiento por fatiga de una mezcla asfáltica en caliente es uno de los principales deterioros en los pavimentos asfálticos. Este deterioro provoca una pérdida sustancial de las características funcionales y estructurales ofrecidas inicialmente por el pavimento, y a su vez, generan incomodidad e inseguridad en los usuarios, que derivan en serias implicaciones económicas para los usuarios y el país en general.

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

El agrietamiento por fatiga en una mezcla asfáltica en caliente (MAC) es uno de los fenómenos que más afectan el desempeño de una estructura de pavimento flexible, y uno de los parámetros más relevantes a la hora de realizar el diseño estructural de una MAC. El daño producido por este mecanismo de falla incide directamente en el deterioro tanto funcional como estructural de un pavimento (Blanchetto, Miró, & Pérez, 2007).

Este deterioro normalmente se refleja como grietas longitudinales repetidas a lo largo de la superficie de ruedo de una carretera, así como varias fracturas desarrolladas longitudinalmente y entrelazadas por pequeñas grietas aleatorias en su dirección, deterioro conocido con el nombre de piel de cocodrilo (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010), estos mecanismos favorecen la infiltración de agua en toda la estructura y genera problemas en las capas inferiores de la estructura al disminuir la capacidad estructural del pavimento.

Cuando un pavimento se ve perjudicado por el fenómeno de fatiga la vida útil de esta estructura disminuye considerablemente, situación que provoca un alza en los costos de mantenimiento preventivo y rehabilitación para garantizar al usuario una conducción segura y confortable durante su transitar (Rodríguez & Loría, 2016).

De acuerdo con lo anterior, el agrietamiento por fatiga se ha convertido en un tema de amplio estudio en Costa Rica y el mundo en general, debido a que es uno de los mecanismos de falla menos deseado en una estructura, por su alta incidencia en toda la estructura del pavimento (Rodríguez & Loría, 2016).

Existen diferentes métodos para la evaluación de fatiga en mezclas asfálticas en caliente, desarrollados a lo largo del tiempo, cada uno basado en distintos criterios (flexión, tensión

directa o indirecta, entre otros) que permiten relacionar ciertos parámetros de diseño con el desempeño o daño sufrido por el pavimento (Matthews, Monismith, & Craus, 1993). Sin embargo, cualquiera que sea el método utilizado para determinar la vida de fatiga, permiten realizar algunos cuestionamientos a la validez de los resultados que se obtienen, especialmente por la variabilidad de estos resultados, ya que han sido desarrollados para situaciones en particular, con simplificaciones y limitaciones previamente establecidas, basados en características de materiales y climas que no necesariamente son los que se presentan en Costa Rica (Arrieta, 2016).

En Costa Rica y gran parte del mundo se ha aceptado como representativo el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos, que se describe en la norma AASHTO T321-17 (Determinación de la vida de fatiga para mezclas asfálticas en caliente sometidas a flexotracción por cargas repetidas), para determinar y predecir la vida de fatiga en una mezcla asfáltica en caliente (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010).

El ensayo mencionado anteriormente es el que actualmente se encuentra en la normativa nacional para realizar los diseños y análisis de pavimentos, sin embargo, posee algunas desventajas en cuanto a su aplicación, principalmente en la cantidad de mezcla requerida para elaborar los especímenes y el tiempo de acondicionamiento y falla de una muestra. Como se menciona, parte del inconveniente es ser una prueba de larga duración durante el proceso de falla para una muestra, situación que no permite reproducir en poco tiempo resultados representativos para un proyecto en desarrollo.

Otra limitación muy importante del procedimiento de ensayo AASHTO T321 es que no es práctico para la evaluación de mezclas en campo, teniendo como principal obstáculo las dimensiones de los especímenes y el costo del equipo. Esto último hace que solo aquellos laboratorios que dedican gran parte de su tiempo y recursos a la investigación posean este equipo especializado y desarrollado únicamente para este ensayo (Arrieta, 2016).

Con base en todo lo anterior, se desea proponer un ensayo de laboratorio, como alternativa al normado actualmente (AASHTO T321-17), que permita obtener resultados representativos en periodos más cortos y que también permita correlacionar estos resultados con algunos otros parámetros de diseño y predicción de la vida a fatiga de mezclas asfálticas en caliente.

Además, se desea proponer algunas alternativas para el acondicionamiento a largo plazo de MAC en laboratorio. Esto con el fin de reducir el tiempo de cura/envejecimiento de la

mezcla, sin perder la representatividad del procedimiento actual (AASHTO R30) incluya el efecto de distintos procesos que simulan el envejecimiento a largo plazo de una mezcla asfáltica en caliente y que a su vez permita obtener resultados en periodos más cortos.

1.1.2 Importancia

Uno de los mecanismos de falla que afecta usualmente a las mezclas asfálticas en caliente es la falla por fatiga (Blanchetto, Miró, & Pérez, 2007). Por lo tanto, el análisis para diseñar una mezcla asfáltica por resistencia a la fatiga se vuelve indispensable, en especial desde el punto mecánico, y sin dejar de lado el impacto que este deterioro genera en la vida útil de una vía (Rodríguez & Loría, 2016).

Actualmente la ingeniería de pavimentos se encuentra en un proceso de transición del diseño clásico por espesores (AASHTO 93) hacia un diseño mayoritariamente mecánico, basado en el análisis de las respuestas mecánicas de un pavimento y la predicción del desempeño de esta estructura ante los principales deterioros que sufre: agrietamiento por fatiga y deformación permanente (Rivera, 2019).

Las limitaciones mencionadas previamente han hecho que surja la necesidad de proponer y analizar procedimientos y ensayos alternativos al que se aplica actualmente, que sean representativos y que ofrezcan resultados del desempeño por fatiga en periodos más cortos, que permita tomar mejores decisiones respecto a la valoración de una MAC en menos tiempo. Estos procedimientos pretenderían agilizar la valoración de una mezcla en laboratorio, con el fin de acelerar los procesos aceptación y colocación de esta siempre y cuando se cumpla con los parámetros mínimos establecidos por la normativa vigente.

Por otro lado, la normativa vigente actualmente solicita la evaluación de la fatiga para una MAC a partir de los vacíos teóricos con que se coloca una mezcla en campo (7%), dejando de lado el hecho de que el fenómeno de fatiga se da realmente cuando termina el proceso de compactación de la mezcla producto de las cargas vehiculares, momento en que sus vacíos se reducen hasta aproximadamente un 4 %. Luego de que la MAC ha sufrido el proceso de compactación debido a las reiteradas cargas vehiculares, la mezcla alcanza una mayor fragilidad, obtenida debido a su densificación y al estado de oxidación en que se encuentra, por lo que es más propensa a sufrir una falla por fatiga.

Con base en el análisis anterior, surge la necesidad de analizar la evaluación de los procedimientos de ensayo para fatiga en MAC en laboratorio con base en el 4% de vacíos

finales, pues se plantea que es realmente el estado en que las mezclas asfálticas en caliente muestran su desempeño ante la fatiga.

1.1.3 Antecedentes

Costa Rica cuenta con el *Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR – 2010* como guía oficial para los diseños de las estructuras de pavimentos. Este manual, en su sección 418, presenta los requisitos generales que deben cumplir los diseños de mezclas bituminosas fabricadas en planta, según los usos específicos. Además, señala la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas en caliente como una de las propiedades más importantes que debe poseer una MAC. En esta misma división (418.20) se establecen los criterios mínimos de diseño y desempeño de las mezclas asfálticas, tomando como referencia para la vida de fatiga a la flexión el ensayo AASHTO T321.

Otro tema importante que se ha dejado de lado en las recientes investigaciones realizadas en Costa Rica, en relación con el tema de fatiga en mezclas asfálticas, es el criterio de parada o finalización del ensayo adoptado como oficial por la normativa nacional (AASHTO T321). Esta prueba se sigue realizando con el criterio de parada basado en el 50% de la rigidez inicial del espécimen, mientras que otros investigadores a nivel mundial proponen como criterio de finalización un 15% de ciclos adicionales al pico de la curva normalizada (referencia). Atribuyendo que estos resultados representan de mejor forma y con menor variación experimental la energía de fractura disipada por la mezcla.

El LanammeUCR actualmente estudia el fenómeno y anteriormente ha trabajado en la definición de una especificación costarricense para la fatiga de pavimentos, sin embargo, esta se basa en el ensayo AASHTO T321 y no contempla el factor tiempo para obtener resultados, factor que prolonga la evaluación de una estructura, pues el procedimiento fue desarrollado pensando en un diseño preliminar y no para evaluar mezclas asfálticas en caliente que estén siendo colocadas (Loría, Aguiar, Elizondo, & Arce, 2006).

Debido a las variaciones que se presentan con el ensayo de viga de fatiga en cuatro puntos, la importancia que posee la fatiga en los diseños de MAC y la problemática que genera el agrietamiento por fatiga en el desempeño de pavimentos asfálticos, desde finales de los años cuarenta varios institutos de investigación de los Estados Unidos de Norte América decidieron incursionar en la investigación y desarrollo de diversos

procedimientos de ensayos en laboratorio, para evaluar la susceptibilidad de los pavimentos ante este fenómeno (Matthews, Monismith, & Craus, 1993).

En Costa Rica se han desarrollado algunas investigaciones relacionadas con los problemas que representa la fatiga en una mezcla asfáltica, pero ninguna aborda la proposición en concreto de un nuevo ensayo alternativo y representativo que acelere la obtención de resultados para su análisis ingenieril. Tampoco se aborda en estas investigaciones la representatividad e injerencia que tiene en los resultados la variación de los procesos de envejecimiento a largo plazo, con respecto al aceptado como práctica común o estándar (AASHTO R30).

Arrieta (2016) realizó una comparación de algunos procedimientos de ensayo en laboratorio que existen para la determinación de la resistencia al agrietamiento por fatiga en MAC, estudio que sirve como base para desarrollar el presente trabajo de investigación, pues logró determinar las ventajas y desventajas que ofrecen distintos procedimientos de ensayo, dejando un panorama más claro de los ensayos por analizar y proponer como alternativa más viable para la implementación de un nuevo ensayo para el estudio de la vida de fatiga para una MAC.

Fuera de Costa Rica ya se implementan investigaciones sobre la representatividad de otros procedimientos de ensayo para el análisis del daño provocado por la fatiga en mezclas asfálticas en caliente (Valdés, Pérez, & Botella, 2013). Sin embargo, estas de nuevo dejan de lado las variaciones en los envejecimientos aplicados a las mezclas, específicamente en búsqueda de una reducción del tiempo de curado a largo plazo o una mejor correlación en el envejecimiento inducido por la radiación ultravioleta.

Actualmente en el país, se cuenta con escasa investigación en la aplicación, correlación y representatividad de envejecimientos con radiación ultravioleta aplicados a mezclas asfálticas. Sánchez (2017) investigó las diversas variaciones climáticas de campo aplicables para distintas zonas del país, e implementó un ensayo de envejecimiento a largo plazo para ligantes asfálticos, dejando como referencia una metodología de cálculo y aplicación de radiación ultravioleta para inducir un curado a largo plazo en MAC y correlacionar los resultados obtenidos con los reportados en especímenes envejecidos con el curado estándar largo plazo.

1.2 Delimitación del problema

1.2.1 Alcance

El desarrollo de la investigación se basa únicamente en el análisis de la falla por fatiga de mezclas asfálticas en caliente elaboradas en laboratorio, con granulometrías de un tamaño máximo nominal (TMN) de 12,5 mm, extraídas de una fuente de agregados suministrados al LanammeUCR y asfalto muestreado y aportado por el LanammeUCR.

Se utilizarán tres diseños de mezcla distintos, que corresponden con los diseños elaborados por el LanammeUCR y que presentaron mejor desempeño en su proyecto *Daño por Humedad* en MAC, inscrito en Vicerrectoría con el código B5A46. Cada uno de los diseños utilizados será sometido a tres tipos de acondicionamiento para el envejecimiento de las mezclas asfálticas en laboratorio. Una de estas mezclas será con el ligante sin modificar para utilizarla como condición patrón de comparación.

A cada mezcla asfáltica preparada en el laboratorio se le realizará tanto el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos (vigente en la normativa costarricense), como el ensayo alternativo propuesto, elegido a partir del análisis bibliográfico y con el fin de correlacionar los resultados obtenidos.

Para la prueba de viga a flexión en cuatro puntos se realizarán mínimo cuatro ensayos para cada una de las combinaciones (agregado, asfalto y condición) a modelar. Estos cuatro ensayos se ejecutarán a deformación controlada, divididos en dos especímenes fallados a 400 microstrains y otros dos especímenes fallados a 600 microstrains.

Luego de estudiar varias metodologías de ensayos de fatiga en MAC, la elección del ensayo alternativo (flexión semicircular ASTM D8044-16, SCB por sus siglas en inglés) se basó principalmente en la disponibilidad del equipo y el programa por utilizar, así como en la practicidad de la implementación de la prueba y la aceptación general a nivel internacional. Para este ensayo alternativo se deberán fallar mínimo 4 especímenes por condición y mínimo 12 especímenes por cada una de las combinaciones a modelar.

Con el esquema experimental mencionado anteriormente, se estarán ejecutando un mínimo de 40 ensayos para cada uno de los procesos de acondicionamientos propuestos, integrado por 4 pruebas de viga a flexión en cuatro puntos y 36 pruebas del ensayo alternativo.

La comparación de resultados con el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos se realiza únicamente a partir del número de ciclos y los parámetros de rigidez y carga de los ensayos. Se excluyen del alcance los análisis que involucren la energía disipada obtenida.

La investigación no contempla la realización de ningún diseño de mezcla ni la corroboración del cumplimiento de ningún parámetro de diseño, como ya se mencionó se utilizarán los diseños elaborados por el LanammeUCR bajo la metodología Superpave para el proyecto de *Daño por Humedad*.

El procedimiento de acondicionamiento estándar a largo plazo en laboratorio se ejecutó sin tener conocimiento certero del envejecimiento que induce a cada espécimen. No se conoce cuál es la reducción en la vida de fatiga para los especímenes de las mezclas sometidas a este acondicionamiento.

Se propone una nueva metodología de acondicionamiento en horno a largo plazo en laboratorio, se realizó un barrido térmico basado en un rango de temperaturas preestablecidas de acuerdo con la literatura existente y en combinación con diferentes periodos (días). Se utilizó únicamente la mezcla de control para elaborar los especímenes por analizar.

La escogencia de la combinación temperatura-tiempo (T, t) de acondicionamiento se realizó con base en las correlaciones de los resultados obtenidos para los especímenes de viga a fatiga ensayados. Se aclara que, por tratarse de una proposición preliminar, se ejecutó únicamente un ensayo de viga de fatiga para cada combinación (T, t) a modelar.

La proposición de una metodología de acondicionamiento a largo plazo en laboratorio con radiación UV se basa en la propuesta y correlaciones presentadas por (Sánchez, 2017) y se aplica a los especímenes de MAC elaborados para cada ensayo en análisis (viga de fatiga y flexión semicircular). El procedimiento de cálculo e implementación en laboratorio se detallan en el capítulo 3.

Todos los especímenes elegidos para los ensayos de viga a fatiga se elaboran con un porcentaje de vacíos del $4\% \pm 1\%$, la variación del 1% se establece de acuerdo con la práctica común para los trabajos finales de graduación elaborados en el LanammeUCR. Todos los especímenes elegidos para los ensayos de flexión semicircular repetida se elaboran con un porcentaje de vacíos del $4\% \pm 0,5\%$, la variación del 0,5% se establece de acuerdo con la norma ASTM D 8044-16.

No se realiza ningún tipo de análisis económico profundo para comparar la aplicabilidad de los ensayos. Los únicos parámetros que se toman en cuenta desde el punto de vista económico son: el tiempo, el tamaño y la cantidad de los especímenes necesarios.

1.2.2 Limitaciones

Las mezclas asfálticas por evaluar han sido desarrolladas exclusivamente en laboratorio y ninguna se ha utilizado en campo, por lo que no se tienen registros del desempeño real de la MAC luego de su colocación, para corroborar la vida de fatiga.

Al momento de realizar los ensayos de viga a fatiga no se contaba con la actualización del programa utilizado para establecer el criterio de parada del ensayo por cantidad de ciclos (15% de ciclos adicionales, a partir del pico de la curva de rigidez normalizada), por lo que los ensayos se tuvieron que ejecutar hasta más allá del criterio mencionado y luego realizar un recorte manual de los datos.

La mayor limitación con la que se cuenta es el uso del laboratorio para ensayos dinámicos de desempeño del LanammeUCR, debido a que los equipos que se requieren son utilizados por el mismo ente para la elaboración de ensayos a distintos clientes y por ende se está sujeto a la disponibilidad del laboratorio en cuestiones de logística y funcionamiento del equipo a utilizar. Es necesario aclarar que se han realizado las gestiones de solicitud de las fechas de ensayos con antelación y según el cronograma de trabajo, sin embargo, se recalca que se queda limitado al funcionamiento correcto de los equipos (que no se dañen en el transcurso de la investigación), al mantenimiento de los mismos y a la programación semanal de trabajos con prioridad.

Respecto a las limitaciones relacionadas con la ejecución de los procedimientos de laboratorio se destacan: 1) el disco diamantado disponible para realizar los cortes de las ranuras del ensayo SC posee un espesor ligeramente superior al recomendado, 2) El proceso de monitoreo térmico para el acondicionamiento con radiación UV no se pudo realizar durante las noches, debido a la restricción de horario e ingreso al LanammeUCR.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar procedimientos de ensayo y diferentes tipos de acondicionamiento a largo plazo en laboratorio, para el análisis de la fatiga de mezclas asfálticas en caliente.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir un ensayo de laboratorio alternativo al de viga a flexión en cuatro puntos para evaluar el desempeño a la fatiga de mezclas asfálticas en caliente en menor tiempo.
- Someter especímenes de mezcla asfáltica en caliente a distintas propuestas de acondicionamiento en laboratorio a largo plazo, para simular el envejecimiento de las MAC a lo largo de su vida útil.
- Analizar la influencia de los acondicionamientos a largo plazo en laboratorio en los resultados de vida de fatiga para las distintas MAC ensayadas.
- Analizar los resultados obtenidos del ensayo de viga a flexión en cuatro puntos para los diferentes criterios de falla definidos.
- Comparar los resultados obtenidos a través de los distintos procedimientos de ensayo ejecutados para evaluar la implementación del ensayo alternativo propuesto dentro de la normativa nacional.

1.4 Metodología

La metodología seguida para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura 1.

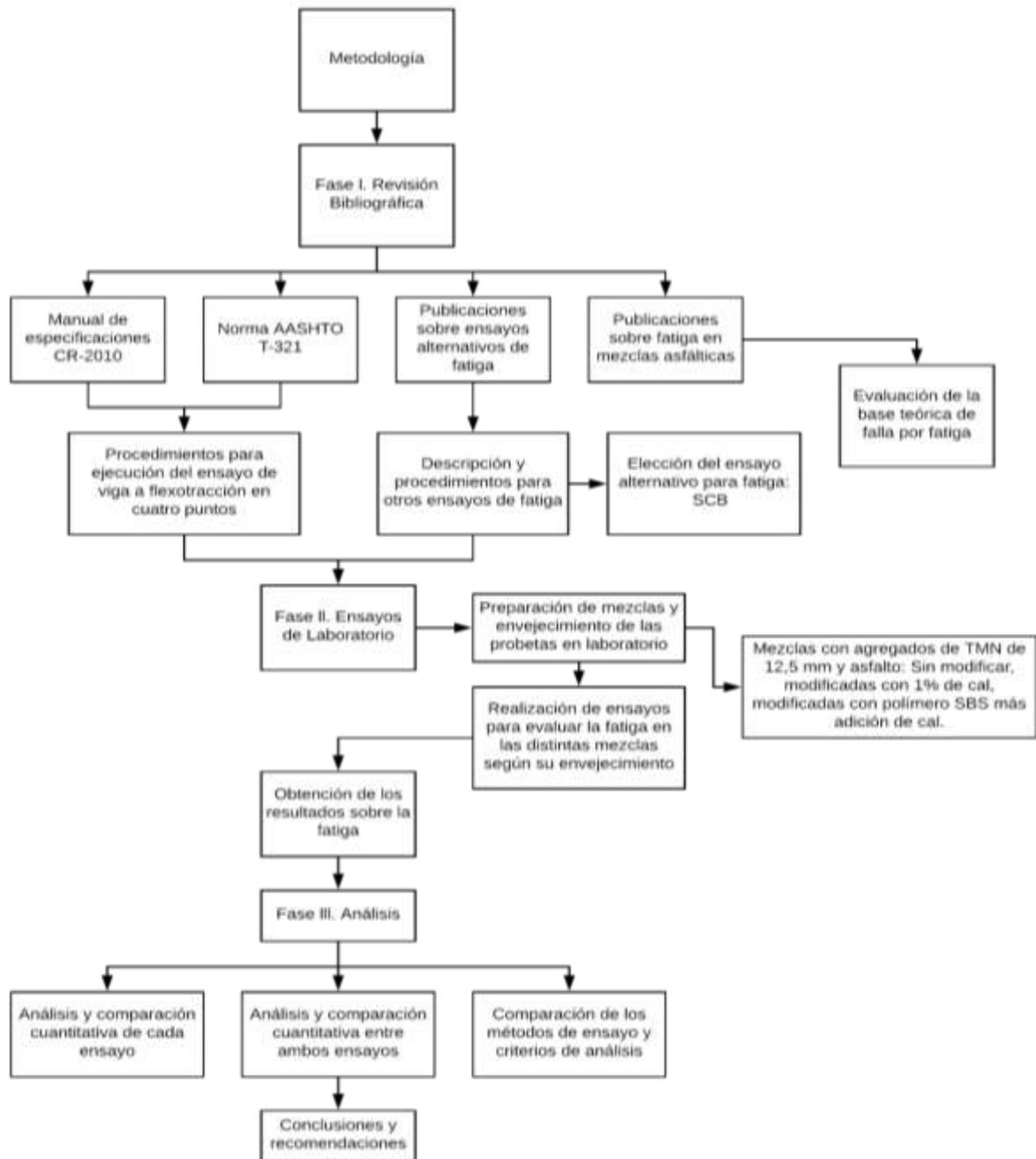


Figura 1. Metodología de trabajo.

1.4.1 Fase I: Revisión bibliográfica

Como primera fase se realizó una investigación general sobre el daño por fatiga, los modelos de evaluación y predicción con mayor aceptación y utilizados para analizar este tipo de deterioro. También se investigó sobre envejecimientos a largo plazo en

laboratorio, alternativos al normado actualmente y aplicados según las condiciones climáticas, y otros parámetros involucrados en la fractura y su relación con las propiedades de fatiga.

El estudio del ensayo de flexión semicircular (SCB) se realizó investigando los parámetros y resultados especificados en la norma ASTM D8044-16. A diferencia del ensayo de viga a flexión en cuatro puntos, que se trata de un ensayo dinámico con aplicación de cargas repetidas a deformación controlada, el ensayo de flexión semicircular se trata de un ensayo "estático", es decir, está basado en la aplicación de una carga a una tasa (razón) constante que lleva los especímenes hasta la fractura.

La prueba de flexión semicircular no cuenta con un procedimiento de ensayo establecido en la normativa nacional, por lo tanto, esta investigación se ajusta en la medida de lo posible a los requerimientos y procedimientos planteados en la norma ASTM D8044-16.

El estudio del ensayo de viga a fatiga en cuatro puntos se desarrolló con base en los parámetros de desempeño mencionados en la norma AASHTO T321, sin embargo, se aplicó una variación en el porcentaje de vacíos para los especímenes, con el fin de analizar lo que sucede en una mezcla compactada hasta los vacíos de diseño (4%).

Adicionalmente se realizó una investigación sobre posibles tipos de acondicionamientos a largo plazo en laboratorio y la influencia que tiene este parámetro en el desempeño a la fatiga de una MAC.

Finalmente, con toda la información recopilada a partir de la revisión bibliográfica se definió el esquema de trabajo experimental y los procedimientos de ensayo y parámetros por analizar. También se realizaron los capítulos 2 y 3 del presente trabajo de investigación, denominados marco teórico y metodología experimental, respectivamente.

1.4.2 Fase II: Ensayos de laboratorio

En esta fase del proyecto se ejecutaron los ensayos de laboratorio definidos en el esquema experimental, para la evaluación de la fatiga y el análisis de la influencia del envejecimiento en la fatiga de MAC. También se obtuvieron los resultados para las distintas combinaciones planteadas en el proyecto.

Es importante recalcar que se utilizaron 3 tipos de mezclas asfálticas en caliente elaboradas en laboratorio (con adición de cal, control y con adición de cal más polímero SBS) considerando únicamente una granulometría (12,5 mm de tamaño máximo nominal)

y tres procedimientos de acondicionamiento a largo plazo en laboratorio (estándar, mayor temperatura en menos tiempo y ultravioleta). En total se evaluaron 9 combinaciones diferentes, considerando las distintas mezclas y los envejecimientos aplicados.

1.4.3 Fase III: Análisis de resultados

La fase de análisis de resultados se divide en dos etapas:

Etapa I: Análisis y comparación cuantitativa de los resultados obtenidos para cada procedimiento de ensayo.

En esta etapa se realiza el análisis de los resultados obtenidos para cada procedimiento de ensayo de acuerdo con el acondicionamiento aplicado, para cada mezcla ensayada. Se realizaron análisis estadísticos y se comparan cuantitativamente los resultados obtenidos. Se determina la influencia de los envejecimientos aplicados en cada una de las mezclas analizadas.

Etapa II: Comparación de procedimientos de ensayo y criterios de análisis.

En esta última etapa se realiza una comparación entre los procedimientos de ensayos realizados, según las ventajas y desventajas que ofrece cada uno durante su preparación y ejecución. Además, se realiza una comparación de los criterios de análisis utilizados para la evaluación de la vida de fatiga en las mezclas asfálticas de laboratorio, con el fin de identificar comportamientos o correlaciones futuras.

1.4.4 Fase IV: Informe final

La fase final corresponde con la generación de un informe con los resultados obtenidos en cada una de las fases. En este informe se detallará toda la información pertinente a la evaluación de la fatiga de acuerdo con los métodos y los criterios de ensayos utilizados, así como las conclusiones generadas a partir de la comparación de todos los resultados.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica se puede definir como la mezcla de agregados minerales de buena resistencia y alta durabilidad con un ligante asfáltico. Toda mezcla asfáltica producida debe poseer: buena resistencia, cohesión y gran durabilidad. La primera propiedad se logra con la adición de agregados minerales de alta calidad, la cohesión entre partículas es aportada por el cemento bituminoso utilizado, mientras que la durabilidad es producto del conjunto formado por ambos elementos (agregados y ligantes). Por tanto, es de esperar que los pavimentos de mezcla asfáltica presenten un buen desempeño durante largos periodos, bajo múltiples condiciones ambientales y de tránsito (García & Hansen, 2001).

El cemento asfáltico funciona como el agente aglutinante en la mezcla y es el encargado de recubrir y unir todas las partículas de agregado en una sola masa de gran cohesión y durabilidad. El ligante asfáltico posee propiedades impermeabilizantes y resistentes ante la mayoría de las sales, ácidos y álcalis, a los que se expone (Rivera, 2019). La cantidad de bitumen que se coloca en una mezcla usualmente responde a las condiciones de clima y tránsito donde se instalará el material, esto debido a que se trata del insumo más caro de la mezcla.

Los agregados minerales son los materiales que conforman el "esqueleto" de la mezcla asfáltica, son inertes, duros, resistentes y con larga duración. De acuerdo con el Manual CR-2010, para lograr una mejor conformación de la mezcla, es importante asegurar que los agregados minerales cumplen las características mínimas de calidad en su conformación, tales como: dureza, graduación (granulometría), angulosidad, textura, abrasión, sanidad, entre otras.

2.2 Fatiga

Uno de los principales deterioros que detectan en los pavimentos flexibles es el agrietamiento por fatiga. Este daño es ocasionado por las repeticiones de cargas vehiculares a las que se someten los pavimentos flexibles durante su periodo de servicio. Adicionalmente, el agrietamiento por fatiga también está relacionado con las variaciones térmicas, la volumetría o vacíos de aire presentes en la MAC, las características de los materiales utilizados, el manejo de aguas, las condiciones de las bases que subyacen las MAC, entre otras.

El agrietamiento por fatiga puede verse promovido por otros daños o las malas prácticas constructivas ejecutadas al momento de colocar la estructura de pavimento. Además, puede ser uno de los precursores para otros tipos de daños y/o deterioros, como daño por humedad, infiltración de agua que reduce la capacidad de soporte de las capas inferiores, entre otros.

La fatiga de una MAC se genera en aquellos sectores donde se experimentan las mayores deflexiones con altas frecuencias, no hay una correcta adherencia entre las distintas capas o no se logra una correcta transferencia de las cargas hacia las capas inferiores.

De acuerdo con lo expuesto por la teoría del medio continuo, los materiales sufren modificaciones en sus propiedades mecánicas al verse sometidos a cargas cíclicas. En la Figura 2 se muestra el comportamiento que experimenta la resistencia de los materiales en función de los ciclos de carga (González & Velandia, 2006). Se puede observar que en el tramo inicial los deterioros no representan problemas en el desempeño de la estructura, sin embargo, con el aumento en los ciclos (mayores periodos) esos pequeños deterioros van uniéndose y formando agrietamientos mayores que derivan en mayores problemas para la estructura.

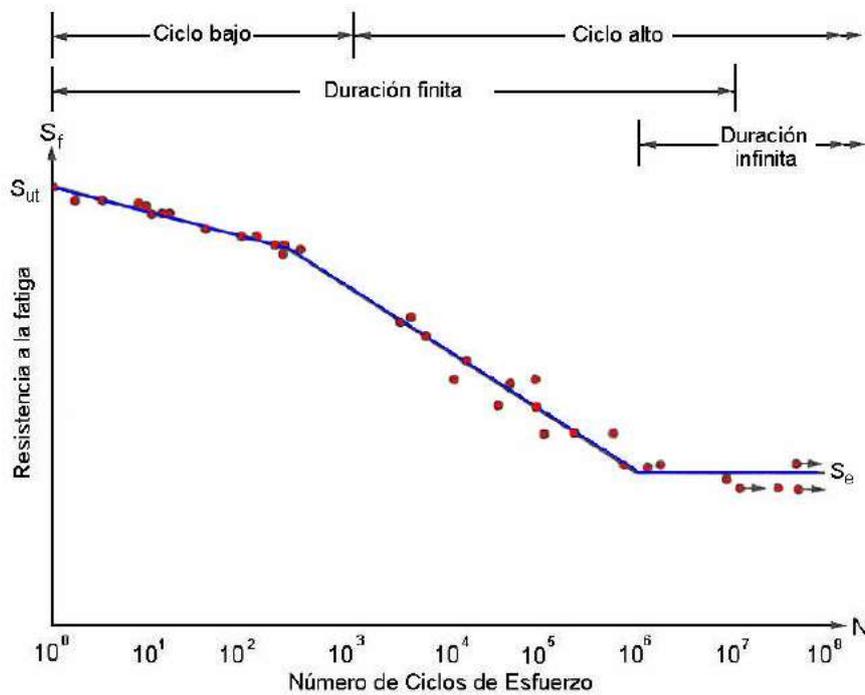


Figura 2. Curva de resistencia a la fatiga en función de los ciclos de carga.

Fuente: González & Velandia, 2006.

De acuerdo con Arana & González (2003), Montazeri (2009) y otros autores, existen dos clases de agrietamiento por fatiga: el agrietamiento de arriba hacia abajo y el agrietamiento de abajo hacia arriba.

El agrietamiento de abajo hacia arriba se da producto de las repeticiones de cargas transmitidas por las ruedas de los vehículos a la estructura de pavimento, durante esta interacción, la MAC experimenta esfuerzos de tensión que inducen las deflexiones críticas en la parte inferior de la capa (Montazeri, 2009). Las grietas producidas se propagan desde la parte inferior de la capa hacia arriba, incrementando de forma directamente proporcional a las repeticiones de carga que recibe la estructura. Conforme se acumulan los pequeños deterioros, que inicialmente se manifiestan como grietas longitudinales en la superficie del pavimento, se van interconectando los agrietamientos longitudinales con algunos transversales, conformando el tipo de daño que se conoce actualmente como piel de cocodrilo (Huang, 2004).

El agrietamiento de arriba hacia abajo se le atribuye a la presencia de esfuerzos de tensión críticos en la superficie de la capa de MAC y/o a la presencia de muy altas presiones de contacto que se generan en la interfaz entre la MAC y las llantas de los vehículos (NCHRP, 2004). De las dos clases de agrietamiento por fatiga expuestos, se considera como el más perjudicial, pues promueve las grietas longitudinales y propicia la infiltración del agua superficial a través de las grietas y hacia las capas inferiores del pavimento.

De acuerdo con Di Benedetto et al. (2004) la degradación de fatiga para una MAC se produce en tres fases: 1) Adaptación, 2) Fatiga y 3) Ruptura. Las primeras dos fases del proceso de degradación corresponden con el modo iniciación de daño en una MAC, mientras que la tercera fase del proceso corresponde con el modo de propagación de daño.

La fase 1, que es la fase de adaptación, donde se da una rápida disminución de la rigidez debido a la repetición de cargas (ciclos). Debido a las características visco-térmicas de las MAC, se produce una rápida disminución en su módulo debido al reacomodo de partículas y otros efectos locales. En el tramo inicial (fase 1) de la Figura 3 se puede observar la fuerte caída del módulo (E) como función de los ciclos de carga aplicados.

Durante la fase 2 se produce una evolución del daño por fatiga en la MAC, donde la disminución o efecto sobre la rigidez de la mezcla es mucho menor para un intervalo de

ciclos de carga mayor que el de la fase 1. En este escenario los efectos locales y el calentamiento del material ya no tienen injerencia en su comportamiento. Sin embargo, se da la presencia de varias fisuras microscópicas (microfisuras) en la MAC, que conforme se aumentan en cantidad, generan un entrelazamiento que da origen a la formación de macrofisuras en la mezcla.

Para la última fase del proceso (ruptura), las macrofisuras se han densificado tanto que, comienzan a unirse entre ellas y provocan el fallo general de la MAC. La siguiente figura ilustra los dos modos y tres fases del proceso de degradación para una MAC.

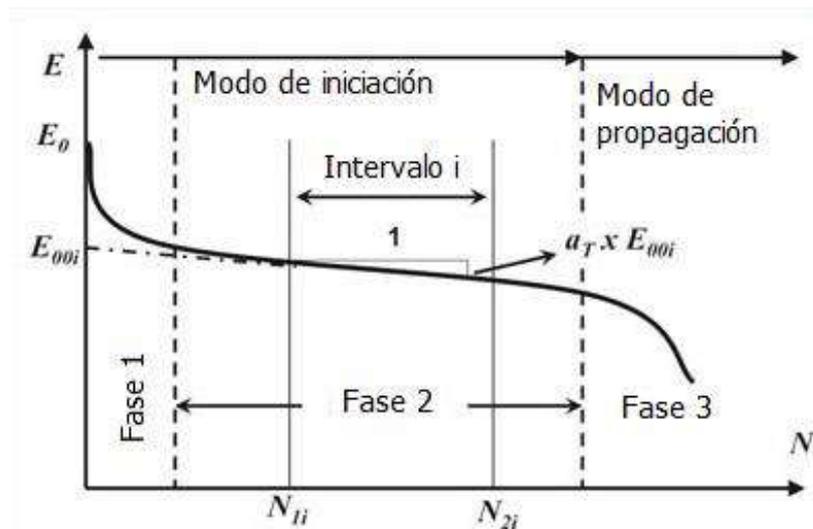


Figura 3. Fases de degradación de fatiga.

Fuente: Di Benedetto et al., 2004.

De acuerdo con la figura anterior, las fases 1 y 2 del proceso de degradación por fatiga pertenecen al modo de iniciación del daño, mientras que, la tercera y última fase del modelo corresponde con el modo de propagación del daño por fatiga.

2.3 Energía disipada

De acuerdo con Abojardeh (2013) se conoce como energía disipada a la energía consumida por ciclo de carga aplicado para cualquier ensayo dinámico ejecutado. Este enfoque de energía disipada se ve como una técnica prometedora para caracterizar la fatiga en MAC, debido a que es un indicativo consistente del nivel de deterioro de los especímenes en términos de su comportamiento, daño acumulado en el tiempo y vida remanente (Abojardeh, 2013). En la siguiente ecuación se puede observar el cálculo para la energía disipada en cada uno de los ciclos de carga aplicados a un espécimen.

$$w_i = \pi \varepsilon_i^2 S_i \sin(\varphi_i)$$

Ecuación 1

Donde:

w_i : Energía disipada en el ciclo i

ε_i : Deformación unitaria en el ciclo i

S_i : Rigidez de la MAC en el ciclo i

φ_i : Ángulo de fase o cambio de fase entre el esfuerzo y la deformación en el ciclo i

La sumatoria de la energía disipada acumulada desde el ciclo inicial hasta el n -ésimo ciclo aplicado o ciclo final "N" (representada como W_N), se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$W_N = \sum_i^N w_i$$

Ecuación 2

De acuerdo con Abojaradeh (2013) al ensayar los especímenes de MAC a deformación constante, la rigidez de la mezcla disminuye tras cada ciclo aplicado, al igual que la energía disipada. Mientras que, al realizar ensayos a esfuerzo constante, la deformación aumenta en cada ciclo, provocando a su vez un aumento en la energía disipada. También menciona que mayor energía disipada acumulada, generalmente se obtiene una mayor vida de fatiga para la MAC ensayada.

2.4 Fractura

De la mecánica de fractura se derivan varios métodos para determinar algunos de los parámetros físico-mecánicos más usuales en la evaluación de la resistencia a la fractura de los materiales. Entre los parámetros utilizados usualmente para determinar la susceptibilidad a la fractura de MAC se encuentran: El factor de intensidad de esfuerzo (K_c), la energía de fractura (G_c) y la J-integral (J_c).

De acuerdo con Parker (2010) la fractura de las MAC ocurre como resultado de combinar la fatiga y algunos otros esfuerzos inducidos. Es importante recordar que anteriormente se definió la fatiga en MAC como resultado de las repeticiones de carga aplicadas sobre el pavimento, situación que deriva en las fases de degradación de fatiga expuestas en el subcapítulo 2.2 y que concuerda con la teoría propuesta por Parker.

De acuerdo con Arrieta (2016) los ensayos de fractura generalmente son ejecutados bajo la acción de una carga aplicada a una tasa de deformación o desplazamiento constante. Esta carga se aplica hasta un punto máximo donde se llega a la falla del espécimen, momento a partir del cual a través de la misma tasa (carga/desplazamiento o deformación) se continúa agrietando la probeta en presencia de una reducción de la carga aplicada. Los

parámetros G_c y/o J_c son obtenidos a partir del análisis de gráficos de carga aplicada en función de la deformación o desplazamiento registrado.

Para realizar una correcta interpretación o evaluación de la resistencia a la fractura de los especímenes de MAC, no se debe considerar únicamente la carga máxima aplicada, debido a que posee una amplia variabilidad y pobre relación con la resistencia a la fractura. Así también, registrar mediciones de la energía de fractura o determinar el factor de intensidad de esfuerzo para MAC a altas temperaturas, no es una práctica adecuada para la evaluación de las mezclas, pues los materiales se encuentran en un estado de deformación elastoplástica (Tang, 2004).

2.4.1 Energía de fractura (G_c)

Se conoce como energía de fractura al área bajo la curva en la gráfica de carga-desplazamiento generada durante la falla por fractura de un espécimen. De acuerdo con Moreno (2013) esto se traduce en la energía requerida por un material para crear una unidad de superficie de fractura. Es decir, el espécimen ensayado libera la energía acumulada en forma de fractura o grieta, consiguiendo relajar de forma inmediata las tensiones generadas durante la aplicación de la carga.

La fractura del espécimen ocurre al momento en que la energía que se disipa durante la aplicación de la carga iguala la densidad de energía de fractura superficial del material, generando de forma inmediata el relajamiento de las partes asociadas, es decir, la presencia de una grieta superficial o fractura del material. Este parámetro de diseño (energía de fractura) es utilizado usualmente para analizar la propagación de grietas en los pavimentos (Noguera & Miró, 2011). La energía de fractura también se ha utilizado en la determinación de modelos de fractura en los que se involucra la teoría de la zona cohesiva del material.

De acuerdo con Faruk et al. (2014), la energía de fractura es un parámetro matemático que permite relacionar la medición de la energía de fractura con la fuerza máxima a tensión y la deformación en la carga máxima aplicada por unidad de longitud de grieta. También, proporciona una cuantificación de la respuesta mecánica de una MAC en términos de la energía de fractura necesaria para culminar el agrietamiento del espécimen, partiendo de un espesor y módulo su módulo de rigidez asociado.

En los ensayos de fractura, la tasa de liberación de energía (G) corresponde con la energía elástica por unidad de área y está asociada con las prolongaciones de las grietas (fase 3) a través de la siguiente relación:

$$G = \frac{\partial U}{\partial A} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

∂U : Cambio en la energía elástica

∂A : Área agrietada

De acuerdo con Tang (2014) la energía de fractura corresponde con la energía necesaria de consumo para generar una unidad de área de superficie de grieta. Esta energía se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$G_C = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

G_C : Energía de fractura

W_f : Trabajo realizado para fracturar al espécimen

A_{lig} : Área de ligamento

Para lograr desarrollar el cálculo anterior es necesario conocer el trabajo realizado para fracturar al espécimen, este parámetro está ligado con la carga aplicada y el desplazamiento generado, a través de la integral de línea representada a continuación:

$$W_f = \int P d_u \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

P: Carga aplicada

u: Línea promedio de desplazamiento de carga

A mayor cantidad de energía requerida para llevar a la falla el espécimen, mejor es el desempeño ofrecido por la MAC a la fractura, y, por lo tanto, mejor es el desempeño a la fatiga de la MAC ensayada.

Sin embargo, la dependencia de la energía de fractura a una tasa de velocidad de falla no es una propiedad fundamental de un material, sino que, se consideran como una propiedad deductiva. Adicionalmente, otros investigadores determinaron que la energía de fractura también depende de propiedades como: el tamaño y la distribución geométrica de los especímenes utilizados (Arrieta, 2016).

De acuerdo con Walubita et al. (2012) al realizar el cálculo de la energía de fractura, se debe considerar únicamente el área bajo la curva fuerza-desplazamiento desde el punto inicial del ensayo hasta el punto donde se alcance el pico máximo de carga (fuerza) aplicada, y no la totalidad del área bajo la curva, pues hay ensayos que terminan a un porcentaje de la carga pico de falla.

Las siguientes figuras ilustran los casos descritos anteriormente: la curva de energía de fractura total necesaria para llevar un espécimen hasta donde la fuerza requerida para continuar el agrietamiento del espécimen es nula (ver Figura 4), y la curva de la energía de fractura requerida para llevar el espécimen hasta la falla o carga máxima/pico aplicada (ver Figura 4).

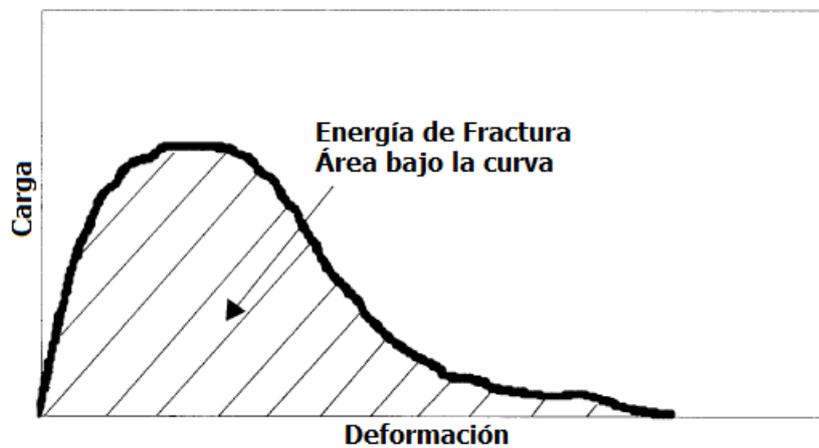


Figura 4. Energía de fractura total.

Fuente: NCHRP, 2002.

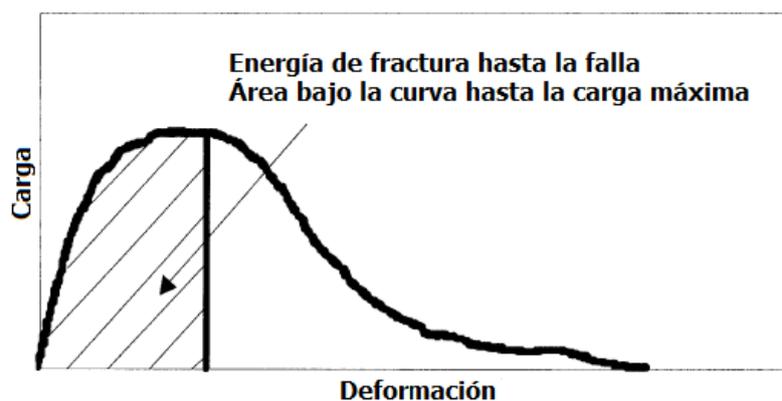


Figura 5. Energía de fractura hasta la falla o carga máxima.

Fuente: NCHRP, 2002.

En términos de los ensayos de fractura, se utiliza la simplificación mostrada en la Figura 5 y se puede considerar que el área de ligamento de los especímenes es constante, estas

consideraciones no afectan la comparación de los resultados obtenidos entre especímenes.

2.4.2 Factor de intensidad de esfuerzo (K)

De acuerdo con Tang (2014) el factor de intensidad de esfuerzo estima la amplificación de los efectos inducidos por el esfuerzo global aplicado, esta situación hace que en las inmediaciones del área donde se transmite la carga aplicada al espécimen (esfuerzo local) se sobrepase la resistencia del material, propiciando el inicio y propagación de la grieta.

El parámetro K es un factor empleado para el cálculo de los esfuerzos locales desarrollados alrededor del extremo inicial de la grieta, de acuerdo con la descripción anterior. La resistencia a la fractura (K_c) está determinada por el máximo valor obtenido para el factor de intensidad (Tang, 2014). Para la condición en que el plano de la grieta es perpendicular a la dirección de la carga de tensión, el factor de intensidad se puede determinar a través de la siguiente ecuación:

$$K = \sigma\beta\sqrt{\pi\alpha} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

σ : Es el esfuerzo global aplicado en el límite exterior del elemento

β : Factor de la geometría

α : Longitud de la grieta

2.4.3 Jc-Integral

La norma ASTM D8044 define la tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral o J_c como el parámetro que mide la liberación de energía elastoplástica, y lo relaciona con el cambio de energía desarrollado en función de la longitud de la grieta. Esta tasa de cambio de energía se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$J_c = -\frac{1}{b} \left(\frac{\partial U}{\partial a} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

J_c : Tasa crítica de energía de deformación

b: Espesor del espécimen

U: Energía de deformación de falla

a: Profundidad de ranura

dU/da: Cambio de energía de deformación con profundidad de la ranura

De acuerdo con la norma ASTM D8044 a mayor valor del parámetro J_c , mejor es el comportamiento del espécimen y/o MAC a la fractura.

2.5 Ensayos de fatiga y fractura en MAC

De acuerdo con Arrieta (2016) existe gran variedad de ensayos de fatiga y fractura para MAC basados en diversos principios y procedimientos de falla, como, por ejemplo: Tensión directa, tensión indirecta, flexión, torsión, ciclos de compresión-tracción, entre otros. Dependiendo del procedimiento y configuración elegida para cada ensayo, así es la variedad de resultados obtenidos para la evaluación de MAC a fatiga.

De acuerdo con Walubita et al. (2012) y varios autores, la mayoría de los ensayos de fatiga poseen una alta variabilidad en los resultados obtenidos. La variabilidad en estos resultados es atribuida a la naturaleza de su configuración de carga y el modo de falla repetido (cíclicos).

Walubita et al. (2012) han mostrado recopilaciones de ensayos en los cuales los coeficientes de variación (C.V.) superan el 65 %, por ejemplo, para los ensayos de flexión con viga de fatiga el C.V. es muy cercano al 99 %, mientras que para los ensayos de tensión diametral el C.V. está en el orden del 65 %.

Algunas propiedades de las MAC pueden afectar el comportamiento o desempeño por fatiga si no se controlan debidamente durante el proceso de preparación y confección de los especímenes, entre las propiedades más influyentes se encuentran: el contenido de asfalto, granulometría, relación polvo/asfalto, los vacíos de aire presentes, temperaturas y procedimientos de envejecimientos, entre otros. Además, durante el proceso de ejecución de los ensayos, si no se controlan debidamente los parámetros de ensayo y el montaje del espécimen, se pueden generar resultados con mayores aumentos en los coeficientes de variación.

Existe una marcada diferencia entre los ensayos de fatiga y los de fractura, basada en el procedimiento de aplicación para la carga. Durante un ensayo de fatiga se aplican ciclos de carga-descarga (cargas cíclicas) a una frecuencia o deformación definida previamente, mientras que para un ensayo de fractura generalmente se utilizan cargas definidas previamente, aplicadas a una tasa de desplazamiento o deformación constante.

Dada la naturaleza de los ensayos y su marcada diferencia de procedimientos, varios autores recomiendan no realizar comparaciones directas entre los resultados obtenidos

(entre fatiga y fractura). Sin embargo, reconocen que los ensayos de fractura brindan resultados que permiten evaluar la susceptibilidad al daño por fatiga en MAC, pues se ha probado que una mezcla que sea más susceptible a la fractura también es más susceptible a la fatiga. Por tanto, es correcto realizar clasificaciones de las MAC basadas en los ensayos de fractura y asociar estos resultados al desempeño por fatiga que tendrán las MAC analizadas (Arrieta, 2016).

A pesar de lo anterior y de acuerdo con varios investigadores, la relación entre la energía de fractura y la fatiga no debe representarse mediante ecuaciones de ningún tipo, debido a que estas propuestas pueden generar correlaciones erróneas, y por tanto, predicciones fuera de la realidad (sub o sobre dimensionadas) para la vida de fatiga de una MAC, a partir de resultados de energía de fractura (Parker, 2010).

2.5.1 Pruebas de laboratorio a esfuerzo y deformación constante

De acuerdo con Arrieta (2016) los principales procedimientos de ejecución de ensayos con cargas controladas que se utilizan en laboratorio para estimar la falla por fatiga de las MAC consideran esfuerzo o deformación constante. Para el caso de esfuerzo constante, no se da un cambio en el esfuerzo aplicado durante la ejecución del ensayo, sin embargo, la deformación sí sufre un aumento continuo en el tiempo, derivando en una disminución de la rigidez del espécimen a lo largo del tiempo (o ciclos de carga). En la Figura 6 se presenta el comportamiento generado por la aplicación de cargas controladas a esfuerzo y deformación constante.

En el caso de deformación constante, la deformación elegida al inicio del ensayo permanece invariable a lo largo del tiempo, es decir, no varía durante las repeticiones o ciclos de carga aplicados. Pero, debido al daño provocado por las cargas repetitivas, el esfuerzo que se aplica va reduciéndose con el número de repeticiones, y, por lo tanto, provoca una reducción de la rigidez de la MAC como función del número de repeticiones (N).

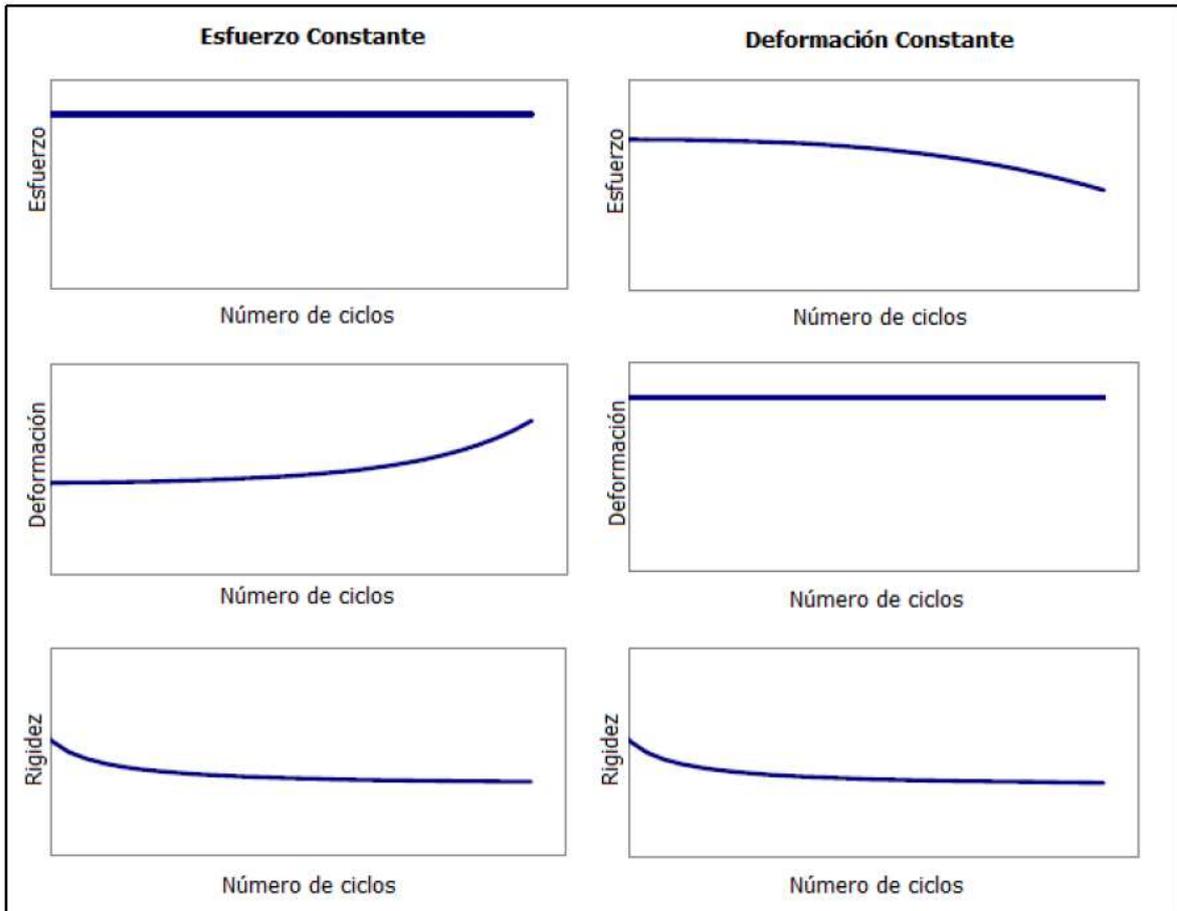


Figura 6. Comportamiento de especímenes ante cargas a esfuerzo y deformación constante.

Fuente: NCHRP, 2004.

De acuerdo con el NCHRP (2004) en las estructuras de pavimentos flexibles que presenten carpetas asfálticas con gran espesor, la capa de MAC es el componente principal para el soporte de cargas y de los aumentos de deformación. Además, dado que el espesor de la capa de MAC es de gran tamaño, los cambios en los esfuerzos aplicados no se consideran significativos, es decir, se pueden considerar constantes.

Para las capas de MAC con espesores inferiores a los 5 cm, la deformación está gobernada por las capas subyacentes, esto permite establecer una mejor relación conceptual entre la deformación constante y las capas de MAC con pequeños espesores. Para las capas de MAC que presenten espesores intermedios, la vida a fatiga se encuentra regida por una combinación de ambos fenómenos (NCHRP, 2004).

Montazeri (2009) refuerza la teoría desarrollada anteriormente, pues asegura que el ensayo a esfuerzo constante se debe aplicar cuando los espesores de pavimento o MAC sean mayores a los 20 cm, mientras que asegura que, para las capas de MAC delgadas,

los análisis son más confiables y certeros si se llevan a cabo con deformaciones controladas (deformación constante).

2.5.2 Variables que afectan la resistencia a la fatiga de las MAC

De acuerdo con el LanammeUCR (2014) la resistencia a la fatiga de una MAC depende tanto de las propiedades de los materiales como del modo de carga ejecutado. Dentro de las propiedades que afectan el desempeño de las MAC se pueden mencionar: El contenido de asfalto, el tipo de asfalto utilizado, el tipo de agregados, la granulometría, el contenido de vacíos de aire, entre otros.

De acuerdo con Na (2010) los especímenes realizados en laboratorio generalmente ven afectada la resistencia a la fatiga debido a la variación en el contenido de asfalto, el contenido de vacíos de aire y la temperatura, principalmente.

Arrieta 2016 elaboró un cuadro que resume los factores que de acuerdo con el LanammeUCR (2014) y Na (2010) afectan la resistencia al daño por fatiga de una MAC. El cuadro mencionado anteriormente se muestra a continuación, donde también se presenta la afectación en la vida de fatiga al realizar un cambio en alguno de los factores descritos.

Cuadro 1. Factores que afectan la resistencia al daño por fatiga de MAC.

Factor	Cambio en el factor	Efecto del cambio en el factor		
		En la rigidez	En la vida a fatiga en ensayos realizados a esfuerzo controlado	En la vida a fatiga en ensayos realizados a deformación controlada
Contenido de asfalto	Incremento	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Contenido de vacíos de aire	Disminución	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Tipo de agregado	Incremento de la angulosidad	Aumenta	Aumenta	Disminuye
Granulometría	Abierta-Graduada	Aumenta	Aumenta	Disminuye
Temperatura	Disminución	Aumenta	Aumenta	Disminuye

Fuente: Arrieta, 2016.

Para realizar los ajustes en las mezclas de acuerdo con la necesidad del proyecto por ejecutar (condiciones de clima, carga, materiales) es posible implementar modificaciones en el asfalto o MAC por desarrollar, con el fin de mejorar el desempeño de estas al agrietamiento por fatiga, que es el punto investigado en el presente trabajo.

Para mejorar las MAC el LanammeUCR ha desarrollado varias investigaciones con diferentes aditivos, entre las que se destacan los polímeros: estireno-butadieno-estireno (SBS, por sus siglas en inglés) y caucho-estireno-butadieno (SBR, por sus siglas en inglés), el antidesnudante líquido conocido como Magnabond y la adición de cal hidratada (Ca(OH)_2). Este último agente es el único que se adiciona a los agregados, como una sustitución de los finos que pasan por la malla No. 200, pues los restantes agentes modificantes se agregan al asfalto previo al mezclado en laboratorio.

De acuerdo con Miranda, Aguiar & Loría (2016) existen diferentes aditivos que pueden mejorar la adherencia entre el asfalto y los agregados contra el daño por humedad, sin embargo, se demuestra que también de forma indirecta se logra mejorar la resistencia a la fatiga de las MAC. Dentro de estos aditivos estudiados se encuentran: el Magnabond, la cal hidratada y el SBS.

De acuerdo con Blanchetto et al. (2007) la adición de cal hidratada se realiza para mejorar la resistencia de las MAC. Mientras no se supere la concentración crítica, que se da cuando la adición de cal comienza a rigidizar la MAC, se logra mejorar la resistencia al daño por envejecimiento sin rigidizar la mezcla y/o afectar la resistencia al daño por fatiga o deformación.

2.5.3 Ensayo de viga a flexión en cuatro puntos

De acuerdo con varios autores, este es el ensayo aceptado universalmente para la determinación de la resistencia al agrietamiento por fatiga de una mezcla asfáltica. Una de las razones que más pesa en la justificación de su aplicación es la configuración del ensayo, en la cual se trata de simular la flexión que experimenta la capa de mezcla asfáltica en la estructura de pavimento.

Este procedimiento de ensayo permite determinar la rigidez, la energía disipada acumulada y la vida de fatiga (número de ciclos) de las mezclas asfálticas en caliente. A nivel internacional el ensayo de flexión en vigas se encuentra normalizado por varias organizaciones, por ejemplo, la AASHTO posee la norma AASHTO T321 para la determinación de la vida de fatiga de mezclas asfálticas en caliente sometidas a flexotracción repetida.

Durante la prueba se aplican cargas sinusoidales a distintas frecuencias sobre los tercios medios de la viga. Por su configuración de apoyo en cuatro puntos, las cargas aplicadas generan un momento flector constante en el tercio medio central de los especímenes. En

cada ciclo de carga/descarga se incluye una carga que regresa el espécimen a la posición original de inicio, induciendo una reversión de esfuerzos a lo largo del ensayo. En la siguiente figura se presenta el montaje y configuración del equipo utilizado para la realización del ensayo de vigas a flexión en cuatro puntos (cuatro apoyos).



Figura 7. Ensayo de fatiga a cuatro puntos en mezcla asfáltica.

Fuente: Limón, P. et al., 2017.

La geometría de los especímenes utilizados se detalla a fondo en el siguiente capítulo. Para desarrollar el ensayo se debe aplicar una temperatura de $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ durante un mínimo de dos horas, para asegurar que todo el espécimen se encuentra a la misma temperatura durante el proceso de falla.

El ensayo puede desarrollarse mediante la aplicación de esfuerzos controlados (constantes) o a deformaciones controladas. Las normas aceptadas y estandarizadas especifican que para la metodología de deformación constante los niveles de deformación aplicados deben estar entre los $250\text{ }\mu\text{strain}$ y $750\text{ }\mu\text{strain}$, para mezclas asfálticas convencionales. Se deben evaluar al menos dos niveles de deformación para poder generar un modelo de fatiga.

Para carpetas de mezcla asfáltica con un espesor considerable, mayores a 20 cm según Montazeri (2009), se recomienda realizar el ensayo de viga a flexión con esfuerzos controlados, donde se aplica una amplitud de carga constante hasta que ocurre la falla del espécimen (NCHRP, 2004).

Cada ensayo de viga a flexión con esfuerzos controlados se puede extender más allá de un día antes de que la viga llegue a la falla. Varios investigadores han demostrado que las mezclas asfálticas que poseen altas rigideces son las que mejor comportamiento presentan bajo esta metodología.

Como se indicó anteriormente, el procedimiento de ensayo mayormente aceptado y utilizado a nivel mundial para la evaluación del agrietamiento por fatiga en MAC es el indicado por la norma AASHTO T321, para vigas a deformación constante y hasta alcanzar una reducción del 50% de la rigidez inicial del espécimen (la rigidez inicial se determina a los 50 ciclos de carga después de iniciado el ensayo). Esta metodología es la que se encuentra normada para Costa Rica a través del Manual del MOPT (2010).

Según una investigación realizada por Pérez et al. (2009), las mezclas asfálticas con alta flexibilidad sometidas a una reducción del 50% de la rigidez inicial aún no han alcanzado la falla. Lo anterior sumado a la aplicación de deformaciones unitarias muy bajas, derivan tiempos de falla muy extensos para alcanzar la falla de los especímenes.

Por otro lado, Abojaradeh (2013) menciona que la falla en los ensayos de viga a flexión se alcanza normalmente al 35% - 65% de la reducción de la rigidez inicial calculada. Esta situación suele provocar altas diferencias en los coeficientes de variación para los resultados obtenidos.

Abojaradeh (2013) también señala que la falla de las vigas de fatiga se da a rigideces superiores al 50%, por lo que analiza varias metodologías alternativas para detectar y/o definir cuándo se alcanza la falla por fatiga en una MAC. Dentro de las metodologías analizadas se destaca la propuesta de Rowe y Bouldin, quienes proponen utilizar la curva del módulo elástico normalizado como indicador de la falla, es decir, graficar el módulo normalizado en función del número de ciclos, donde el punto máximo alcanzado (pico de inflexión) representa la formación de grietas en el espécimen.

De acuerdo con Arrieta (2016) el método de Rowe y Bouldin es funcional para realizar el análisis en el desempeño por fatiga de los especímenes (vigas) ensayadas a deformación o esfuerzo constante. Como se mencionó anteriormente, el método consiste en graficar el módulo normalizado, que se obtiene al multiplicar la rigidez registrada en el ciclo "i" (S_i) por el número de ciclo "i" (n_i), como función del número de ciclos. Bajo esta metodología, se define como vida de fatiga del espécimen al punto máximo alcanzado (pico de inflexión) en la curva. Sin embargo, el ensayo se lleva a cabo (criterio de parada) hasta

alcanzar un 15% de ciclos adicionales a los registrados hasta llegar al pico de inflexión. Es decir, una vez que se alcance el punto máximo del módulo normalizado, se multiplica por 1,15 (15% de ciclos adicionales) el número de ciclos asociados a este pico.

De acuerdo con Abojaradeh (2013) en ese punto máximo la curva entra en una variación del régimen de formación de microfisuras hacia la formación y propagación de microfisuras. El modo de iniciación de grietas se determina mediante los ciclos que soporta el espécimen hasta alcanzar el punto de falla. Al igual que el procedimiento definido por AASHTO, los resultados por registrarse son el número de ciclos y la rigidez de la MAC. En la siguiente ecuación se muestra cómo obtener la rigidez de la MAC.

$$S_i = -\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

S_i : Rigidez en el ciclo "i"

σ_i : Esfuerzo de tensión en el ciclo "i"

ε_i : Deformación unitaria en el ciclo "i"

Las siguientes figuras ilustran y buscan dejar una mejor comprensión del método de evaluación de la vida de fatiga desarrollado por Rowe y Bouldin.

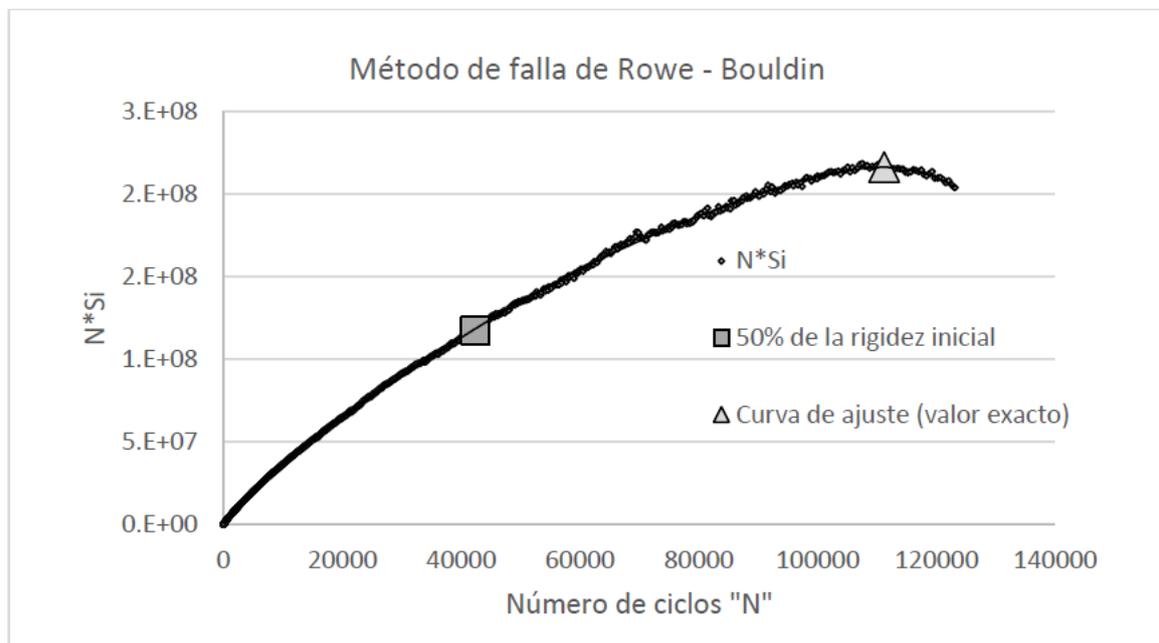


Figura 8. Curva del método de Rowe y Bouldin para el módulo normalizado.

Fuente: Arrieta, 2016.

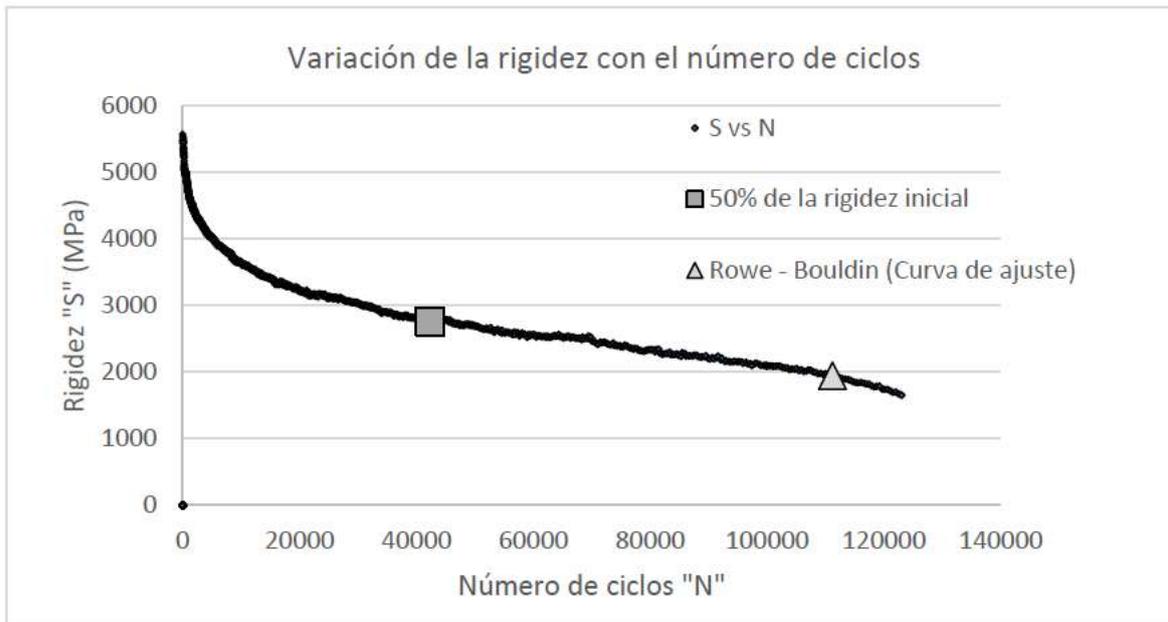


Figura 9. Curva típica del deterioro para el ensayo de vigas a flexión.

Fuente: Arrieta, 2016.

Como se ha mencionado en diferentes secciones del presente trabajo de investigación, este ensayo tiene un costo elevado y utiliza un equipo muy especializado (únicamente funciona para ejecutar este ensayo), por lo tanto, su uso está más orientado a la investigación y no tanto para la evaluación de MAC en proyectos de diseño y/o construcción de carreteras. Ocasionalmente se ha utilizado como ensayo para verificar el comportamiento a la fatiga de algunas MAC en proyectos muy específicos que han evidenciado problemas con fatiga.

2.5.4 Ensayo de resistencia al agrietamiento con especímenes semicirculares a flexión (ASTD D8044-16)

Luego de una amplia investigación de las propuestas para ensayos alternativos a la viga de fatiga, se ha elegido como alternativa el procedimiento de ensayo de resistencia al agrietamiento con especímenes semicirculares a flexión (flexión semicircular SCB) debido a su practicidad, disponibilidad inmediata del equipo necesario, baja variabilidad en los resultados obtenidos, facilidad y bajo costo de aplicación.

Actualmente el LanammeUCR cuenta con todos los equipos, programas y profesionales necesarios para la ejecución del ensayo ASTM D8044-16. Jiménez (2019) desarrolló una investigación con distintas MAC producidas en diferentes plantas del país. De acuerdo con los resultados obtenidos pudo realizar una clasificación de las distintas muestras

analizadas, evidenciando que únicamente tres cumplían con los parámetros de resistencia recomendados para asegurar una MAC adecuada ($0,5 - 0,6 \text{ kJ/m}^2$).

Este procedimiento de ensayo permite determinar la carga máxima aplicada y la energía de deformación necesaria para llevar a la falla el espécimen, y así poder calcular posteriormente la tasa de liberación de energía J_c necesaria para la clasificación o evaluación de las MAC.

Dentro de los requerimientos geométricos establecidos se recomienda que cada espécimen tenga un espesor de $57 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. También se recomienda la realización de tres ranuras con profundidades de 25 mm, 32 mm y 38 mm con una tolerancia de $\pm 1 \text{ mm}$. Además, el ancho de estas ranuras no debe exceder los 3,5 mm. Para la evaluación de una muestra de MAC se requiere como mínimo la elaboración de 12 especímenes, distribuidos en 4 especímenes por ancho de ranura. En las siguientes figuras se ilustran las curvas obtenidas para la carga en función del desplazamiento para tres especímenes con distintas ranuras, así como la energía de deformación en función del ancho de las ranuras.

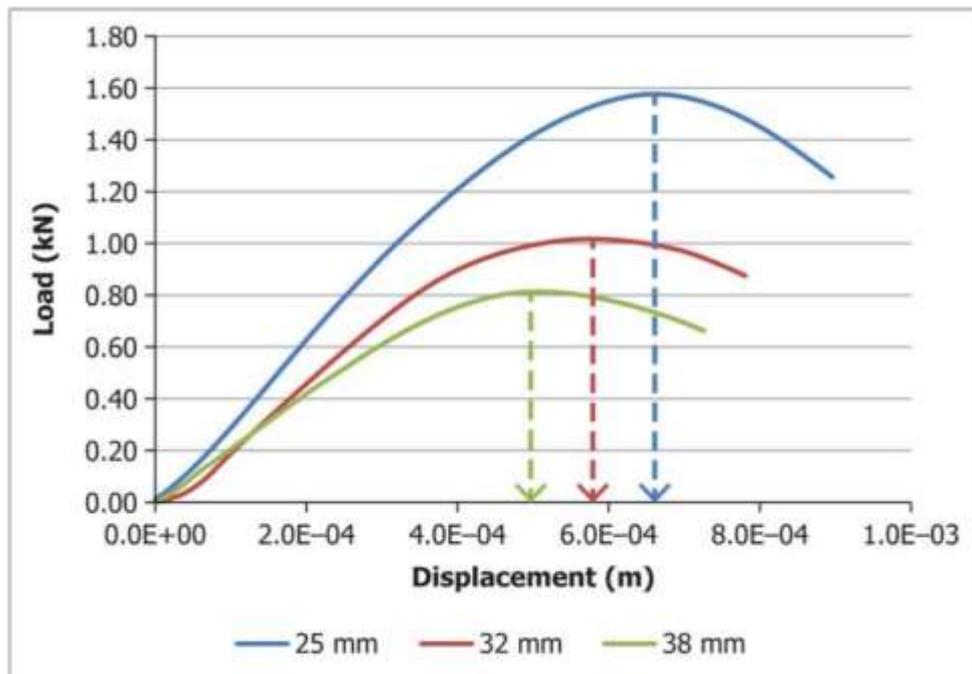


Figura 10. Curva típica de carga versus desplazamiento por ancho de ranura.

Fuente: ASTM, 2016.

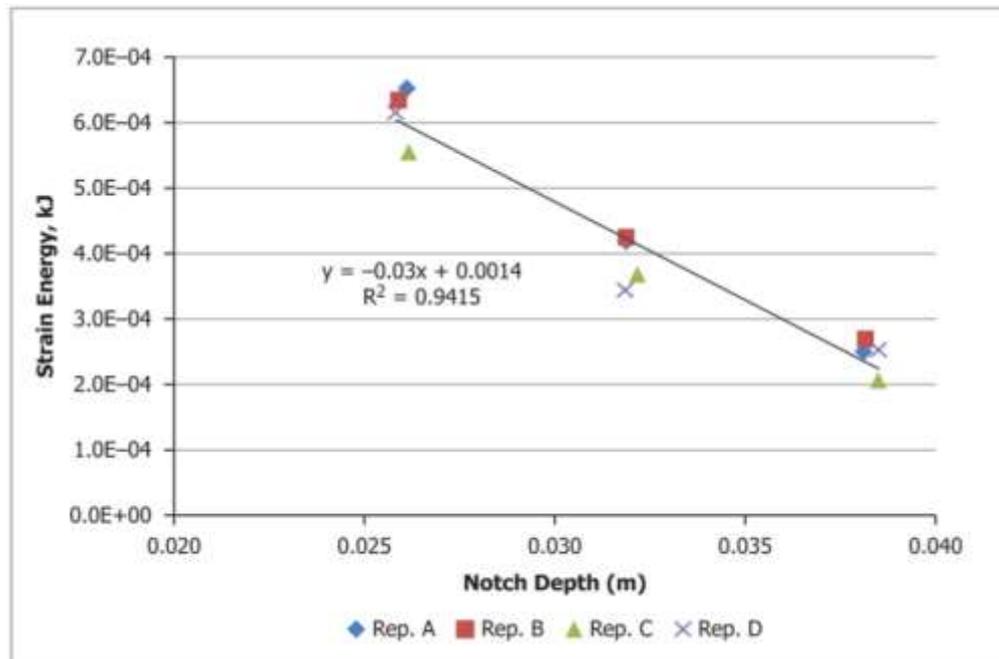


Figura 11. Curva típica de la energía de deformación en función del ancho de ranuras.

Fuente: ASTM, 2016.

De acuerdo con la norma ASTM D8044-16 los especímenes elaborados deben estar en un rango de vacíos de aire de $7,0\% \pm 0,5\%$, sin embargo, para la presente investigación este rango se ha variado a $4,0\% \pm 0,5\%$, para investigar la respuesta a la fatiga de las MAC cuando "alcanzan" los vacíos de diseño, varios años después de la colocación y reacomodo de las capas debido al flujo vehicular.

Previo a la falla de los especímenes se requiere realizar un acondicionamiento a largo plazo en laboratorio, que momentáneamente es bajo la norma AASHTO R30, que somete las probetas a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 5 días.

Al menos durante 2 horas $\pm 0,5$ horas previas al ensayo y durante la ejecución de la prueba se debe mantener la temperatura intermedia del PG con una precisión de $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al iniciar la prueba se debe aplicar una precarga de $45\text{ N} \pm 10\text{ N}$ durante 30 segundos, para propiciar la mejor distribución de esfuerzos entre la superficie del espécimen y el elemento de aplicación de la carga (reacomodo de partículas), posteriormente se retira la precarga y se esperan al menos 5 segundos adicionales antes de iniciar con el periodo de carga.

El proceso de carga se lleva a cabo mediante una carga estática aplicada a una razón (velocidad) de $0,5\text{ mm/min}$, y los registros de tiempo, fuerza y desplazamiento se deben coleccionar con una frecuencia de 10 Hz . La prueba será concluida cuando se alcance el 25%

de la carga máxima aplicada. En la siguiente figura se muestra un ejemplo del montaje del ensayo y los elementos que lo componen.



Figura 12. Montaje del ensayo de resistencia al agrietamiento con especímenes semicirculares.

En la Figura 12 se puede observar que entre los apoyos circulares laterales y el espécimen se ha colocado un material antiadherente (idealmente podría ser cinta de politetrafluoroetileno (PTFE) o almohadillas) para lubricar y/o reducir la fricción causada por la interacción entre los apoyos y la probeta semicircular.

Una vez elaborado el ensayo y registrado los parámetros indicados anteriormente se procede a calcular la tasa crítica de liberación de energía de deformación J-integral (J_c) con la ecuación 7 de la presente investigación.

Nota: En la ecuación 7 la expresión $\partial U/\partial a$ es el cambio de energía de deformación con respecto al tamaño de la ranura en kJ/m, está representada por la pendiente del gráfico mostrado en la Figura 11.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Diseños de MAC

Los diseños de MAC utilizados para desarrollar el presente trabajo de investigación fueron tomados del Proyecto *B5A46 Evaluación de Resistencia al Daño por Humedad de Mezclas Asfálticas en Caliente* desarrollado en el LanammeUCR. Los diseños fueron desarrollados con base en la metodología Superpave, y de acuerdo con los lineamientos y requerimientos establecidos en el manual CR-2010, respetando como base un rango de ejes equivalentes de diseño (ESALs) entre los 3 – 30 millones. Como ya se ha mencionado en reiteradas ocasiones, para este proyecto se utilizaron los diseños previamente desarrollados por el LanammeUCR.

Es importante mencionar que se utilizaron tres mezclas distintas para desarrollar el proyecto: 1) Mezcla patrón o de control (con asfalto sin modificar), 2) Mezcla con asfalto sin modificar y con sustitución del 1% de cal por 1% del peso agregado mineral pasando la malla #200 y 3) Mezcla con asfalto modificado con 2% de SBS y con sustitución del 1% del peso del agregado mineral por cal.

El proceso de sustitución con cal se realiza extrayendo 1% de agregado mineral, específicamente de los finos pasando la malla #200 (también llamado charola), y colocando en su lugar el 1% de cal. Este porcentaje de cal añadido ha sido sometido a un proceso de secado en horno (16 hr a 60 °C) y ha sido tamizado en la malla #200, esto para no incidir en la granulometría final de la mezcla.

Cada una de las mezclas utilizadas se realizó con una misma granulometría base de 12,5 mm de tamaño máximo nominal (TMN) del agregado mineral.

Para la mezcla realizada con asfalto modificado con 2% de SBS se realizó un proceso adicional, que consiste en la modificación del asfalto virgen a través de la adición del polímero denominado SBS (Estireno-Butadieno-Estireno). Para ejecutar esta modificación se utiliza una olla metálica precalentada a una temperatura de 172 °C y un agitar mecánico para realizar el mezclado del asfalto con el modificante.

El polímero SBS disponible se encuentra en pequeñas esferas con un tamaño aproximado de 2-3 mm de diámetro, por lo que previo a su adición en la olla mezcladora, se debe realizar un proceso de molienda en un molino mecánico facilitado por el LanammeUCR.

Durante este proceso las esferas se convierten en polvo, generando una mayor área específica del polímero y facilitando el proceso de mezclado.

Una vez disponibles los materiales se debe asegurar que la olla mezcladora haya estabilizado la temperatura a 172 °C antes de verter dentro de la olla el asfalto virgen precalentado. Una vez alcanzada la temperatura deseada se procede a pesar la cantidad de asfalto virgen por colocar en la olla, esto debido a que la adición del SBS se realiza por porcentaje del peso total del asfalto modificado (2% en este caso). Luego de colocar el asfalto se coloca el agitar mecánico, se calibra la velocidad y profundidad del aspa y se pone en funcionamiento.

Una vez en funcionamiento el equipo con el asfalto adentro se verifica con ayuda de un termómetro con sonda que la temperatura se encuentra estable a 172 °C. Posteriormente se comienza a colocar (en pequeñas proporciones) la masa de SBS estimada previamente. Este proceso de mezclado debe durar al menos 3 horas, a partir de que ha finalizado la colocación de todo el modificante (SBS). La siguiente figura muestra las ollas y el termómetro con sonda utilizados para el proceso de modificación descrito anteriormente.



Figura 13. Equipo utilizado para modificar el asfalto con SBS.

Fuente: Corella, M. 2019.

Los detalles para el contenido óptimo de asfalto, temperatura de mezclado y temperatura de compactación suministradas por el LanammmeUCR para cada una de las MAC utilizadas se resumen en el siguiente cuadro.

Cuadro 2. Características generales de las MAC de 12,5 TMN utilizadas.

Mezcla	Designación	Contenido óptimo de asfalto PTM (%)	Temperatura de mezclado (° C)	Temperatura de compactación (° C)
Control	CT	6,32	156 – 161	146 – 151
1% cal	CAL	6,18	156 – 161	146 – 151
1% cal + 2% SBS	SBS	5,92	167 – 173	157 – 162

En el cuadro anterior se puede observar que únicamente la mezcla que contiene asfalto modificado con SBS presenta temperaturas de mezclado y compactación mayores. Sin embargo, esta mezcla es la que posee menor adición de asfalto en comparación con las mezclas de control y con sustitución de cal.

3.1.1 Materiales utilizados en los diseños de MAC

El asfalto utilizado en la presente investigación fue facilitado por el LanammeUCR bajo el código de identificación 2119-16. De acuerdo con la caracterización suministrada por el LanammeUCR este asfalto corresponde con un AC-30 de acuerdo con su clasificación por viscosidad, que es equivalente a un PG 70 (28) – 22 según la clasificación por grado de desempeño. Al realizarse la modificación con 2% de SBS el grado de desempeño varía hasta un PG 76 (25) – 22.

El agregado utilizado para la presente investigación fue facilitado por el LanammeUCR y obtenido de la fuente "Río Claro" que se ubica en Río Claro de Puntarenas. Los agregados se encuentran divididos en 4 apilamientos separados de acuerdo con el tamaño del material: grueso (2140-16), intermedio A (2138-16), intermedio B (2139-16) y fino (2127-16). En el apilamiento de agregado grueso predominan los materiales retenidos en los tamices 12,5 mm (54%) y 9,5 mm (43%). En el apilamiento de agregado intermedia A predomina el material retenido en el tamiz de 9,5 mm (60%). En el apilamiento de agregado intermedia B predomina el material retenido en el tamiz de 4,75 mm (94%). Finalmente, para el apilamiento fino predomina el material pasando el tamiz de 4,75 mm, con un 81% de material retenido de manera uniforme entre los tamices de 4,75 mm y 0,075 mm (malla #200) y un 11% de finos (pasando la malla #200), también conocido con el nombre de "charola" o "filler".

Para las mezclas asfálticas de laboratorio realizadas en la presente investigación se utilizó una gran granulometría compuesta por: 10% de material grueso, 10% de material

intermedio A, 33% de material intermedio B y 47% de material fino. El cuadro y la figura muestran las características de la gran granulometría final utilizada.

Cuadro 3. Granulometría de 12,5 mm TMN utilizada para las mezclas asfálticas ensayadas.

Muestra		2140-16	2138-16	2139-16	2137-16	Total
Dosificación		10	10	33	47	100
Malla (US)	Malla (mm)	Grueso	Intermedio A	Intermedio B	Fino	Final
3/4"	19,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,5	45,8	99,0	100,0	100,0	94,5
3/8	9,5	2,9	39,4	98,3	100,0	83,7
Nº 4	4,75	1,3	1,7	3,9	92,5	45,1
Nº 8	2,36	1,1	1,2	1,9	60,0	29,1
Nº 16	1,18	0,9	1,0	1,4	39,5	19,2
Nº 30	0,60	0,8	0,8	1,2	26,8	13,1
Nº 50	0,30	0,7	0,7	1,0	19,2	9,5
Nº 100	0,15	0,7	0,6	0,9	14,3	7,1
Nº 200	0,075	0,6	0,5	0,8	11,4	5,7

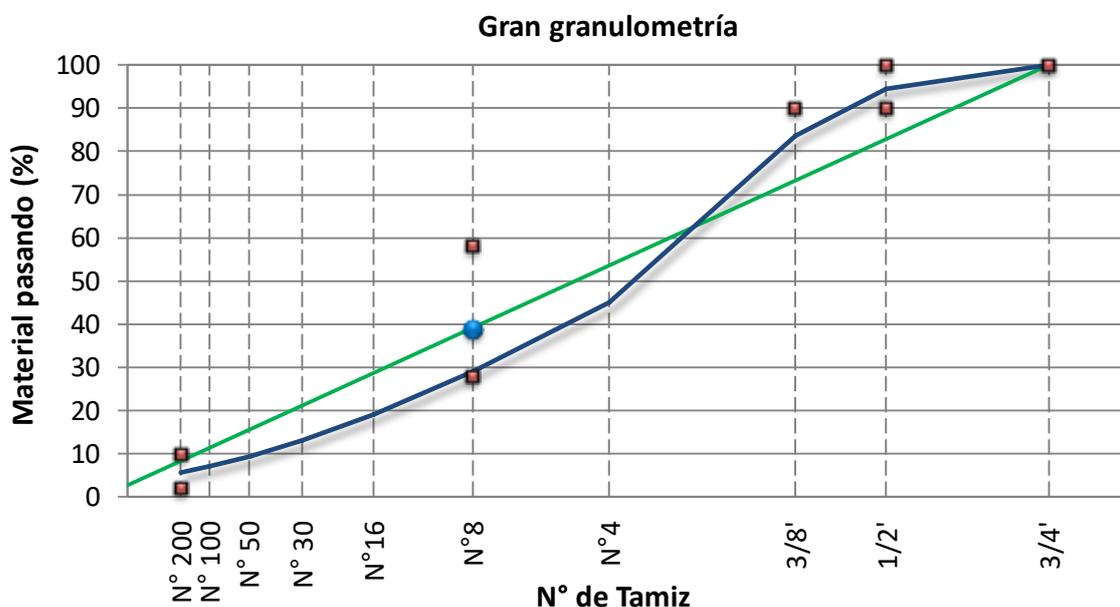


Figura 14. Curva granulométrica utilizada en las mezclas asfálticas de 12,5 mm TMN.

En la figura anterior, la curva azul representa la gran granulométrica o curva granulométrica utilizada, la recta verde indica la línea de máxima densidad, los puntos rojos corresponden con los puntos de control para mezclas de 12,5 mm de TMN según el CR-2010 y el punto azul representa el PCS, de acuerdo con el método de diseño Superpave.

3.2 Elección de ensayo alternativo (SCB)

Para elegir el procedimiento de ensayo alternativo propuesto como evaluación del daño por fatiga en una MAC se realizó una amplia investigación bibliográfica sobre los diferentes ensayos de fractura y fatiga disponibles y existentes, con el fin de elegir un ensayo que sea factible de aplicar, tanto por facilidad de implementación como por disponibilidad del equipo necesario. Además, se buscó un ensayo que en la medida de lo posible representara una reducción en la cantidad de MAC requerida para los especímenes y sobre todo una reducción en el tiempo para disponer de los resultados finales en la toma de decisiones.

Algunos de los criterios más importantes para la elección del procedimiento de ensayo alternativo son: tamaño de los especímenes, facilidad de replicarlo en laboratorio, aplicabilidad en campo, información sobre los parámetros de medición encontrados en documentación, y, el de mayor peso, disponibilidad de los equipos de laboratorio necesarios para la preparación y ejecución del ensayo.

En varios de los procedimientos de ensayo investigados no se encontraron normativas claras con respecto a la determinación de valores base para los parámetros de ensayo. Sin embargo, sí se encontraron varios proyectos e investigaciones en los cuales se recomiendan valores preliminares que permiten definir los parámetros iniciales de los procedimientos de ensayo.

El ensayo de flexión semicircular ha sido ampliamente investigado e implementado en varios países a nivel mundial, incluso se dispone de varios procedimientos de ensayo desarrolladas por organizaciones estadounidenses según los parámetros a investigar, dentro de las cuales se encuentran: AASHTO TP 105, AASHTO TP 124 y la ASTM D8044.

La aceptación del gremio, las investigaciones generadas, la disposición y factible adaptación del equipo de laboratorio necesario, el tamaño de las muestras y la facilidad de replicarlo tanto en laboratorio como en campo el ensayo, han hecho que el ensayo de flexión semicircular sea el seleccionado como alternativa en el presente trabajo de investigación.

Dado que existen varios procedimientos disponibles para el ensayo semicircular, se eligió como base para la presente investigación el ensayo definido en la norma ASTM D8044-16 (versión 2016). La elección se llevó a cabo tomando en consideración las buenas

correlaciones y poca variación de los resultados mostrados como validación del procedimiento en dos laboratorios distintos (9.9 % de COV).

El procedimiento de ensayo seleccionado (flexión semicircular según ASTM D8044) para realizar el análisis y comparación con la normativa vigente actualmente, cumple con los criterios de elección mencionados al inicio de esta sección.

3.3 Preparación de especímenes de ensayo

El proceso de preparación de los especímenes contempló la realización de los “baches” de agregado para cada espécimen (graduaciones por apilamiento), adición del 1% de cal, mezcla con agua (para las mezclas con cal), secado previo en el horno, proceso de mezclado convencional a mano, el acondicionamiento en el horno a corto plazo (2 horas), la compactación de las muestras, la verificación de los vacíos para cada uno de los especímenes base, el proceso de corte de muestras, el análisis volumétrico para determinar el porcentaje de vacíos de cada espécimen cortado, y el acondicionamiento a largo plazo.

3.3.1 Graduaciones de los agregados

Los agregados fueron muestreados de los distintos apilamientos ubicados en el patio de materiales de la UMP del LanammeUCR, y colocados durante al menos 16 horas en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ para dejarlos en una condición seca. Luego las muestras por apilamiento fueron enfriadas y almacenadas en barriles plásticos cerrados herméticamente, con el fin de mantenerlos lo más secos posible y libre de absorción de la humedad natural.

Los “baches” fueron elaborados de acuerdo con la masa (peso) final de la muestra por mezclar, utilizando la granulometría presentada en la sección 3.1 y respetando la proporcionalidad de los agregados (los porcentajes) para cada uno de los apilamientos usados. En la Figura 15 se muestra un “bache” típico que fue elaborado para los especímenes de la mezcla de control (CT).



Figura 15. Ejemplo de granulometría utilizada para la mezcla de CT.

3.3.2 Adición de cal, mezcla con agua y secado en horno para mezcla con 1% de cal

Para las mezclas que incluyen la adición de 1% de cal en sustitución de 1% de agregado tipo charola (material pasando la malla #200), se debió realizar un proceso de mezclado adicional y anterior a la etapa de mezclado final con asfalto. Este paso se dividió en dos etapas.

La primera etapa consistió en un tamizado a través de la malla #200 del material fino que conforma el "bache", conocido también como corrección en la malla #200, proceso en el cual se le extrajo a la granulometría un 1% de charola. Luego se le colocó el 1% en masa de cal viva. Esta cal fue secada previamente en horno durante 16 horas y a una temperatura de 60 °C. Posteriormente se realizó un mezclado en seco con todos los materiales disponibles. La Figura 16 ilustra el proceso descrito anteriormente.



Figura 16. Proceso sustitución y mezclado en seco con el 1 % de cal.

Durante la segunda etapa del proceso se agregó al "bache" un 4% de agua, equivalente en masa y en proporción con la masa total de agregados secos, y se ejecutó el proceso de mezclado. Posterior al mezclado con agua, se colocó la muestra en un horno durante al menos durante 16 horas y a una temperatura de 110 ± 5 °C para secar el agua presente en la muestra.



Figura 17. Proceso de adición y mezclado con el 1% de cal y el 4 % de agua.

Con el proceso de mezclado detallado anteriormente, se buscó que el agregado seco y la cal viva se adhirieran utilizando el agua como medio de transporte y lubricante para que la cal cubriera y se adhiriera de manera uniforme todos los agregados.

3.3.3 Mezclado convencional a mano, envejecimiento en horno a corto plazo y compactación de especímenes

Antes de iniciar el proceso de mezclado, se realizó un precalentamiento de los asfaltos utilizados para las diversas mezclas. Este proceso se extendió por un periodo de aproximadamente cuatro horas, a la temperatura de mezclado para cada tipo de mezcla (160 °C para las mezclas de control y 1% de cal, 170 °C para la mezcla de 1% de cal + 2% de SBS).

Simultáneamente fueron calentados hasta la temperatura de mezclado los "baches" de agregados, durante el mismo periodo de los asfaltos, con el fin de remover por completo algún contenido de humedad que hubiesen ganado los materiales durante el proceso de almacenamiento y dosificación de las granulometrías correspondientes. Como se mencionó anteriormente, el proceso de mezclado se ejecutó de forma manual. En la Figura 18 se muestra una parte del proceso de mezclado final.



Figura 18. Adición de asfalto y mezclado final de las MAC.

Una vez finalizado el proceso de mezclado, las muestras se introdujeron a un horno donde se les aplicó un proceso de acondicionamiento a corto plazo (envejecimiento de las mezclas) que consistió en el calentamiento a la temperatura de compactación (150 °C) durante aproximadamente dos horas. Con este proceso de acondicionamiento en laboratorio se busca simular el envejecimiento que sufre una mezcla asfáltica en caliente durante el periodo de transporte, colocación y compactación en campo.

Posterior a las etapas de mezclado y envejecimiento en horno, se realizó el proceso de compactación, donde se obtuvieron los ejemplares iniciales o base, a partir de los cuales se obtienen más adelante los especímenes finales por analizar y ensayar. Haber realizado muestras base permitió generar especímenes de prueba con una mayor uniformidad en cuanto a los vacíos de aire presentes en todo el volumen de los ejemplares.

Para el ensayo de viga de fatiga a flexión en cuatro puntos los bloques base fueron compactados utilizando el Compactador de Cortante de Asfalto (ASC por sus siglas en inglés), según lo sugerido por la norma ASTM D7981-15. En la Figura 19 se puede observar una fotografía del compactador de bloques utilizado.



Figura 19. Compactador ASC utilizado para elaborar los bloques de MAC.

Para obtener cada bloque compactado se utilizaron entre 22,850 kg – 23,200 kg de mezcla asfáltica en caliente, variando la masa según la mezcla utilizada. Los especímenes obtenidos tenían forma rectangular con dimensiones de aproximadamente 45,1 cm de largo, 15,0 cm de ancho y altura variable entre los 14,8 – 15,3 cm. En la siguiente figura se ilustran algunos de los bloques compactados con ayuda del compactador ASC.



Figura 20. Bloques base de MAC compactados con el compactador ASC.

Se recomienda que los bloques compactados tengan un porcentaje de vacíos de aire que varíe entre el 5,0 % – 5,5 %, pues cuando se obtuvieron los especímenes finales (vigas) de prueba el porcentaje de vacíos se redujo entre un 1,0 % – 1,5 % en relación con el bloque inicial, debido al proceso de corte realizado.

Para la elaboración de los especímenes iniciales del ensayo a flexión semicircular se propone una metodología de preparación basada en la práctica común dentro del LanammeUCR para ejemplares cilíndricos (también llamados pastillas), la experiencia en laboratorio acumulada por la Ing. Mónica Jiménez y las recomendaciones prácticas de los técnicos experimentados que dieron su apoyo. La metodología busca disminuir la cantidad de material usado, optimizar la cantidad de especímenes obtenidos, facilitar el procedimiento de corte y reducir el desperdicio de mezcla asfáltica utilizada.

El procedimiento se basó en la obtención de los 4 especímenes requeridos para cada ranura (mínimo según la norma ASTM D8044-16) a partir de un solo espécimen cilíndrico base, compactado a través del Compactador Giratorio Superpave (CGS). En la Figura 21 se muestran el molde cilíndrico y el CGS utilizados durante el proceso de compactación de los especímenes cilíndricos base de MAC.



Figura 21. Molde y CGS utilizados para elaboración de especímenes cilíndricos base de MAC.

Los ejemplares obtenidos presentaron unas dimensiones de aproximadamente 15,0 cm de diámetro y 14,0 cm de altura, además, se utilizó una masa de entre 5,500 kg – 5,600 kg. A continuación, se ilustra, a manera de ilustración, especímenes base generados en el laboratorio.



Figura 22. Ejemplares cilíndricos compactados con ayuda del CGS.

Se recomienda que las muestras base compactadas tengan un porcentaje de vacíos de aire que varíe entre el 4,5 % – 5,0 %, pues luego del proceso de corte se produjo una reducción del porcentaje de vacíos de entre un 0,5 % – 1,0 %, en relación con los especímenes cilíndricos base.

Los análisis de volumetría realizados para todos los ejemplares base que fueron elaborados fueron realizados de acuerdo con la norma AASHTO T269 (método estándar de prueba para determinar el porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas abiertas y densas). Las gravedades específicas máximas de las mezclas (máxima teórica) también fueron brindadas por el LanammeUCR, como parte de los datos suministrados en el diseño de mezclas del proyecto daño por humedad.

Fueron utilizados para el procedimiento de corte de especímenes solo aquellos ejemplares que se encontraban dentro de los rangos de vacíos de aire presentes en las mezclas. En la sección 3.3.5 se detallan los rangos de valores aplicables según el tipo de ensayo ejecutado (viga de fatiga o semicircular).

Para el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos se requiere de una cantidad importante de mezcla (aproximadamente 23,00 kg) para la elaboración de los cuatro especímenes mínimos por analizar (dos a 400 μ strain y otros dos a 600 μ strain), mientras que para el

ensayo de flexión semicircular se recomiendan tres especímenes base, que requiere de 17,0 kg de mezcla. Generando un ahorro de más del 25 % de la mezcla requerida.

3.3.4 Procedimiento de corte de especímenes

Los ejemplares utilizados para el procedimiento de ensayo de viga a flexión en cuatro puntos fueron obtenidos a partir de los bloques base compactados con el ASC, de acuerdo con el proceso mencionado en la sección 3.3.3 de la presente investigación. Por cada bloque base se pudieron obtener 4 especímenes finales de ensayo, esto se observa con mejor detalle en la siguiente figura.

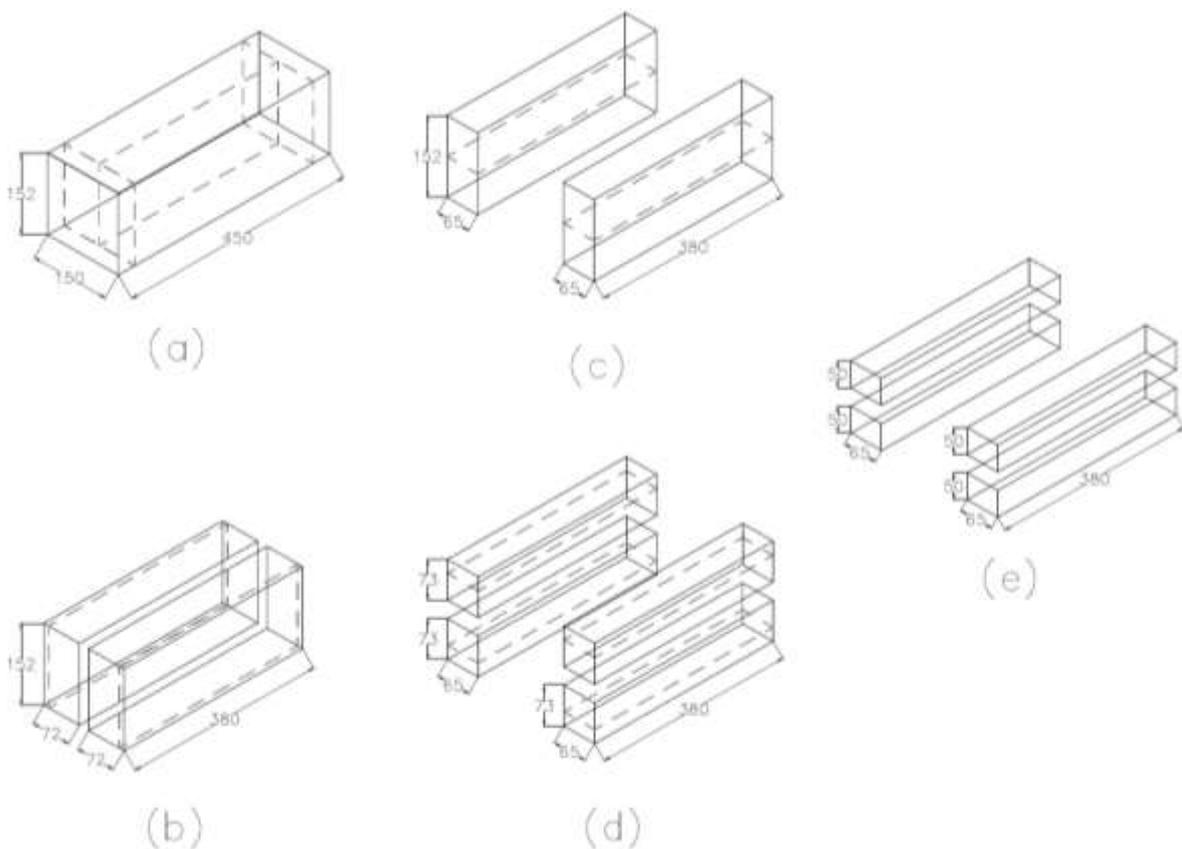


Figura 23. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo de vigas a flexión.

En la figura anterior también se puede observar la secuencia del procedimiento de corte para obtener las vigas de fatiga a partir de los bloques base. En el paso (a) se muestra el bloque base completo y los cortes externos por ejecutar, en la Figura 23 (b) se muestran los primeros cortes realizados al bloque, uno ejecutado en la parte central, y los ejecutados en los extremos longitudinales (380 mm). Además, se muestran las proyecciones de cortes laterales por realizar. Posteriormente, en la Figura 23 (c), se presentan las vigas con su ancho y largo final (65 mm, 380 mm) y la proyección del próximo corte intermedio por ejecutar. En la Figura 23 (d) se muestran las vigas con

dimensiones preliminares y las últimas proyecciones de cortes externas (tapas) por ejecutar. Por último, en la Figura 23 (e) se pueden apreciar las vigas obtenidas para la ejecución del ensayo de viga a fatiga en cuatro puntos ($a=65\text{mm}$, $h=50\text{mm}$, $L=380\text{mm}$).

En la Figura 24 se muestra un tracto del procedimiento de corte realizado con ayuda de la sierra de banco con disco de diamantado. La sierra cuenta con un proceso automatizado de corte que reduce la interacción del usuario con el disco, una vez que se ha montado y fijado el espécimen por trabajar.

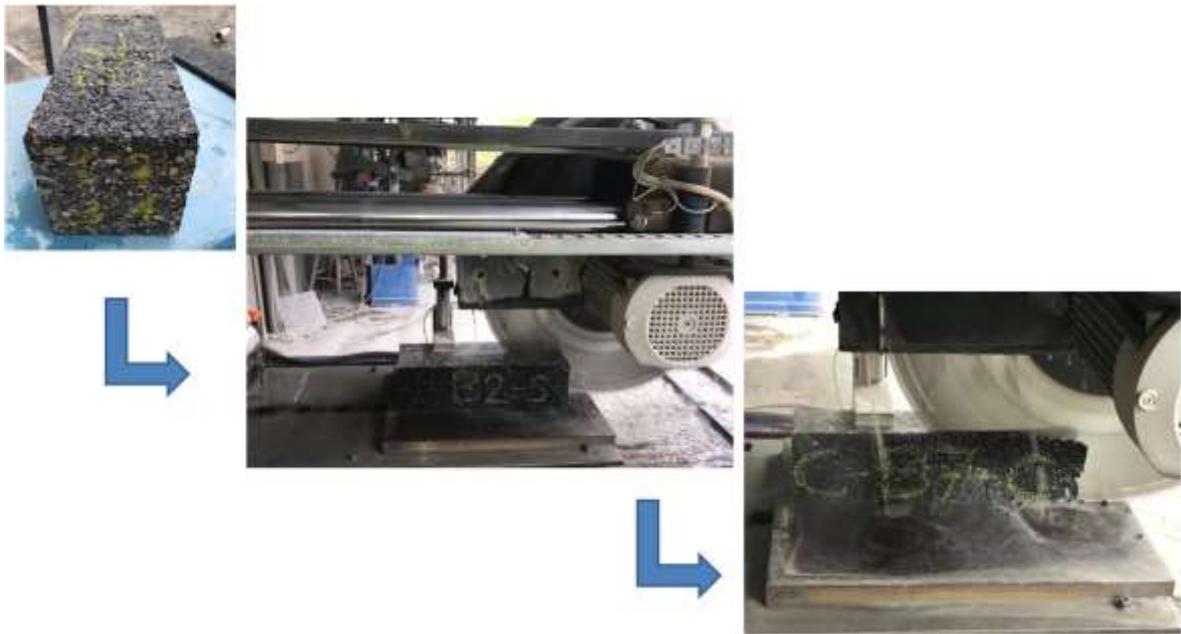


Figura 24. Tracto inicial del proceso de corte de vigas de MAC.

Los ejemplares utilizados para el procedimiento de ensayo de flexión semicircular fueron obtenidos a partir de los cilindros base compactados con el CGS, de acuerdo con el proceso mencionado en la sección 3.3.3 de la presente investigación. Por cada pastilla base se pudieron obtener 4 especímenes finales de ensayo. En la siguiente figura se detalla el procedimiento de corte de los especímenes para el ensayo SC.

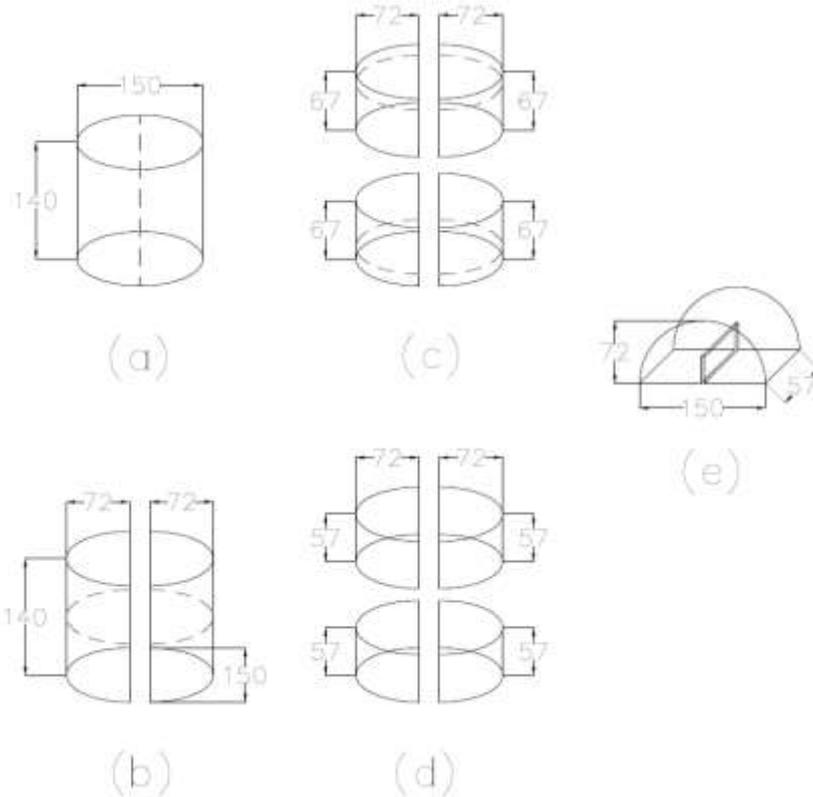
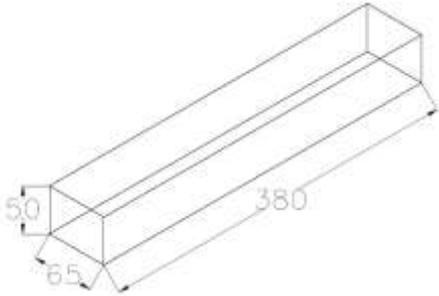
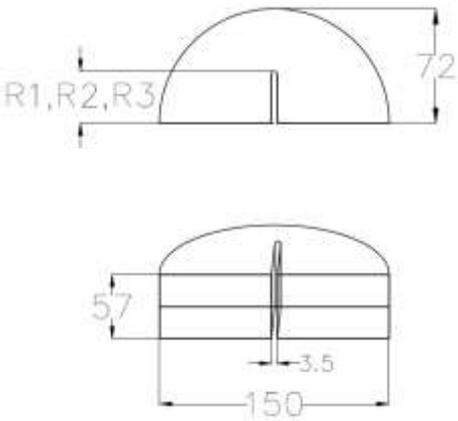


Figura 25. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo de flexión semicircular.

La Figura 25 (a) ilustra el cilindro base con sus dimensiones iniciales. En la Figura 25 (b) se muestra el primer corte transversal realizado en la mitad del diámetro inicial de los especímenes, generando dos semicírculos con una altura de 72 mm. En la Figura 25 (c) se muestra el corte realizado a la mitad de la altura del cilindro inicial, generando especímenes de 67 mm de ancho. Las caras superiores e inferiores fueron cortadas y desechadas de acuerdo con lo mostrado en la Figura 29 (d). Por último, en la Figura 25 (e), se ilustra el corte realizado para las ranuras de distintas profundidades en cada ejemplar semicircular obtenido (varían su profundidad de acuerdo con la norma ASTM D8044-16), estas ranuras se ubican al centro de cada espécimen.

La geometría final para cada uno de los especímenes elaborados se resume en el siguiente cuadro. Para el ensayo de flexión semicircular se solicitó la confección de tres profundidades de ranura distintas: 1) 2,5 cm, 2) 3,2 cm y 3) 3,8 cm.

Cuadro 4. Dimensiones finales y tolerancias de los especímenes de ensayo.

Ensayo	Dimensiones	Tolerancia	Representación física
Viga a flexión en cuatro puntos	Largo = 38,0 cm Ancho = 6,3 cm Alto = 5,0 cm	± 6 mm	
Semicircular	Diámetro = 15,0 cm Espesor = 5,7 cm Altura = 7,2 cm Profundidad de ranuras: Ranura 1 = 2,5 cm Ranura 2 = 3,2 cm Ranura 3 = 3,8 cm Espesor de las ranuras: < 3,5 mm (*)	± 1 mm	

(*) El espesor de las ranuras depende del ancho del disco de corte disponible.

El procedimiento de corte y preparación para los especímenes del ensayo de viga a flexión en cuatro puntos es más corto en relación con el procedimiento para los especímenes del ensayo a flexión semicircular. Este último posee una etapa adicional de preparación-corte-medición de las ranuras, que alarga el tiempo total del procedimiento de ensayo.

3.3.5 Análisis volumétrico de los especímenes de ensayo

Los ejemplares seleccionados para los ensayos de vigas a flexión en cuatro puntos fueron todos aquellos que poseían un porcentaje de vacíos de 4 ± 1 %. Mientras que los especímenes seleccionados para los ensayos de flexión semicircular fueron aquellos con un porcentaje de vacíos de un $4 \pm 0,5$ %. Como se mencionó anteriormente, el 4 % de vacíos utilizado para los ensayos busca simular la condición crítica de fatiga, que se da mucho después de colocada la carpeta de MAC en sitio.

Las tolerancias utilizadas para la selección de los especímenes de ensayo realizados, ± 1 % en vigas y $\pm 0,5\%$ SC, son los solicitados en los procedimientos de ensayo de las normas AASHTO T321-17 y ASTM D8044-16. Además, la determinación del porcentaje de

vacíos presente en los especímenes (análisis volumétrico) fue realizada con base en la norma AASHTO T269.

Para determinar el peso seco de los especímenes, se realizó un procedimiento de secado que consistió en colocar las muestras durante al menos 14 horas dentro de una cámara a una temperatura entre 30 – 35 °C, esta cámara posee ventiladores que circulan el aire caliente y eliminan humedad de los especímenes.

3.3.6 Acondicionamiento de especímenes en laboratorio a largo plazo

Parte de la presente investigación consiste en la proposición de nuevos procedimientos de acondicionamiento de especímenes en laboratorio a largo plazo, que sean equivalentes al procedimiento estándar definido en la normativa vigente. Por lo tanto, se ejecutaron tres tipos de envejecimientos distintos: 1) acondicionamiento estándar ya normado, 2) acondicionamiento a mayor temperatura y menor tiempo que el procedimiento estándar, 3) acondicionamiento con aplicación de radiación ultravioleta.

Los envejecimientos a largo plazo fueron aplicados con el objetivo de simular la oxidación y rigidización a las que se expone una MAC durante su vida útil. Esta simulación vuelve la MAC más susceptible al fenómeno de fatiga y acorta el tiempo de ejecución de los ensayos. Todos los especímenes realizados fueron sometidos a uno de los envejecimientos mencionados anteriormente.

El procedimiento de acondicionamiento estándar se ejecutó de acuerdo con lo establecido en la norma AASHTO R30, "Procedimiento estándar para el acondicionamiento de Mezclas Asfálticas en Caliente". Este procedimiento busca simular el envejecimiento que sufre una carpeta de MAC a lo largo de su vida de servicio (o vida útil) y consiste en colocar los especímenes dentro de un horno a una temperatura de 85 ± 3 °C durante un periodo de 120 ± 2 horas.

Los restantes acondicionamientos propuestos se muestran en el capítulo 4 de la presente investigación, donde también se detallan las características de los procedimientos aplicados (tiempo de exposición, radiación y temperatura).

3.4 Procedimientos de ensayo

En esta sección se presenta el detalle de los procedimientos de ensayo a los que fueron sometidos los especímenes seleccionados, así como una breve descripción de los equipos utilizados y sus componentes.

3.4.1 Ensayo de vigas a flexión en cuatro puntos

Para la ejecución del ensayo de vigas a flexión en cuatro puntos se utilizó un equipo compuesto por: una cámara de acondicionamiento térmico que se encarga de mantener estable la temperatura del ensayo, un marco con cuatro puntos de apoyo donde se monta y falla el espécimen, un pistón neumático que se encarga de aplicar la carga inducida, un compresor de aire que inyecta y regula la presión del pistón de carga y un sistema de control y adquisición de datos.

Para medir las deformaciones que sufren las vigas durante el proceso de ensayo, se coloca un LVDT fijado en la punta de un dispositivo arrosado al marco o aparato de flexión en cuatro puntos. La Figura 26 ilustra el equipo utilizado durante el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos.

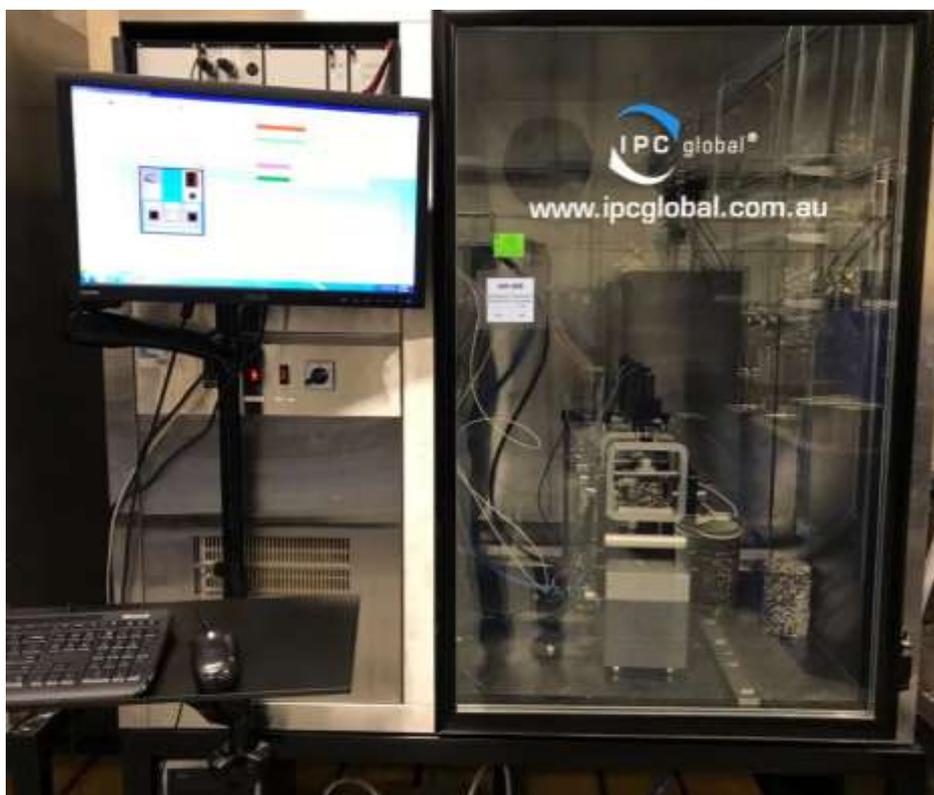


Figura 26. Equipo para ensayo de viga a flexión en cuatro puntos.

El procedimiento de ensayo se ejecutó tomando como referencia la norma AASHTO T321-17 y las prácticas comunes realizadas en el LanammeUCR. Las vigas seleccionadas se colocaron en la cámara de acondicionamiento térmico durante al menos 14 horas previas a la ejecución de los ensayos, esto con el fin de asegurar que los especímenes (internamente) se encontraban a la temperatura deseada. El ensayo se realizó a una temperatura de $20 \pm 0,5$ °C.

Se seleccionaron cuatro especímenes por cada tipo de acondicionamiento, para cada una de las mezclas realizadas. Como se mencionó anteriormente, todas las vigas fueron sometidas a uno de los acondicionamientos propuestos en esta investigación, para reducir el tiempo total de ensayo.

Una vez que se envejecieron los especímenes elegidos, se realizó el montaje del ensayo de acuerdo con la práctica común y con el asesoramiento de los técnicos del laboratorio. El proceso consistió en montar y centrar la viga dentro del marco de reacción, ajustar las abrazaderas para impedir cualquier movimiento externo a la carga-deformación inducida, y por último colocar y fijar el LVDT encargado de registrar las deformaciones en el espécimen. Debe darse un pequeño lapso para que la temperatura de la cámara se estabilice de nuevo al valor de la falla.

Posterior a este proceso, se llevan a cero los valores de carga y deformación inicial (a través del equipo CDAS) y se inicia el ensayo. Los ensayos ejecutados para las distintas combinaciones (mezcla-acondicionamiento) se realizaron aplicando una carga sinusoidal con una frecuencia de 10 Hz y a deformación constante. De los cuatro especímenes elegidos por cada combinación, se evaluaron a un nivel de deformación de 600 μs y los dos restantes a 400 μs .

Luego de realizar varios ensayos tratando de determinar una rigidez final a la cual detener las pruebas sin perder la información necesaria, se encontró que la mejor opción era programar la finalización de los ensayos cuando se alcanzara una reducción del 80 % del valor de la rigidez inicial de cada viga (que se calcula con los primeros 50 ciclos de la prueba), es decir, cuando la viga posea un 20 % del valor inicial de la rigidez.

Al detener las pruebas hasta alcanzar el 20 % del valor de la rigidez inicial, fue necesario realizar un procesamiento de datos posterior a la falla, para recortar y extraer únicamente los datos necesarios para su análisis posterior. Los ensayos se llevaron a cabo con ayuda del programa "*UTS015 Beam Fatigue Test*" del LanammeUCR.

Es importante resaltar que ya existe una actualización de este programa que permite detener el ensayo con el criterio de Rowe y Bouldin (número de ciclos), sin embargo, no era compatible para la versión del equipo utilizado durante la ejecución de los ensayos para la presente investigación (solo se dispone de versiones más recientes).

Se tomaron en cuenta para los análisis posteriores los siguientes parámetros de medición: rigidez de los especímenes, cantidad de ciclos a la falla, deformación y energía disipada

acumulada. Para determinar la falla de los especímenes se utilizó tanto el criterio de la normativa vigente (AASHTO T321-17) como el criterio de Rowe y Bouldin (cantidad ciclos), pues se realizó una comparación posterior con los resultados obtenidos.

Es parámetro de energía disipada acumulada se consideró para la comparación y análisis de posibles correlaciones con el ensayo de flexión semicircular.

3.4.2 Ensayo de flexión semicircular

Para la ejecución del ensayo a flexión semicircular se utilizó una máquina universal de ensayos con capacidad de hasta 25 kN (UTM-25 - *Universal Testing Machine*, por sus siglas en inglés). Esta máquina está compuesta por una cámara de acondicionamiento térmico que se encarga de mantener estable la temperatura de ensayo, una base para el acomodo y falla de los especímenes, un sistema de presión hidráulico que se encarga de transmitir la carga y un sistema de control y adquisición de datos.

Es importante resaltar que la base de apoyo para los especímenes fue fabricada en el LanammeUCR. El dispositivo presenta una separación de 120 mm (80 % del diámetro de los ejemplares) entre los cilindros giratorios de apoyo. En la Figura 27 se muestra el interior de la UTM-25 y sus dispositivos para montaje de las muestras y aplicación de la carga inducidas.

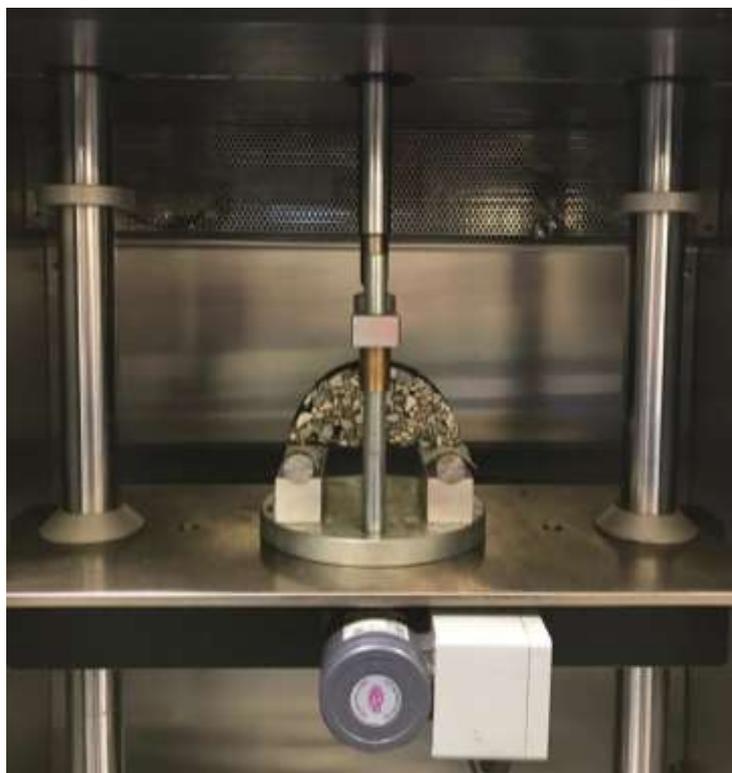


Figura 27. UTM-25 y dispositivo de apoyo elaborado en el LanammeUCR.

Este procedimiento de ensayo se desarrolló tomando como referencia lo descrito en la norma ASTM D8044-16 y la práctica común del LanammeUCR. Los ejemplares semicirculares seleccionados se colocaron dentro de la cámara térmica de la UTM-25 durante al menos 12 horas previas a la ejecución de los ensayos, aunque la norma recomienda realizar el proceso de acondicionamiento térmico en un lapso menor. Los ensayos se ejecutaron a una temperatura de $25 \pm 0,3$ °C.

Según el esquema experimental y la metodología de corte de ejemplares, se obtuvieron cuatro especímenes semicirculares por cada ejemplar base. Por lo que fue necesario realizar al menos tres "pastillas" base para cada combinación mezcla-acondicionamiento, con el fin de obtener al menos 9 ejemplares base y 36 especímenes semicirculares por cada combinación realizada.

Se seleccionaron 12 especímenes por cada tipo de envejecimiento aplicado, para cada una de las mezclas realizadas. Como ya se mencionó anteriormente, cada juego de especímenes (12) fue sometido a uno de los acondicionamientos a largo plazo en laboratorio propuestos en esta investigación, con el fin de reducir el tiempo total de la prueba.

De los 12 especímenes seleccionados para ensayar, cuatro poseen una ranura con una profundidad promedio de 25 mm, cuatro poseen una ranura con una profundidad promedio de 32 mm y los restantes cuatro poseen una ranura con una profundidad de 38 mm.

Una vez que preparados los especímenes elegidos, se realizó el montaje del ensayo de acuerdo con la práctica común y con el asesoramiento de los técnicos del laboratorio. El proceso consistió en montar y centrar los especímenes sobre la base de apoyo y ajustar el pistón de carga hasta quedar justo sobre los semicírculos (sin contacto), para evitar transferir carga antes de lo debido y/o dar un golpe con el pistón al ejemplar.

El mismo sistema que contiene el pistón, percibe los datos de deformación registrados sobre las muestras falladas. Debe darse un pequeño lapso entre el montaje del espécimen y la ejecución del ensayo, con el objetivo de que la temperatura de la cámara se estabilice de nuevo al valor final de la falla.

El procedimiento de ensayo se llevó a cabo en dos etapas automatizadas: 1) se aplicó una pre-carga de 45 N durante 30 segundos, para generar el acomodo y la distribución uniforme del esfuerzo entre el pistón y la superficie de contacto (reacomodo de

partículas), 2) se aplicó una carga a compresión de tipo sinusoidal ascendente, a una tasa de 0,5 mm/minuto y con una frecuencia de 10 Hz, hasta alcanzar el criterio de falla.

Como criterio de falla para terminar este ensayo se define: 1) que se alcance una disminución del 75 % de la carga máxima aplicada, es decir, llegar a un 25 % de la carga pico registrada, 2) que disminuya la carga aplicada hasta 50 N.

Según se puede apreciar en la Figura 27 los especímenes fueron colocados con la parte plana (corte) sobre los apoyos cilíndricos, de tal forma que la ranura realizada sobre la base inferior de la muestra quede en la misma línea de carga del pistón, es decir, el fondo de la ranura queda alineado con el punto superior donde el pistón transmite la carga al espécimen.

Los ensayos se llevaron a cabo con ayuda del programa "*UTS041 Cracking Resistance Test*" del LanammeUCR. Se tomaron en cuenta para los análisis posteriores los siguientes parámetros de medición: profundidad de la ranura, carga pico registrada, tasa de alivio de la energía de deformación crítica (J-integral). Este último parámetro de energía de fractura se consideró para la comparación y análisis de posibles correlaciones con el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos.

CAPÍTULO 4. DETERMINACIÓN DE PROPUESTAS PARA ACONDICIONAMIENTO DE ESPECÍMENES EN LABORATORIO A LARGO PLAZO

Existe un procedimiento de ensayo ya definido en la normativa nacional para el acondicionamiento de especímenes en laboratorio a largo plazo, conocido como acondicionamiento estándar, y que se detalló en la sección 3.3.6 de la presente investigación. Sin embargo, este procedimiento es bastante extenso (5 días) y provoca que la obtención de los resultados de fatiga en MAC sea más tardía, limitando los tiempos de respuesta y/o toma de decisiones en proyectos.

Tal situación motivó el estudio y propuesta de un nuevo procedimiento para el envejecimiento de especímenes a largo plazo, que ofrezca resultados similares a los obtenidos a través del acondicionamiento estándar, en un periodo menor.

Por otro lado, el acondicionamiento implementado actualmente no define en forma clara la cantidad de años de envejecimiento que provoca a las MAC, es decir, no se tiene conocimiento preciso sobre el tiempo de simulación que se logra al implementar este procedimiento acelerado de daño a la MAC.

Considerando lo anterior, se propone un procedimiento de acondicionamiento con radiación ultravioleta, que simula el daño sufrido por una MAC en un lapso de 10 años.

Los siguientes subcapítulos detallan los procedimientos de ensayo propuestos como alternativa al envejecimiento estándar, para la evaluación de las MAC.

4.1 Acondicionamiento con mayor temperatura y menor tiempo de exposición

De acuerdo con la TRB (2015) se han implementado en algunos estados de los Estados Unidos de Norte América distintos protocolos de acondicionamiento de especímenes en laboratorio a largo plazo, que buscan emular los resultados obtenidos por el procedimiento estándar (AASHTO R30). Estos protocolos consideran una variación en el tiempo de exposición y temperatura aplicada a los especímenes, generando resultados que son bastante similares al procedimiento estándar.

En esta misma investigación la TRB (2015) recopila una serie de protocolos estudiados e implementados en laboratorio, donde se demuestra la influencia directa de los factores tiempo y temperatura en los resultados obtenidos. Además, concluye que un aumento en la temperatura y una reducción en el tiempo de exposición simula de buena forma el envejecimiento inducido con los años a una MAC.

Tomando como base las investigaciones y los resultados resumidos por la TRB (2015) y considerando la necesidad de acelerar el procedimiento de acondicionamiento a largo plazo en laboratorio se implementó un barrido térmico en combinación con periodos de exposición que permitieron determinar algunas combinaciones válidas para proponer como alternativa de envejecimiento. En la siguiente figura se presenta, a manera de ejemplo, una fotografía de los acondicionamientos a 90 °C (la viga del frente fue expuesta durante 2 días, la del fondo durante 3 días).



Figura 28. Acondicionamiento de vigas a 90 °C dentro de un horno.

Es importante mencionar que a pesar de que mayor temperatura significa menor tiempo de exposición, durante el barrido térmico se encontraron temperaturas a las cuales los especímenes utilizados sufrían daños en su composición (se deformaron). Por lo tanto, se trató de ajustar el proceso con aquellas combinaciones de temperaturas superiores a la estándar (> 85 °C) y periodos de exposición que se supuso no provocarían problemas de estabilidad de la MAC.

En el Cuadro 5 se muestran las combinaciones, temperatura - tiempo de exposición, ejecutadas durante el barrido térmico realizado para la elección de un acondicionamiento de MAC a largo plazo en laboratorio.

Cuadro 5. Combinaciones de temperatura-tiempo de exposición realizadas.

Combinación	Temperatura (T)	Tiempo (t)
1 (Estándar)	85 °C	5 días
2	90 °C	2 días
3	90 °C	3 días
4	95 °C	2 días
5	100 °C	1 día
6	110 °C	1 día

Es importante mencionar que para el proceso de análisis y comparación de resultados se utilizó el ensayo de viga a fatiga en cuatro puntos considerando la propuesta de Rowe y Bouldin (número de ciclos) como el criterio de falla de los especímenes. Además, se utilizó la mezcla de control para la elaboración de las probetas ensayadas.

También se debe señalar que, al ser una propuesta preliminar para acelerar el envejecimiento a largo plazo en laboratorio, solo se ensayó una probeta por combinación realizada (T-t). En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos para cada parámetro de medición (del desempeño a la fatiga) considerado dentro del proceso de elección.

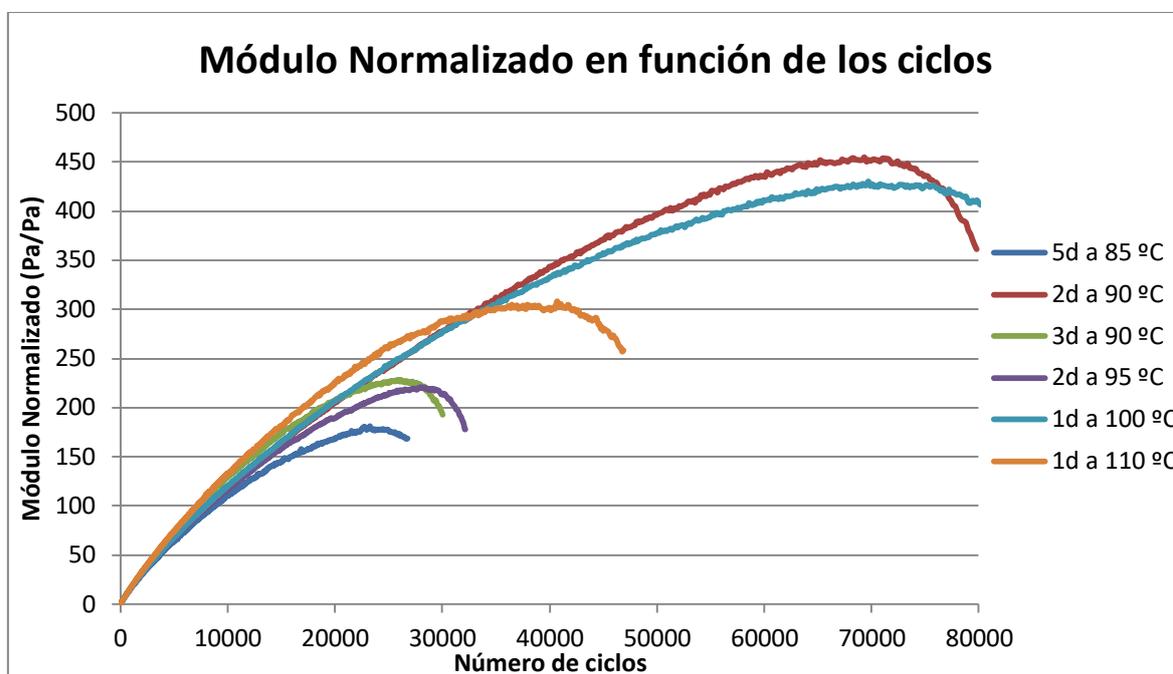


Figura 29. Variación del módulo normalizado en función de los ciclos para cada combinación.

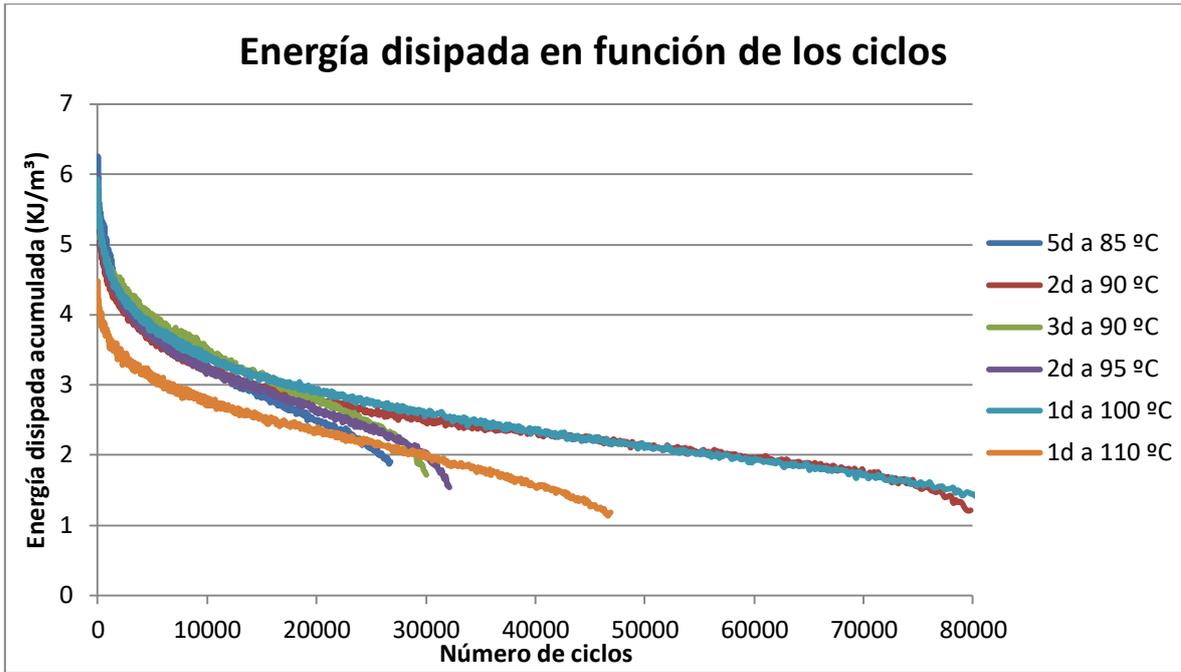


Figura 30. Variación de la energía disipada en función de los ciclos para cada combinación.

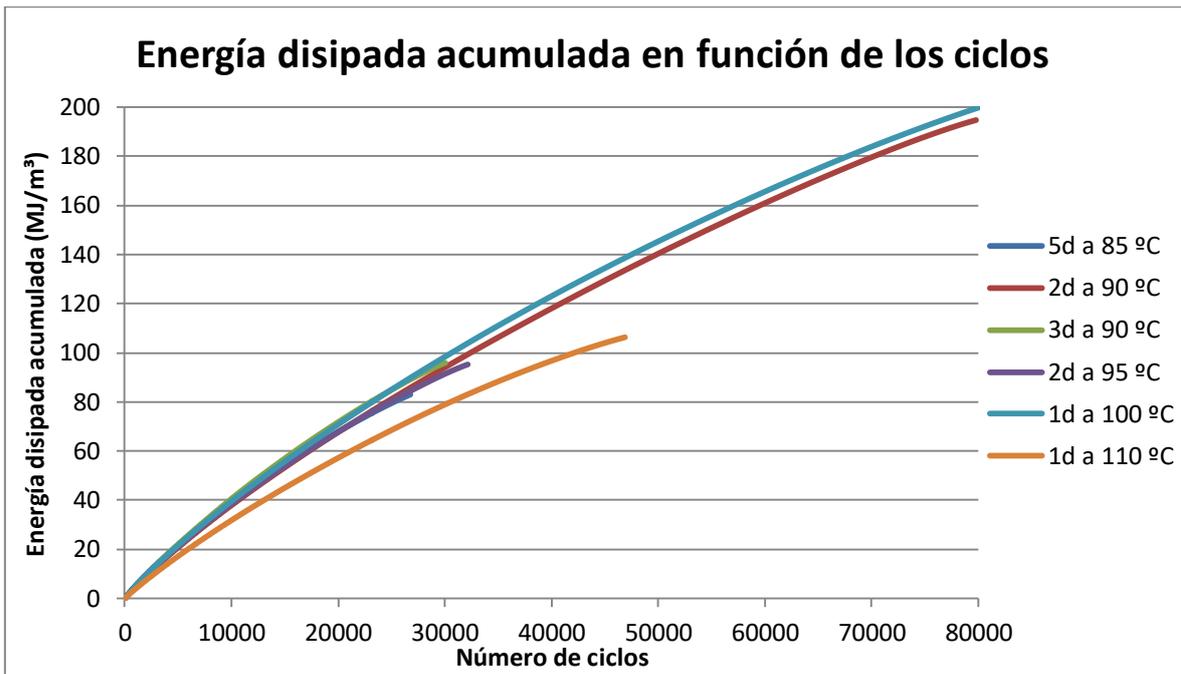


Figura 31. Variación de la energía disipada acumulada en función de los ciclos para cada combinación.

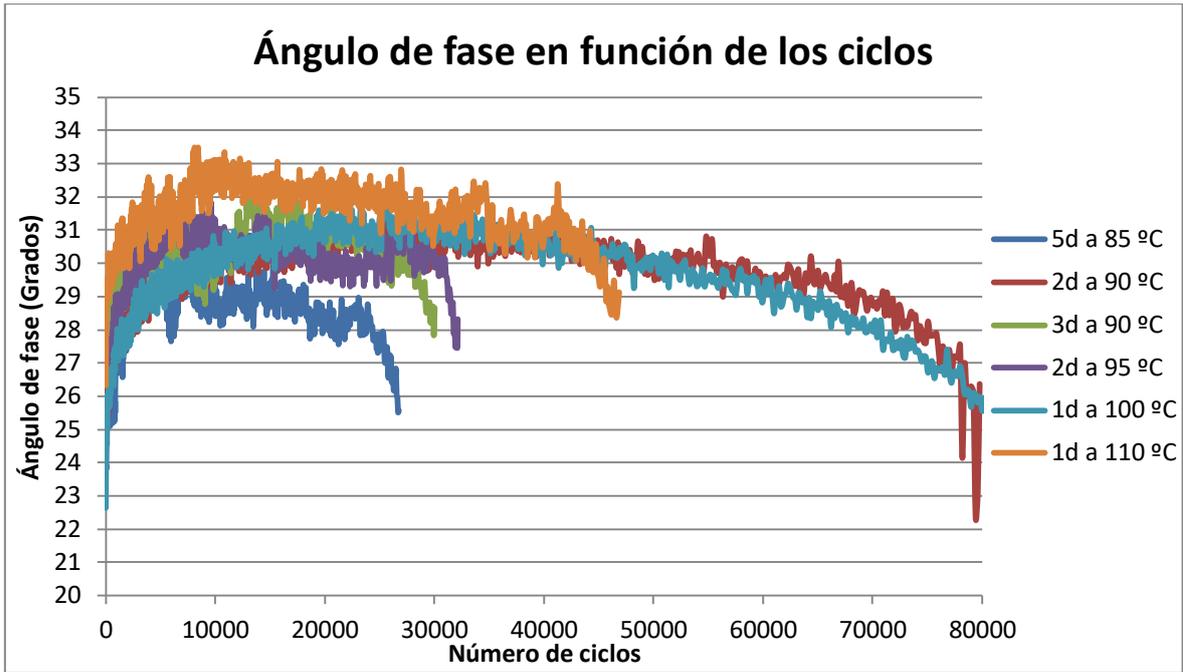


Figura 32. Variación del ángulo de fase en función de los ciclos para cada combinación.

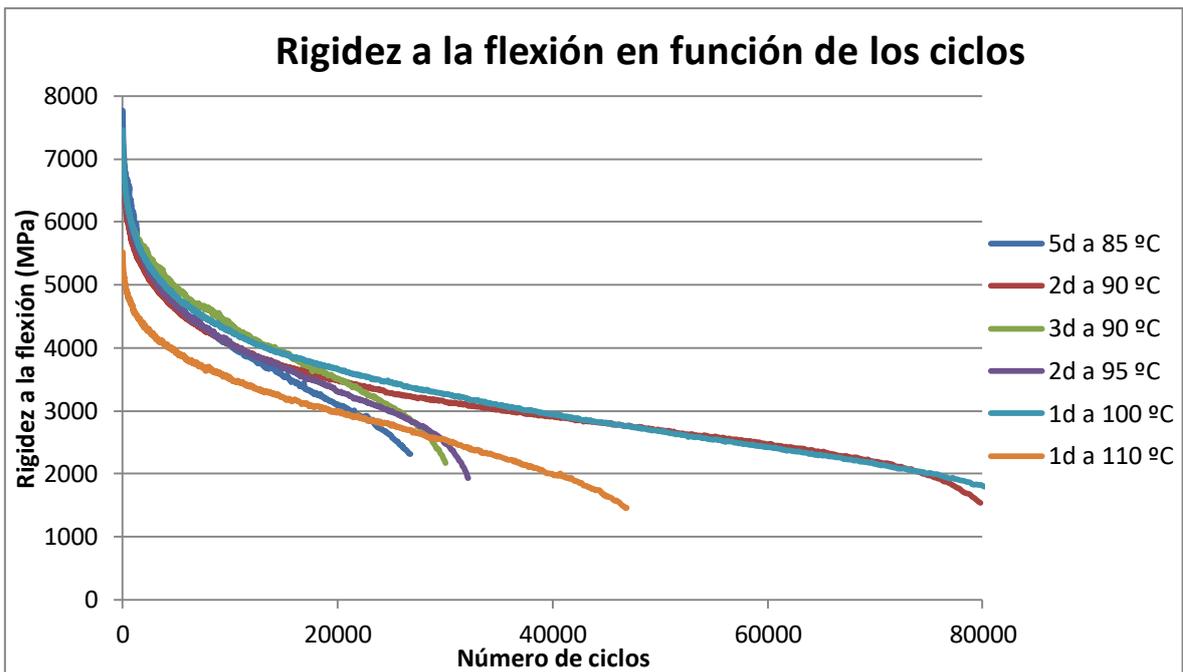


Figura 33. Variación de la rigidez a la flexión en función de los ciclos para cada combinación.

Previo a la elección de las combinaciones por ejecutar, uno de los efectos que se consideró fue la deformación de los especímenes, en los resultados mostrados desde la Figura 29 hasta la Figura 33, se puede observar que aunque las combinaciones 5 y 6 presentan las mayores temperaturas aplicadas (100 °C y 110 °C, respectivamente), el

periodo de exposición no ayudó a emular el comportamiento deseado (5 días a 85 °C). Se podría pensar en aumentar el periodo de exposición para lograr una mejor representación, sin embargo, no es apropiado aumentar a dos días el tiempo de exposición, pues se comprobó que esa combinación ya genera problemas de estabilidad en la mezcla (se deforma).

Analizando la totalidad de los resultados obtenidos para los parámetros de medición presentados anteriormente (de la Figura 29 a la Figura 33) se puede decir que las combinaciones de 3 días a 90 °C y 2 días a 95 °C son las que mejor simulan el comportamiento del acondicionamiento estándar. Además, estos protocolos de acondicionamiento en laboratorio a largo plazo aplicados son muy semejantes entre sí, especialmente en el número de ciclos a la falla (todos cercanos a 30 000), y se encuentran dentro del rango de variación de los resultados obtenidos para el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos.

Para corroborar las equivalencias mencionadas anteriormente, se muestran a continuación los resultados obtenidos del análisis estadístico (pruebas pareadas con T-Student) para los acondicionamientos en laboratorio a largo plazo propuestos como alternativa al normado actualmente. Es importante mencionar que el análisis estadístico se realizó con un nivel de confianza del 95 % y utilizando como variable respuesta el número de ciclos a la falla para los dos criterios estudiados: 50 % de la rigidez inicial (50 % Ro), Rowe y Bouldin.

Cuadro 6. Pruebas pareadas para los distintos acondicionamientos térmicos propuestos.

Tipo de acondicionamiento	Ciclos a la falla (50 % Ro)	Ciclos a la falla (Rowe y Bouldin)	Valor-p	Conclusión
Estándar (R30)	13 520	26 770	$\alpha = 0,05$	
2 días a 95 °C	17 640	32 150	0,084	No hay diferencia significativa
3 días a 90 °C	21 370	30 040	0,249	No hay diferencia significativa

Se puede concluir con un 95 % de confianza que los envejecimientos alternativos aplicados generan un desempeño a la fatiga estadísticamente igual al estándar (R30).

De acuerdo con lo anterior, y pensando en reducir al mínimo la duración del procedimiento de envejecimiento de los especímenes, se puede decir que las propuestas de acondicionamiento aceleran los tiempos de ensayo y reducen el periodo para la obtención de resultados y toma de decisiones.

Se debería escoger el acondicionamiento de 2 días a 95 °C, sin embargo, al realizar una revisión de los especímenes previo a la ejecución del ensayo de viga a flexión en cuatro puntos, se detectó un problema de flujo del bitumen hacia la base de la probeta, es decir, se creó una película de asfalto en la parte inferior de la viga, producto del escurrimiento y/o flujo gravitacional del bitumen.

En la Figura 35 se ilustra la situación descrita anteriormente, del lado izquierdo de la figura se muestra la parte superior de la viga, del lado central la parte inferior con el papel filtro adherido, mientras que del lado derecho se ilustra la parte inferior del espécimen. Se puede observar claramente la presencia del exceso de asfalto a lo largo de toda la viga.



Figura 34. Película de asfalto formada en la parte inferior del espécimen envejecido 2 días a 95 °C.

El fenómeno ocurrido en la Figura 35 no se presentó en la viga envejecida a 90 °C durante 3 días, tal como se muestra en la Figura 35. Por lo tanto, para la actual investigación, se determina que para los especímenes de MAC se realizará como proceso alternativo de acondicionamiento a largo plazo en laboratorio, el procedimiento compuesto por una exposición de las probetas durante 3 días a 90 °C dentro de un horno cerrado herméticamente.



Figura 35. Viga con acondicionamiento de 3 días a 90 °C.

El principal problema detectado para el envejecimiento de 2 días a 95 °C es que esa película delgada de asfalto formada en su parte inferior conforma un refuerzo elástico en la zona de evaluación a la fatiga de la mezcla, en el tercio medio y en la fibra más lejana del centroide de la viga, que altera los resultados obtenidos.

Además, a pesar de que se trata de una zona más elástica, se presenta una acumulación de asfalto más oxidado y endurecido por la exposición térmica, que ha variado su conformación o acomodo molecular, y, por lo tanto, sus características de resistencia físico-mecánicas. Esta situación provoca una complejidad mayor en el análisis, e involucra otros factores que están fuera del alcance para la presente investigación.

Para evitar el problema detectado anteriormente y con el fin de estudiar y aprovechar la reducción de 3 días que significa aplicar un acondicionamiento de 2 días a 95 °C en lugar del acondicionamiento estándar (5 días a 85 °C), se recomienda fallar los especímenes envejecidos por el lado contrario de la acumulación de asfalto oxidado, es decir, montar el espécimen de forma tal que la película delgada de asfalto quede ubicada en la parte superior de la viga. De esta forma se logra ensayar el tercio medio inferior de la viga que no posee la acumulación de asfalto oxidado y endurecido.

4.2 Acondicionamiento con radiación ultravioleta (UV)

Con el fin de simular en laboratorio el envejecimiento de campo inducido por la radiación ultravioleta a la MAC, para las condiciones de clima promedio en Costa Rica, se tomó como base la metodología de acondicionamiento en horno desarrollada por (Sánchez, 2017), con algunas modificaciones adicionales en la preparación de la cámara de envejecimiento.

En esta sección se presenta la configuración y el desarrollo metodológico implementado a lo largo del acondicionamiento. También, se menciona la base teórica y formulaciones que se utilizaron para determinar el tiempo de exposición y la cantidad de radiación UV aplicada a los especímenes de MAC, en función del periodo de envejecimiento acelerado que se quiere simular.

Inicialmente se realizó el diseño y configuración preliminar de la cámara de envejecimiento a utilizar, para ello fue necesaria la asesoría del investigador del LanammeUCR el Quím. Jorge Salazar, quien gestionó la compra de cuatro lámparas ultravioleta marca Steren, compuestas por dos fluorescentes de 10 Watts cada uno, ofreciendo una potencia de 20 Watts para cada una de las lámparas adquiridas.

Según la información consultada por el Quím. Salazar y mediciones previas realizadas en el LanammeUCR para este tipo de lámparas, las longitudes de onda emitidas por los fluorescentes varían entre los 368 – 415 nm. Estas longitudes de onda se encuentran dentro de las bandas UV-A y la banda azul del espectro de luz visible (400 – 700 nm), esta es la razón por la que la percibimos de color azul la radiación emitida por las lámparas.

La Figura 36 muestra los resultados obtenidos por el LanammeUCR para la medición de las longitudes de onda emitidas por los fluorescentes, esta medición se llevó a cabo a través del Espectrofotómetro AvaSpec 3648 con accesorio coseno colector para fibra óptica.

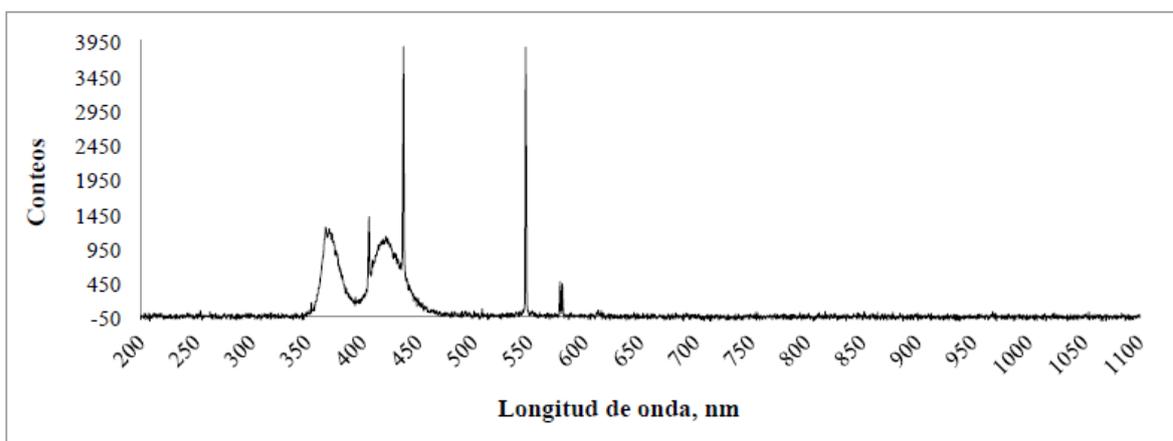


Figura 36. Espectro emitido por las lámparas UV empleadas en la cámara de envejecimiento.

Fuente: Sánchez, 2017.

Sánchez (2017) también verificó el rango de longitudes de onda que el asfalto absorbe, corroborando que la radiación ultravioleta emitida por las lámparas se encuentra cercana a la absorción del asfalto.

El otro elemento importante para la conformación de la cámara de envejecimiento es el horno utilizado, en este caso se implementó un horno rectangular con 0,45 m de profundidad o ancho y 0,69 m de largo, donde las cuatro lámparas utilizadas calzaban de muy buena forma.

La cámara de envejecimiento se conformó con el horno rectangular, cuatro lámparas UV, dos ubicadas sobre los especímenes de MAC y las otras dos debajo de los especímenes de MAC. La razón de utilizar esta configuración y cantidad de lámparas fue aplicar la mayor cantidad de radiación UV posible, para simular de forma acelerada en laboratorio el deterioro sufrido por las MAC a lo largo de su vida de servicio.

Para lograr la configuración descrita anteriormente fue necesario utilizar como soporte/apoyo de los especímenes un vidrio de 9 mm de espesor, capaz de soportar el peso de un lote, pero del menor espesor posible para no influir en la difracción del haz de luz inducido.

Es importante mencionar que durante la presente investigación se consideró que el vidrio no causaba dispersión, refracción o reflexión a la fuente emisora, es decir, que la influencia de estos parámetros ópticos – electromagnéticos no fueron considerados en los cálculos realizados. En la siguiente figura se muestra una fotografía de la configuración de la cámara de envejecimiento utilizada, y a su vez, se puede apreciar el proceso de acondicionamiento aplicado a algunas vigas de fatiga.



Figura 37. Configuración de la cámara de envejecimiento utilizada.

Una parte importante de la presente investigación es determinar acondicionamientos en laboratorio a largo plazo que sean equivalentes al envejecimiento estándar para MAC, en esta ocasión, se busca proponer un acondicionamiento con radiación UV que permita hacer una comparación y/o equivalencia de la cantidad de años que simula el envejecimiento estándar.

Sánchez (2017) determinó una tasa de incidencia crítica para la radiación UV mensual en Costa Rica, llamada "*Radiación UV prom mensual*", que tiene un valor de 1,08 MJ/m². Considerando esta incidencia promedio para la radiación UV, las características geométricas del horno rectangular utilizado, las lámparas UV disponibles y la configuración final de la cámara de envejecimiento, se determinaron distintos tiempos de acondicionamiento en laboratorio a largo plazo. Un ejemplo de los cálculos realizados se muestra a continuación, así como los posibles tiempos de envejecimiento definidos.

Cuadro 7. Condiciones para radiación UV en la cámara de acondicionamiento propuesta.

Potencia de lámparas (W)	Ancho de la cámara (m)	Largo de la cámara (m)	Área de influencia (m ²)	Radiación dentro de la cámara (W/m ²)
80	0,45	0,69	0,31	260

Si se considera la equivalencia o conversión entre Watt (unidad de potencia) y Julio (unidad de trabajo), se tiene que:

$$260W = 260 \frac{J}{s} = 260 \frac{kg * m^2}{s^3}$$

Partiendo del resultado anterior y con base en lo definido por (Sánchez, 2017) en su trabajo final de graduación (TFG), se determina que el tiempo de exposición necesario a 260 W/m², para representar el envejecimiento de la MAC durante un mes promedio es:

$$Radiación\ UV\ (mensual) = \frac{1,08 * 10^6 \frac{J}{m^2}}{260 \frac{J}{m^2 * s}} * \frac{1\ h}{3600\ s} = 1,15\ h$$

Del resultado obtenido anteriormente, se pueden inferir distintos periodos de acondicionamiento aplicados por la configuración de la cámara realizada. En el siguiente cuadro se presentan algunas propuestas a considerar para la elección del periodo final del envejecimiento con radiación UV.

Cuadro 8. Tiempos de exposición en la cámara de envejecimiento para ensayo acelerado

Unidad	Periodo de exposición a 260 W/m ² para simular					
	1 mes	1 año	5 años	10 años	15 años	20 años
Horas (h)	1,15	13,8	69	138	207	276
Días	0,05	0,6	2,9	5,8	8,6	11,5

Considerando que el periodo usual de diseño para un pavimento flexible en Costa Rica varía entre los 15 – 20 años, se eligió este último valor (20 años) como el periodo de exposición a la radiación UV, para aplicar el tercer acondicionamiento en laboratorio a largo plazo de la actual investigación. En la Figura 38 se muestran algunos de los especímenes sometidos a la radiación UV durante 11,5 días.



Figura 38. Especímenes SC en proceso de acondicionamiento.

Es importante mencionar que durante el presente acondicionamiento no se consideró la temperatura como un factor que influya en el proceso, es decir, la influencia de las variaciones térmicas no será considerada durante el proceso de análisis de los resultados obtenidos. Sin embargo, dado que las lámparas inducen calor y a pesar de que se encuentra fuera de los alcances de la presente investigación, se realizó un proceso de monitoreo térmico para los especímenes sometido al envejecimiento con radiación ultravioleta.

El monitoreo se llevó a cabo durante las mañanas y tardes de los periodos de exposición, realizando hasta 5 mediciones diarias de la temperatura dentro de la cámara implementada. Durante estos periodos de monitoreo, la temperatura se mantuvo

relativamente estable entre los 30 °C – 35 °C. En la siguiente fotografía se muestra, a manera de ejemplo, una de las lecturas realizadas durante el proceso de acondicionamiento aplicado.



Figura 39. Monitoreo térmico durante el envejecimiento por radiación UV aplicado.

Es importante mencionar que durante los periodos más fríos (noches y madrugadas) no fue posible realizar mediciones, pues el LanammeUCR no se encuentra abierto a durante ese horario. Sin embargo, hubo días lluviosos y ventosos en los que se midió la temperatura del ensayo, registrando valores dentro del rango mencionado anteriormente.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos para los diferentes procesos de ensayo realizados. Como el primer subcapítulo se presenta un breve análisis de los porcentajes de vacíos para los ejemplares base y los especímenes seleccionados para cada uno de los ensayos ejecutados.

Como un segundo subcapítulo, se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de viga a fatiga en cuatro puntos. Este subcapítulo se divide en dos secciones: la primera, dedicada al análisis de los dos criterios de falla utilizados (50% de rigidez inicial y cantidad de ciclos – Rowe y Bouldin), la segunda, asociada con el análisis de la influencia de los acondicionamientos en laboratorio a largo plazo en las MAC realizadas. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de flexión semicircular, con su respectivo análisis.

Con ayuda del programa "Microsoft Excel" se ejecutaron análisis estadísticos para ambos procedimientos de ensayo, basados en el Análisis de Varianza multifactorial (ANOVA, por sus siglas en inglés). Este análisis multifactorial permite determinar si hay o no diferencias significativas entre los acondicionamientos en laboratorio a largo plazo aplicados.

Como parte del análisis estadístico para un nivel de confianza del 95%, cuando la probabilidad obtenida sea menor a 0,05 hay diferencias significativas en las medias de las muestras analizadas. En caso de obtener probabilidades mayores a 0,05 no habrá diferencias significativas entre las medias de las muestras analizadas.

A continuación, se definen los factores utilizados para los análisis estadísticos aplicados a cada tipo de ensayo:

Cuadro 9. Factores utilizados en los ANOVA realizados para cada ensayo.

Ensayo	Factor
Viga a flexión en cuatro puntos	Tipo de MAC
	Acondicionamiento
	Nivel de deformación
Flexión semicircular	Tipo de MAC
	Acondicionamiento
	Ranura

Posteriormente, se muestra un análisis de los resultados obtenidos para cada una de las mezclas ensayadas bajo distintos envejecimientos, para cada tipo de ensayo ejecutado.

Esto se realiza con el fin de comparar, posteriormente, los desempeños a la fatiga entre los procedimientos de ensayo realizados, a través de un tipo de ranking para las tres mezclas evaluadas.

Luego de los análisis anteriores, se presenta una comparación entre los procesos de ensayo ejecutados, donde se incluyen todos aquellos factores considerados como importantes, con el fin de dar una recomendación de un procedimiento de ensayo que ofrezca resultados confiables y representativos en el menor tiempo posible.

5.1 Análisis general del % de vacíos en los especímenes utilizados

Una variabilidad alta en el porcentaje de vacíos de aire presente en los especímenes de ensayo realizados se puede convertir en un factor que afecte directamente los resultados obtenidos, creando una mayor variabilidad en la vida de fatiga obtenida. Por esta razón, y con el fin de reducir los coeficientes de variación de las pruebas, se han utilizado rangos de vacíos estrictos y de práctica común en el LanammeUCR.

Para el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos, el rango aceptable del porcentaje de vacíos se definió en $4 \pm 1\%$, quiere decir que todos los especímenes finales seleccionados se encuentran con porcentajes de vacíos de aire entre $3\% - 5\%$. Un menor rango de vacíos para el tamaño de estos especímenes es difícil y poco práctico de desarrollar en laboratorio, pues se desperdiciaría mucha MAC.

Para el ensayo de flexión semicircular, el rango aceptable para el porcentaje de vacíos de aire presente en los especímenes finales se definió en $4 \pm 0,5\%$, quiere decir que todos los especímenes elegidos presentan valores de vacíos de aire entre $3,5\% - 4,5\%$. En este caso se puede definir un menor rango de vacíos dado que los especímenes son de menor tamaño y la fluctuación de los especímenes base es menor.

Los ejemplares base, de los cuales se extraen los especímenes finales, no poseen una distribución muy uniforme del porcentaje de vacíos de aire, debido a que en su superficie o fronteras externas los especímenes son más abiertos y suelen presentar mayores porcentajes de vacíos. Considerando lo anterior y con el fin de tener la menor variabilidad posible, las probetas finales son extraídas de la parte central de los especímenes base.

Adicional a esta medida, se realizó un agrupamiento de los ejemplares finales previo a la falla. Este agrupamiento consistió en elegir, como lote de falla, aquel conjunto de especímenes que presentaran los porcentajes de vacíos más semejantes entre sí, quiere

decir que, se seleccionaron especímenes finales provenientes de todos los ejemplares base disponibles, para un mismo grupo de falla.

En los anexos se presentan todas las tablas de los especímenes realizados y seleccionados para la ejecución de cada uno de los ensayos.

Es importante mencionar que el proceso de compactación al 4% de vacíos de aire para los bloques de fatiga es bastante complejo, y que no siempre se logró emular o predecir de buena forma la cantidad de masa o ciclos necesarios para obtener los vacíos de aire deseados. La variabilidad resultante se debe principalmente por el tamaño o volumen del bloque, debido a que los especímenes con mayor porcentaje de vacíos se detectaban en la parte superior del bloque, mientras que en la parte inferior los vacíos de aire presentes quedaban por debajo del rango establecido en muchos casos.

Esta situación obligó a variar en más de una ocasión la altura del bloque, tratando de generar una combinación que arrojara un bloque en el cual sus cuatro vigas fuesen aprovechables. Esta situación no fue posible de alcanzar, en casi todos los casos se perdieron especímenes por estar fuera del rango establecido. Para tratar de solucionar la pérdida de material al compactar bloques con el compactador ASC, se recomienda producir bloques de fatiga con la mitad de la altura, quiere decir, que ofrezcan dos vigas con porcentajes de vacíos más uniformes.

Los especímenes cilíndricos base para el ensayo de flexión semicircular no presentó problemas en el porcentaje de vacíos por el proceso de compactación utilizado. En este caso, la mayoría de los ejemplares base generados suministraba los cuatro especímenes finales dentro del rango de vacíos establecido previamente.

5.2 Ensayo de viga a flexión en cuatro puntos

Como se mencionó anteriormente, el ensayo de viga a fatiga en cuatro puntos es el que se encuentra actualmente normado para el análisis de vida de fatiga de una MAC. Este ensayo considera que la "falla" de una viga se alcanza al 50% del valor de su rigidez inicial, considerando la cantidad de ciclos asociados a esta rigidez final como el valor de resistencia contra la fatiga de una MAC (MOPT, 2010).

Sin embargo, Rowe y Bouldin mencionan que a esta rigidez no se ha alcanzado la falla de la MAC, razón por la que proponen como criterio de falla, para este ensayo, una mayor cantidad de ciclos, específicamente 1,15 veces el valor pico de la curva de modulo

normalizado. Para la presente investigación se ensayaron los especímenes utilizando los dos criterios de falla, y más adelante (sección 5.2.1) se presenta una comparación entre los resultados obtenidos.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la rigidez en función del número de ciclos, a distintos niveles de deformación ($600 \mu S$ y $400 \mu S$), y considerando los tres envejecimientos aplicados. Es importante mencionar que todas las curvas de rigidez en función del número de ciclos presentados a continuación consideran como criterio de falla el 50 % de la rigidez inicial del espécimen.

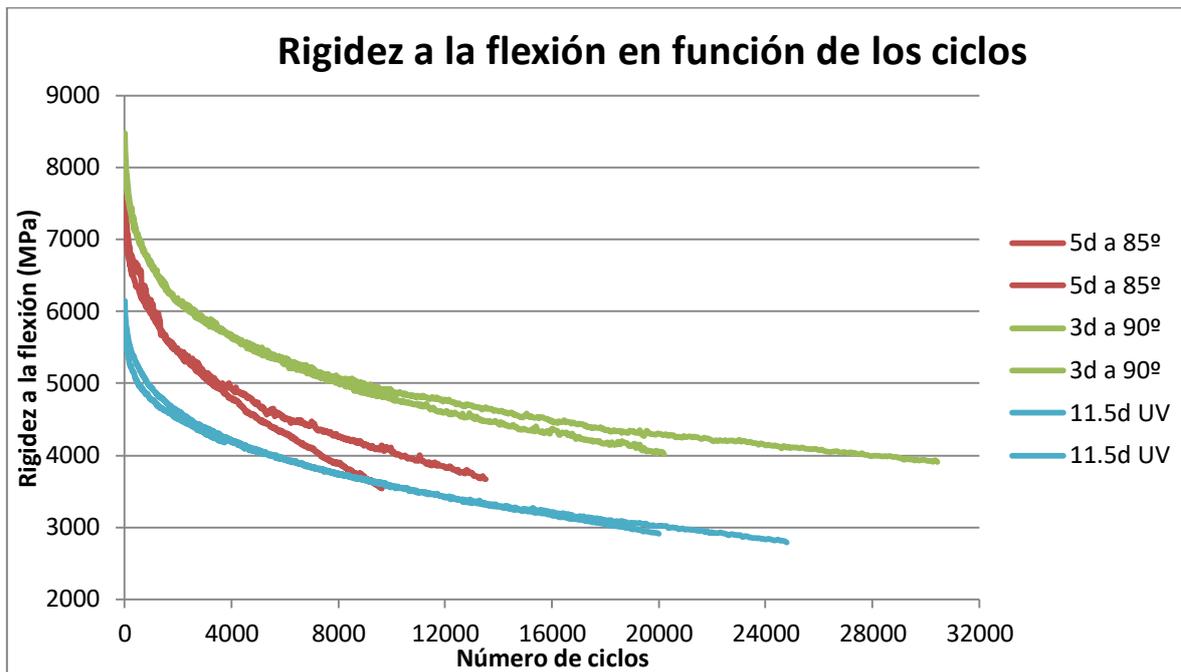


Figura 40. Rigidez en función de los ciclos para MAC de control a $600 \mu S$.

De acuerdo con la figura anterior, los ciclos promedio obtenidos para los acondicionamientos alternativos son bastante superiores a los registrados para el envejecimiento estándar.

Otro aspecto para tomar en cuenta es la variación que presentan los especímenes en la rigidez inicial (hasta 2000 MPa), esto a pesar de que se realizó un proceso de agrupación de especímenes con base en la similitud de sus porcentajes de vacíos finales.

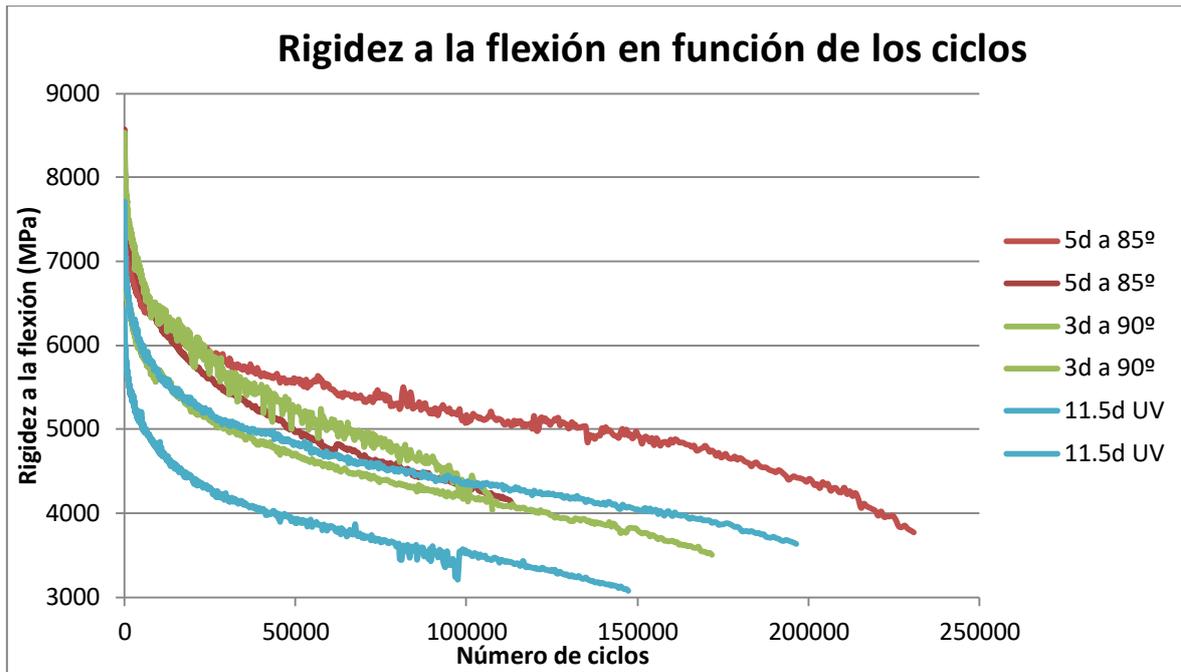


Figura 41. Rigidez en función de los ciclos para MAC de control a 400 μ S.

Al aplicar una deformación menor (400 μ S) y tener una menor variación en la rigidez inicial, la MAC de control presenta tendencias y ciclos más similares en su comportamiento promedio. Siendo el acondicionamiento de 3 días a 90 °C el que, en promedio, simula de mejor manera el envejecimiento estándar (ver Figura 41).

Con base en los resultados mostrados en la Figura 40 y la Figura 41, los acondicionamientos alternativos reflejan un comportamiento y una vida de fatiga muy similares entre sí, sin embargo, se alejan considerablemente de los valores promedio registrados para los especímenes con acondicionamiento estándar.

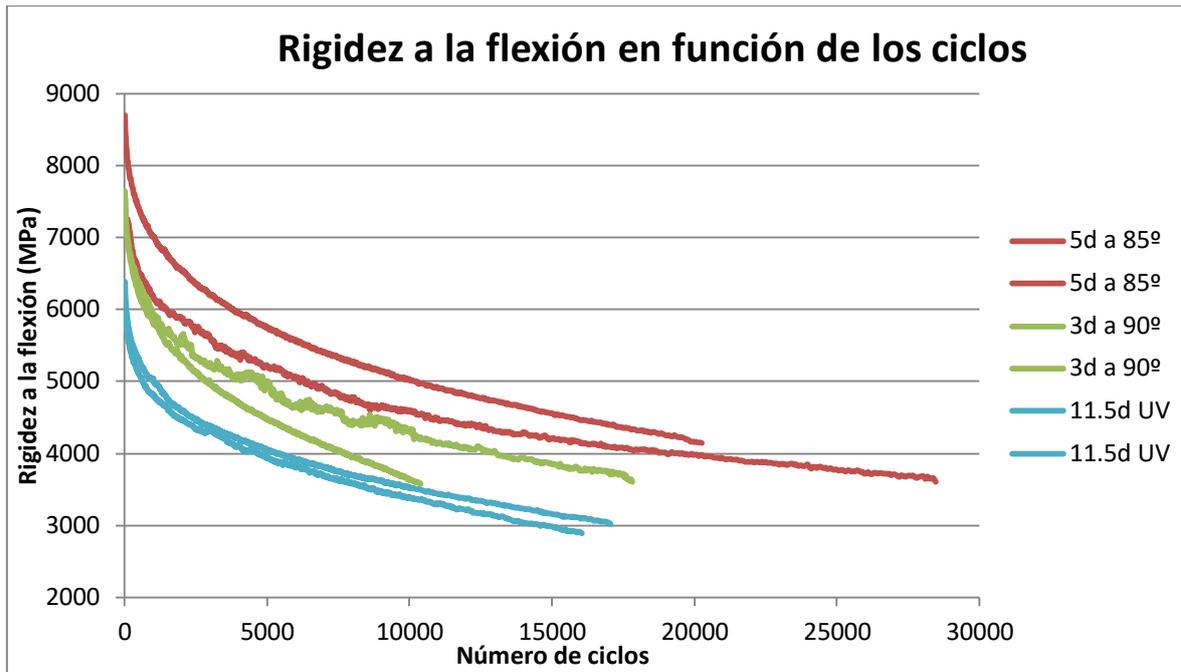


Figura 42. Rigidez en función de los ciclos para MAC con 1% de cal a 600 μ S.

De acuerdo con los resultados mostrados en figura anterior, las tendencias de los envejecimientos aplicados para la MAC con 1 % de cal son similares y presentan una cantidad de ciclos promedio cercanos a los 17 000. Sin embargo, existen algunos especímenes que presentan resultados un poco más dispersos y alejados de los resultados promedio.

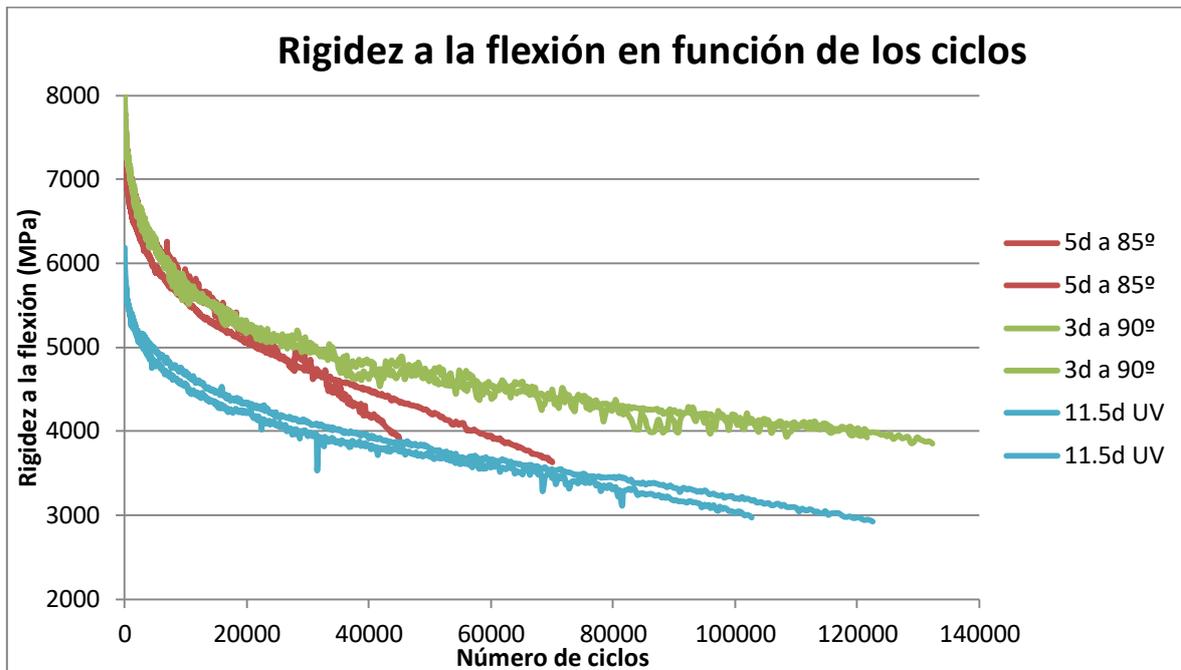


Figura 43. Rigidez en función de los ciclos para MAC con 1% de cal a 400 μ S.

Al comparar los resultados obtenidos en la Figura 43, a una menor deformación de 400 μS , con los resultados obtenidos para la deformación de 600 μS (Figura 42), se puede observar que hay variaciones importantes en los desempeños de las MAC con 1% de cal.

Por ejemplo, el envejecimiento estándar a 600 μS muestra un mayor número de ciclos con respecto a los demás acondicionamientos. Mientras que, para una deformación de 400 μS , los especímenes con un envejecimiento estándar presentan un menor desempeño en comparación con los demás acondicionamientos estudiados.

Dada la variabilidad de los resultados obtenidos para la mezcla con 1% de cal, no se pudo definir cuál de los acondicionamientos emula de mejor forma el proceso de envejecimiento estándar. Aunque, ambos procesos de acondicionamiento alternativo presentan resultados muy semejantes entre sí.

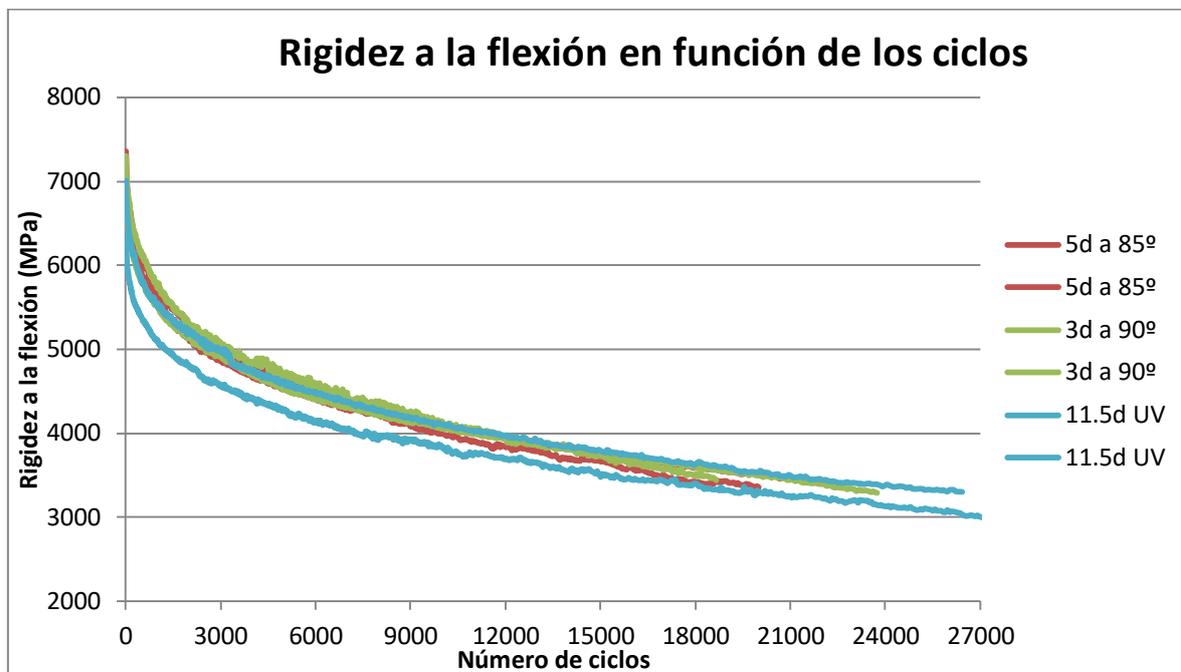


Figura 44. Rigidez en función de los ciclos para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a 600 μS .

Los resultados obtenidos en la Figura 44 muestran una tendencia o comportamiento bastante similar de los especímenes con 1% de cal y 2% de SBS ensayados a una deformación de 600 μS . Los valores promedio de ciclos hasta la falla se encuentran entre los 220 000 – 270 000 ciclos.

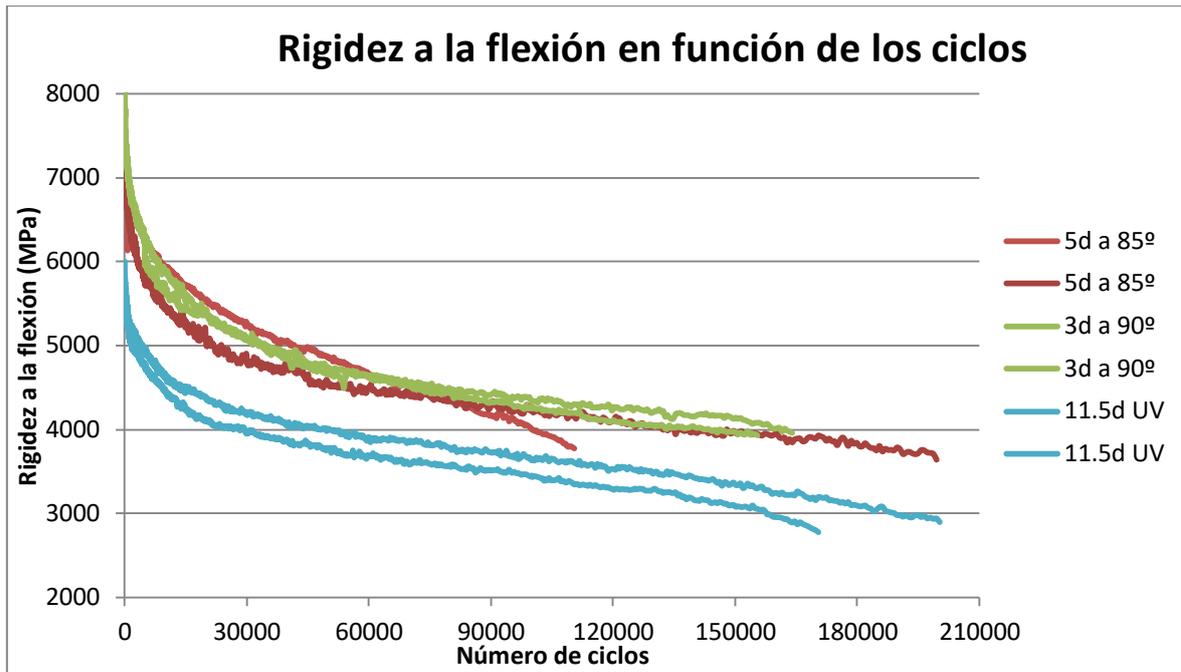


Figura 45. Rigidez en función de los ciclos para MAC con 1% de CAL + 2% de SBS a 400 μ S.

Los resultados obtenidos para los especímenes de MAC con 1% de cal y 2% SBS a 400 μ S reflejan un comportamiento muy similar en la vida de fatiga y la tendencia de las curvas. De hecho, el desplazamiento hacia abajo presentado para las curvas del envejecimiento con radiación UV se debe al desfase en la rigidez inicial de las probetas.

En la Figura 45 se puede observar que los ciclos promedio hasta la falla de los ejemplares se encuentran cercanos a los 170 000 – 180 000.

Si bien los resultados para los envejecimientos aplicados en las MAC con 1% de cal y 2% de SBS son muy similares entre sí, se puede decir que, el acondicionamiento que mejor simula el envejecimiento estándar es el de 3 días a 90 °C. En los siguientes subcapítulos se muestran más resultados y análisis que permiten validar esta conclusión preliminar.

Es importante mencionar que de la Figura 40 a la Figura 45 se muestran los resultados obtenidos para el criterio de falla actual, el 50% de la rigidez inicial, sin embargo, los especímenes se llevaron "a la falla" de acuerdo con el criterio de ciclos propuesto por Rowe y Bouldin. Los resultados obtenidos para ambos criterios se presentan en la siguiente sección.

El Cuadro 10 muestra un resumen de varios parámetros de medición registrados durante los ensayos realizados, con el fin de establecer una clasificación del comportamiento de las mezclas analizadas.

Cuadro 10. Comparaciones de vida de fatiga o número de ciclos promedio a la falla.

Tipo de mezcla	Tipo de acondicionamiento	Deformación unitaria aplicada			
		400 μ strain		600 μ strain	
		Ciclos Promedio a la falla	C.V. (%)	Ciclos Promedio a la falla	C.V. (%)
CT	5 días a 85 °C	171 955	48,4	11 575	23,8
	3 días a 90 °C	139 670	32,5	25 315	28,6
	11,5 días con UV	171 910	20,2	22 395	15,1
CAL	5 días a 85 °C	57 540	30,8	24 365	23,8
	3 días a 90 °C	126 970	6,0	14 105	37,2
	11,5 días con UV	112 635	12,4	16 555	4,3
SBS	5 días a 85 °C	155 005	40,6	20 335	2,3
	3 días a 90 °C	159 760	3,8	21 200	16,9
	11,5 días con UV	185 380	11,4	26 775	1,8

De acuerdo con los resultados presentados en el cuadro anterior, en términos generales y para ambos niveles de deformación aplicados (400 y 600 μ strain), la mezcla modificada con 1% de cal + 2% de SBS (representada con el nombre SBS) presenta un mejor desempeño contra la fatiga que la mezcla modificada de control (CT). Además, al comparar los desempeños ofrecidos por la mezcla SBS con los desempeños obtenidos para la mezcla modificada con 1% de cal (CAL), en términos generales, la mezcla SBS ofrece un mejor desempeño a la fatiga.

Con base en los resultados y el análisis anterior, y con el fin de realizar más adelante una comparación cualitativa entre los desempeños obtenidos con cada procedimiento de ensayo aplicado según el tipo de mezcla ensayada, se presenta a continuación la clasificación final de las mezclas de acuerdo con el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos (AASHTO T321):

- 1) Mezcla modificada con 1% de cal + 2% de SBS (SBS).
- 2) Mezcla de control (CT).
- 3) Mezcla modificada con 1% de cal (CAL).

Es decir, en términos generales la mezcla SBS es la que presenta mejor desempeño al ser sometida al ensayo de viga a flexión en cuatro puntos. La mezcla CT presenta el segundo mejor desempeño, mientras que la mezcla CAL en términos generales es la que presenta el peor desempeño a la fatiga.

5.2.1 Comparación de resultados para criterios de falla contemplados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las comparaciones de los criterios de falla, por cada tipo de mezcla ensayada (CT, CAL y SBS) y para cada nivel de deformación considerado (400 μ S y 600 μ S). Cada resultado obtenido presenta su barra de error con un valor del 5%, como límites superiores e inferiores del valor reportado.

Mezcla de control (CT)

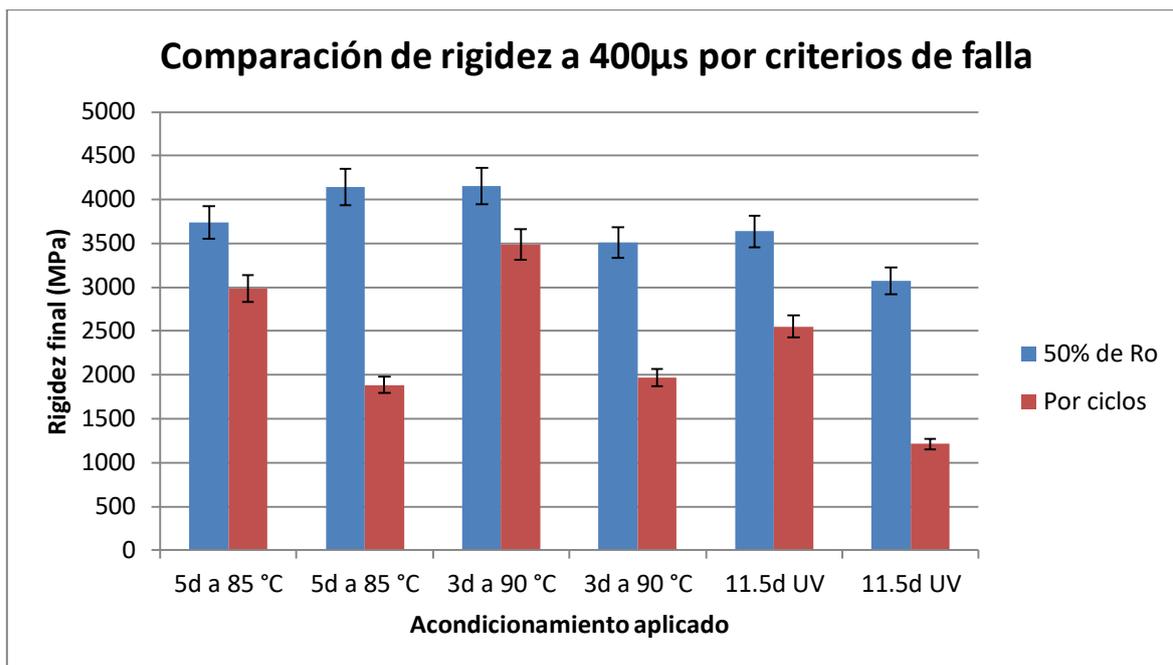


Figura 46. Rigideces para MAC de control a 400 μ S según los criterios de falla.

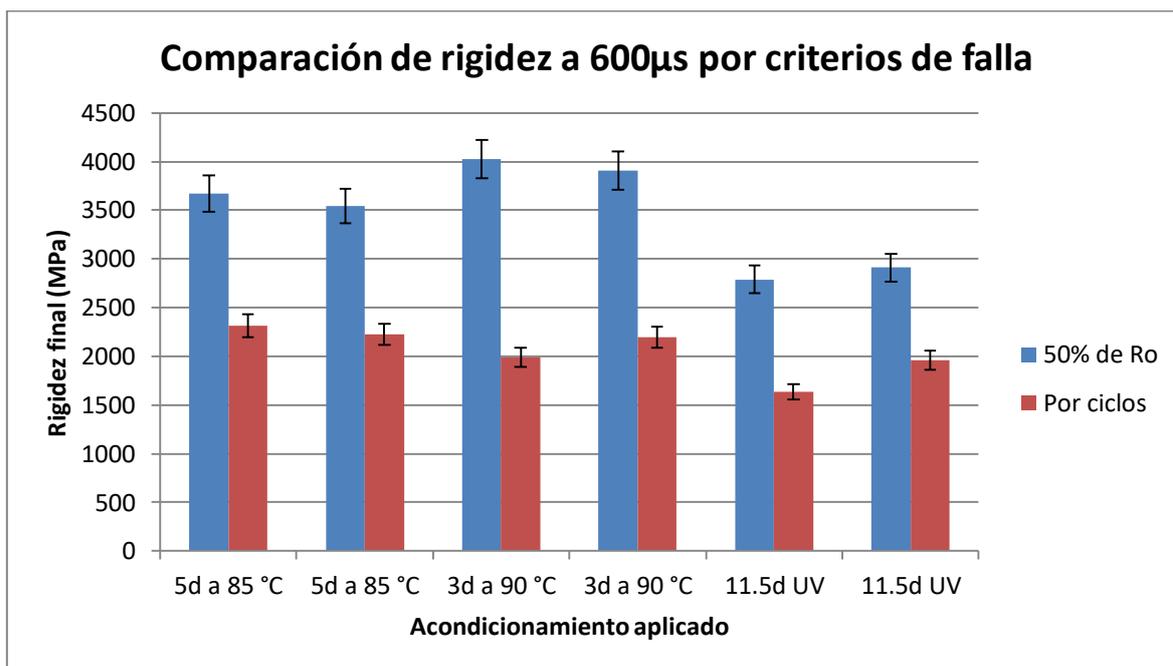


Figura 47. Rigideces para MAC de control a 600 μ S según los criterios de falla.

Al comparar la rigidez final obtenida para ambos niveles de deformación unitaria aplicada, considerando el mismo acondicionamiento, se observa que los resultados son bastante similares según el criterio de falla ejecutado. Es decir, si se comparan las rigideces finales obtenidas con cada criterio de falla para el acondicionamiento de 5 días a 85 °C a una deformación de 400 μ S, con las obtenidas para el mismo acondicionamiento a una deformación de 600 μ S, se observan que los valores son muy similares entre sí. Además, del análisis anterior se desprende que el nivel de deformación aplicado no tiene una afeción directa sobre la rigidez final de los especímenes.

En cuanto a la variabilidad de los resultados obtenidos en la rigidez final de la MAC CT, para el criterio de Rowe y Bouldin los C.V. varían entre 12% – 35% según el nivel de deformación aplicado, mientras que para el criterio estándar la variabilidad en la rigidez final se encuentra entre 11% – 15%.

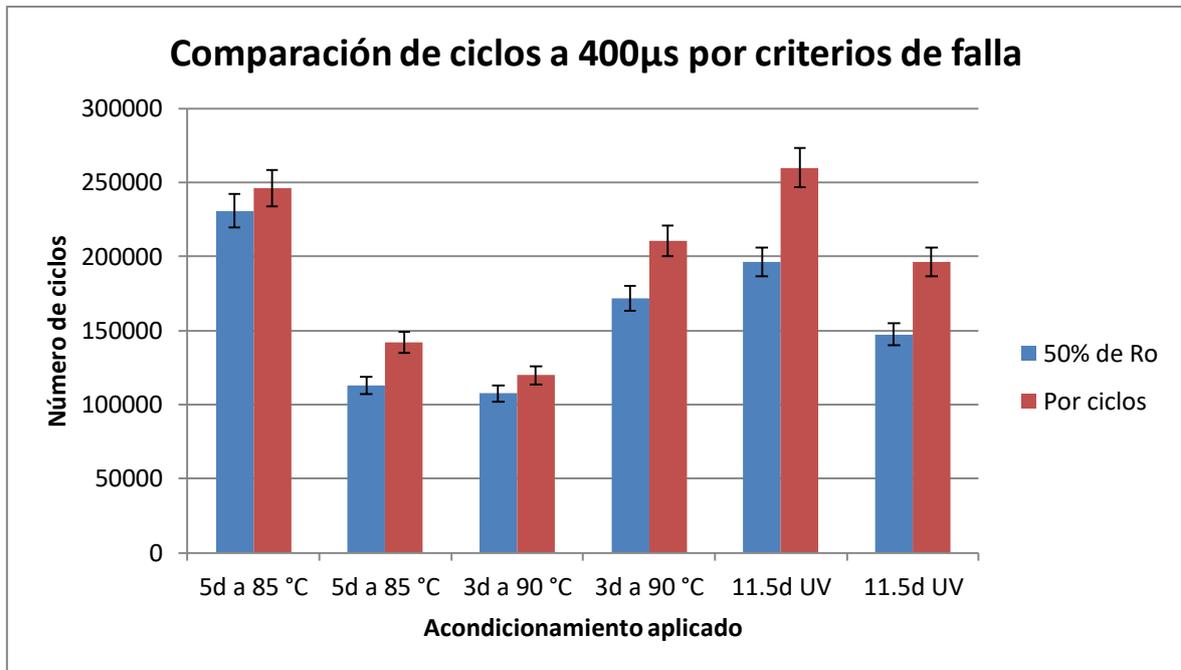


Figura 48. Ciclos para MAC de control a 400 μ S según los criterios de falla.

Para un nivel de deformación de 400 μ S la mezcla de control presenta variaciones de entre 6,5% – 33% en el número de ciclos según el criterio de falla utilizado. Es decir, el método de Rowe y Bouldin (por ciclos) propone que la falla por fatiga en esta mezcla de control a 400 μ S de deformación unitaria aplicada se da al alcanzar entre un 6,5% – 33% más de los ciclos definidos por el método normado actualmente (50% de la rigidez inicial).

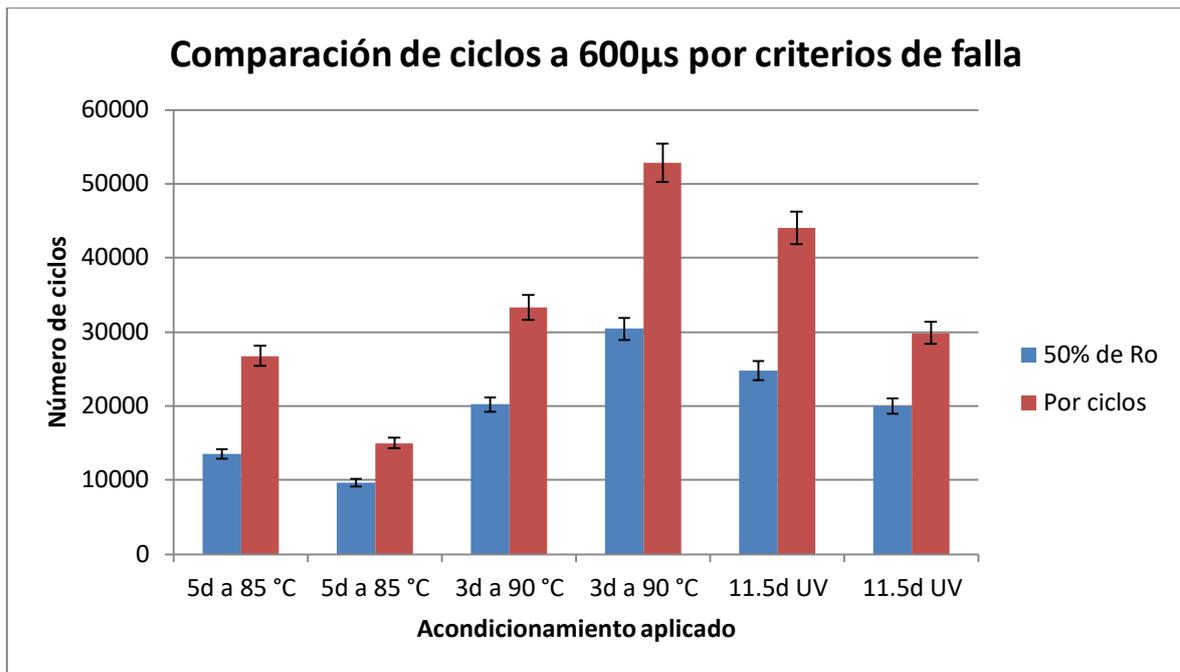


Figura 49. Ciclos para MAC de control a 600 μ S según los criterios de falla.

En la figura anterior se puede observar que para la misma mezcla pero a un nivel de deformación de 600 μ S, el criterio de Rowe y Bouldin sugiere que la falla por fatiga se da cuando se alcanza entre 50% – 98% más de ciclos que los establecidos por el actual criterio de falla (50% de Ro).

De acuerdo con los resultados mostrados en las figuras anteriores, se puede decir preliminarmente que el método de Rowe y Bouldin presenta mayores variaciones porcentuales conforme se aumenta el nivel de deformación unitaria aplicada.

En cuanto a la variabilidad de los resultados obtenidos para la vida de fatiga, para el criterio de Rowe y Bouldin los C.V. se encuentran entre el 28% – 40%, mientras que para el criterio estándar la variabilidad en el número de ciclos se encuentra entre el 30% – 38%. Es decir, las variaciones en los resultados obtenidos para la MAC de control con ambos criterios de falla son muy similares entre sí.

Mezcla modificada con 1% de cal (CAL)

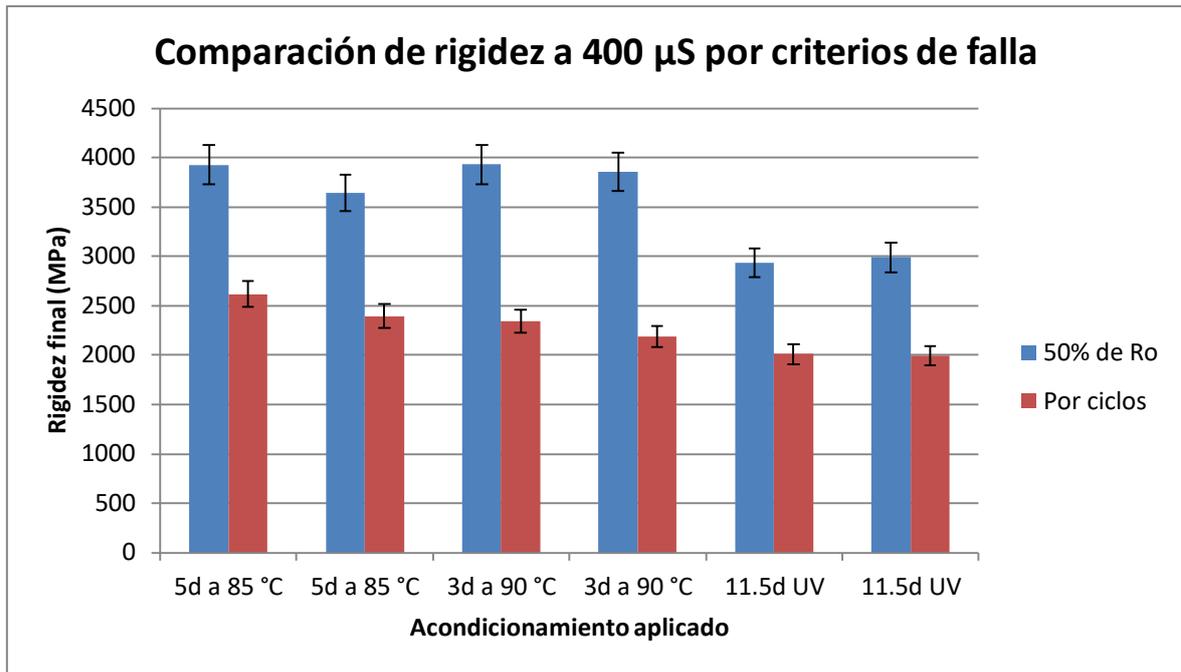


Figura 50. Rigideces para MAC con 1% de cal a 400 μ S según los criterios de falla.

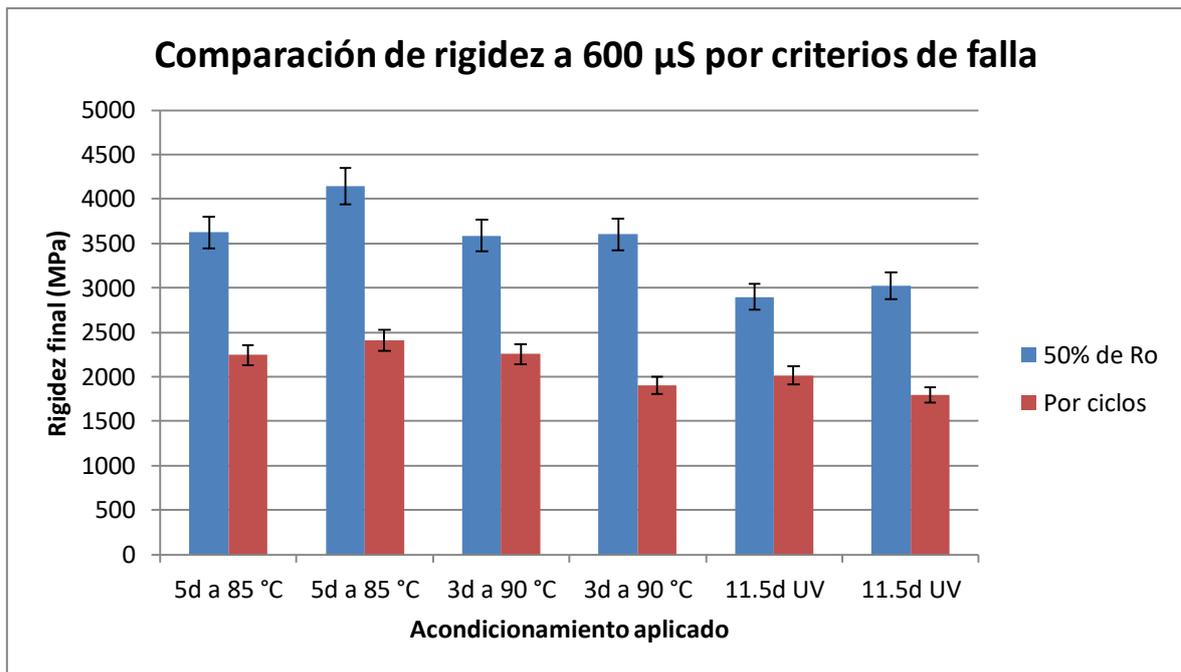


Figura 51. Rigideces para MAC con 1% de cal a 600 μ S según los criterios de falla.

Tanto para la Figura 50 como para la Figura 51 se observa que los valores de rigidez final obtenidos tienden a ser muy similares sin importar el acondicionamiento o nivel de deformación aplicado.

En cuanto a la variabilidad de los resultados obtenidos en la rigidez final de la MAC CAL, para el criterio de Rowe y Bouldin los C.V. son de aproximadamente el 11%, independientemente del nivel de deformación aplicado, mientras que para el criterio estándar la variabilidad en la rigidez final es de aproximadamente el 13%, para ambos niveles de deformación unitaria.

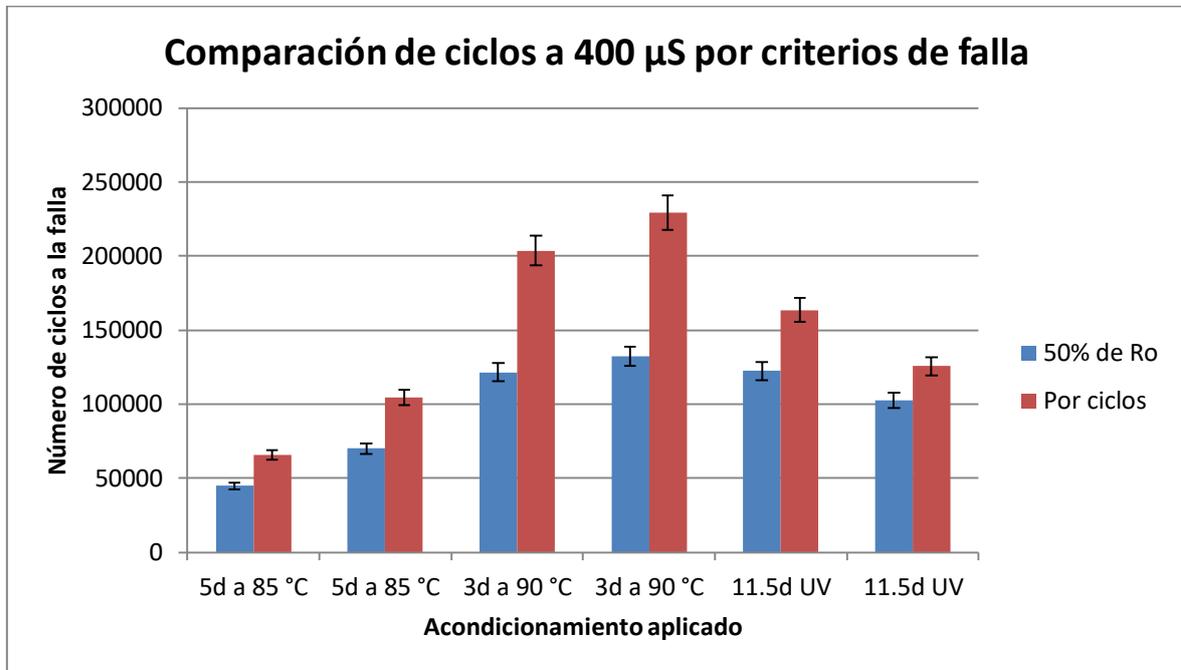


Figura 52. Ciclos para MAC con 1% de cal a 400 μS según los criterios de falla.

De acuerdo con los resultados observados en la Figura 52, que corresponden a un nivel bajo de deformación unitaria aplicada, el criterio de Rowe y Bouldin sugiere que la falla por fatiga en la MAC CAL se da cuando se alcanza entre un 22% – 73% de ciclos adicionales a los sugeridos por el criterio del 50% de la rigidez inicial.

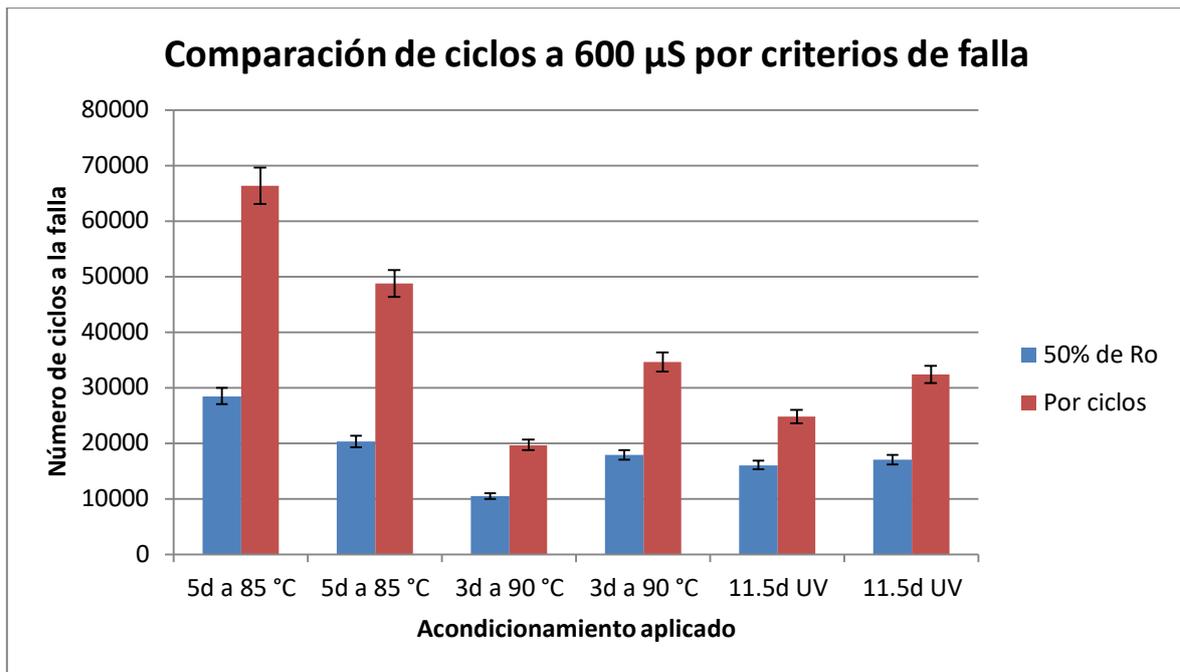


Figura 53. Ciclos para MAC con 1% de cal a 600 μS según los criterios de falla.

La Figura 53 muestra los resultados obtenidos al comparar ambos criterios de falla para un mayor nivel de deformación unitaria aplicada. En este caso se puede observar que el criterio de Rowe y Bouldin sugiere una cantidad de ciclos a la falla que en algunos casos excede en más del 100% la cantidad de ciclos a la falla sugeridos por el criterio reconocido actualmente. Es decir, para la MAC CAL el criterio por ciclos propone ensayar especímenes hasta ir más allá del doble de los ciclos establecidos por la normativa vigente.

Con respecto a la variabilidad de los resultados obtenidos en la vida de fatiga, para el criterio de Rowe y Bouldin los C.V. se encuentran entre el 42% – 45%, mientras que para el criterio estándar la variabilidad en el número de ciclos (C.V.) se encuentra entre el 32% – 35%. Es decir, las variaciones en los resultados obtenidos para la MAC modificada con 1% de cal son similares entre sí para ambos criterios de falla, solo un poco más elevadas para el criterio de Rowe y Bouldin.

Mezcla modificada con 1% de cal + 2% de SBS (SBS)

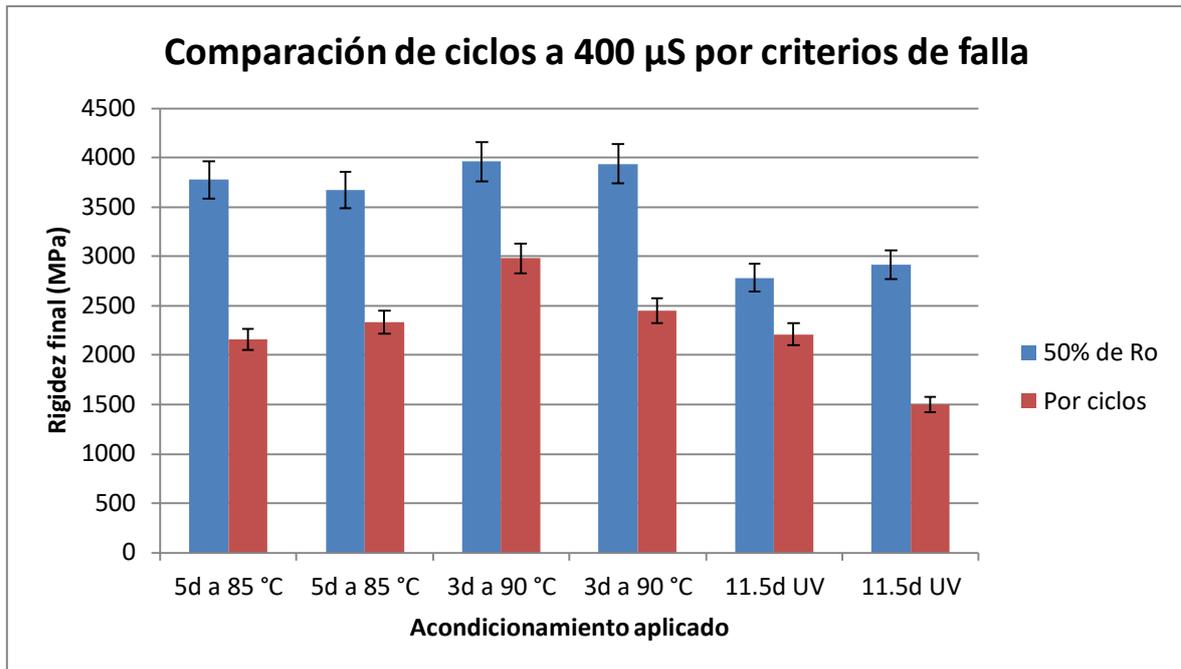


Figura 54. Rigideces para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a 400 μ S según los criterios de falla.

En la figura anterior se puede observar que las variaciones en la rigidez final en función del acondicionamiento aplicado y según el criterio de falla considerado son muy bajas, es decir, los valores promedio son similares entre sí para cada criterio de falla ensayado.

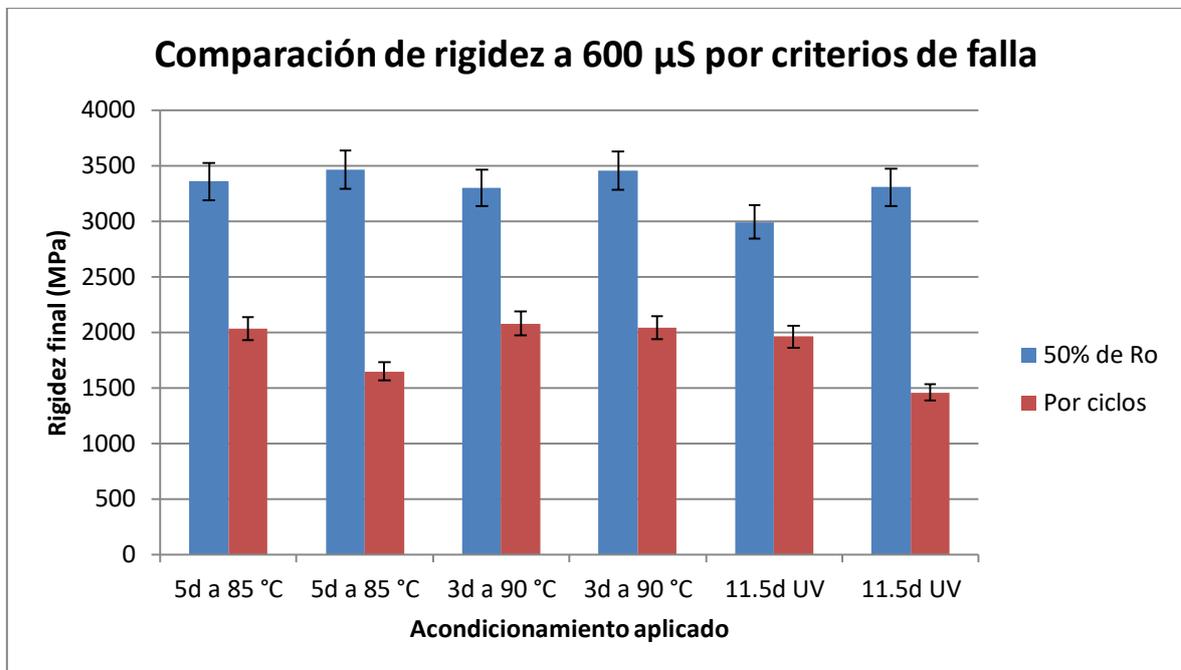


Figura 55. Rigideces para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a 600 μ S según los criterios de falla.

La Figura 55 muestra que los valores de rigidez final obtenidos para cada espécimen de MAC SBS sometido a una deformación unitaria de $600 \mu\text{S}$ son muy similares entre sí según cada criterio de falla considerado. Además, al comparar estos valores con los mostrados en la Figura 54 se puede notar que las rigideces finales de los especímenes son muy similares entre sí, sin importar el acondicionamiento aplicado.

Considerando la variabilidad de los resultados obtenidos en la rigidez final de la MAC SBS, para el criterio de Rowe y Bouldin los C.V. están entre el 14% – 21%, según el nivel de deformación aplicado, mientras que para el criterio estándar la variabilidad en la rigidez final se encuentra entre el 5% – 15%, para ambos niveles de deformación unitaria.

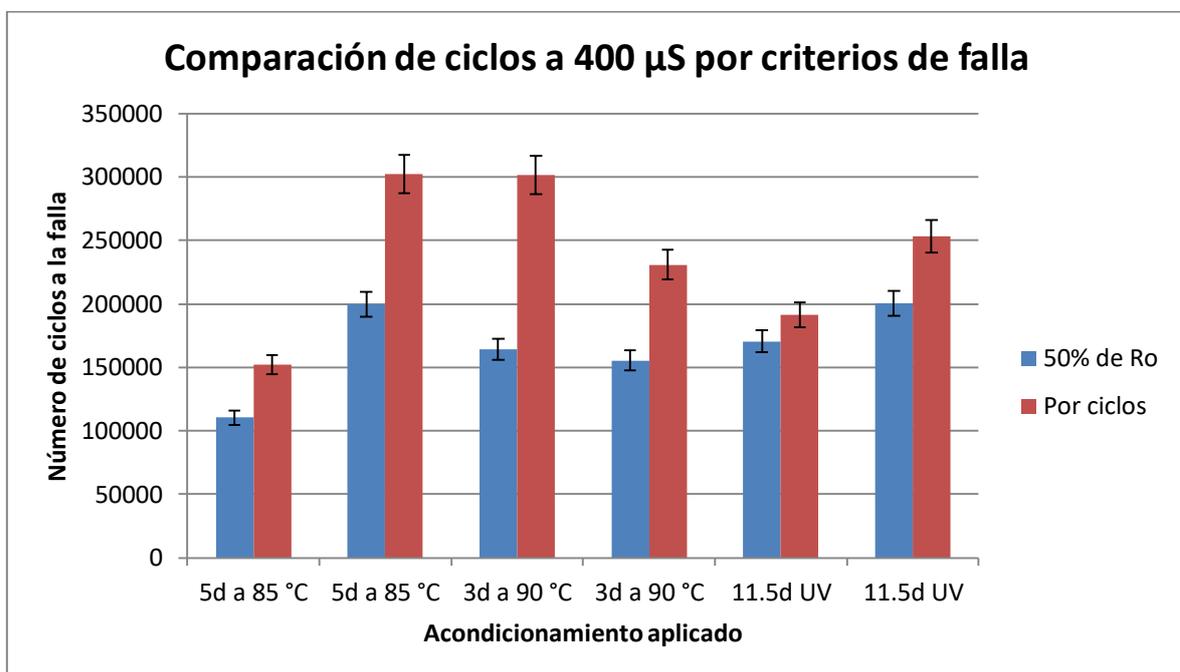


Figura 56. Ciclos para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a $400 \mu\text{S}$ según los criterios de falla.

De acuerdo con los resultados observados en la Figura 56, para una deformación unitaria aplicada de $400 \mu\text{S}$, el criterio de Rowe y Bouldin sugiere que la falla por fatiga en la MAC SBS se da cuando se alcanza entre un 12% – 84% de ciclos adicionales a los sugeridos por el criterio del 50% de la rigidez inicial.

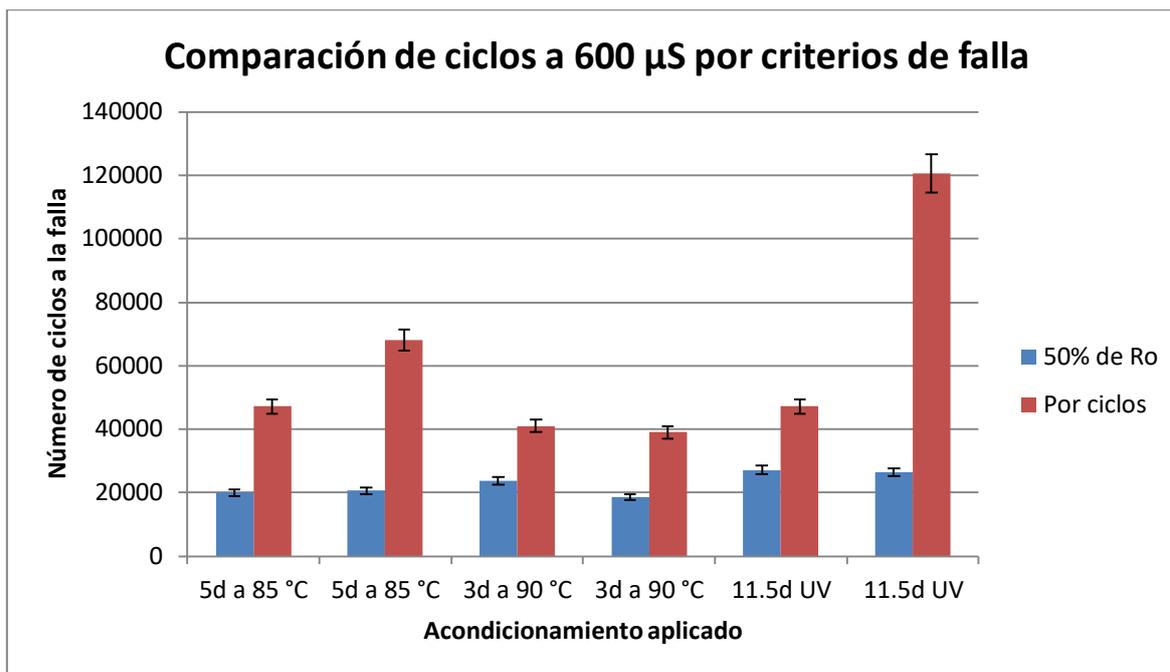


Figura 57. Ciclos para MAC con 1% de cal + 2% de SBS a 600 μ S según los criterios de falla.

La Figura 57 muestra los resultados obtenidos al comparar ambos criterios de falla para un mayor nivel de deformación unitaria aplicada (600 μ S). En este caso se puede observar que el criterio de Rowe y Bouldin sugiere una cantidad de ciclos a la falla que en algunos casos excede en más del 100% la cantidad de ciclos a la falla sugeridos por el criterio normado actualmente (50% de R_o). Es decir, para la MAC SBS el criterio por ciclos propone ensayar especímenes hasta llegar más allá del doble de los ciclos establecidos por la normativa vigente.

Es importante mencionar que el último espécimen ensayado, y que se presenta como el espécimen 2 del acondicionamiento durante 11,5 días bajo radiación ultravioleta, se considera como un valor fuera de rango. Lo anterior debido a que se desconocen las razones por las que su vida de fatiga arrojó una cantidad de ciclos tan alta en comparación con todos los otros especímenes.

En general se puede decir que el criterio de Rowe y Bouldin presenta mayor susceptibilidad o variabilidad conforme se aumenta el nivel de deformación unitaria aplicada. Además, para una misma mezcla y bajo el mismo acondicionamiento aplicado se pueden registrar variaciones mayores al 100% en la cantidad de ciclos a la falla, respecto al criterio de falla que se utiliza actualmente (50% de la rigidez inicial).

Con respecto a la variabilidad de los resultados obtenidos en la vida de fatiga (número de ciclos a la falla), para el criterio de Rowe y Bouldin los C.V. se encuentran entre el 24% –

25%, mientras que para el criterio estándar la variabilidad (C.V.) en el número de ciclos a la falla se encuentra entre el 16% – 20%. Es decir, las variaciones en los resultados obtenidos para la MAC SBS son muy similares entre sí para ambos criterios de falla.

De acuerdo con Pérez y otros (2009) la falla por fatiga en MAC se presenta más allá del 50% establecido según la normativa AASHTO T321. Abojaradeh (2013) estableció que la falla por fatiga en las MAC más flexibles se da cuando la rigidez inicial se reduce hasta un 65%. En el siguiente cuadro se presenta un resumen de los resultados obtenidos utilizando el criterio de Rowe & Bouldin.

Cuadro 11. Rigidez final promedio utilizando criterio de falla de Rowe & Bouldin.

Tipo de MAC	Nivel de deformación (μs)	Rigidez inicial (MPa)	Rigidez final criterio de R&B (MPa)	Rigidez final con R&B (%)
CT	400	7 424	2 350	68,3
	600	6 948	2 053	70,5
CAL	400	7 094	2 258	68,2
	600	6 958	2 105	69,8
SBS	400	7 014	2 273	67,6
	600	6 624	1 869	71,8

De acuerdo con los resultados mostrados en el cuadro anterior, se puede decir que las rigideces finales promedio a las cuales se obtiene la falla para cada tipo de MAC analizada son similares entre sí, y muy cercanas a los valores establecidos por Abojaradeh (2013).

Además, de acuerdo con los resultados de las rigideces finales obtenidas y mostradas anteriormente (ver de Figura 46 a Figura 55), se puede decir de forma preliminar que los distintos envejecimientos aplicados no presentan diferencias significativas en los resultados del desempeño para los especímenes investigados. Sin embargo, para validar esta hipótesis es necesario efectuar un análisis de varianzas multifactorial (ANOVA de tres factores) que considere los resultados obtenidos para cada espécimen según el tipo de mezcla analizada, el acondicionamiento realizado y el nivel de deformación aplicado.

5.2.2 Análisis estadístico multifactorial para ensayo de vigas a flexión en cuatro puntos

Más adelante se muestra un cuadro con el resumen del análisis de varianza (ANOVA) para el procedimiento de ensayo de viga a flexión en cuatro puntos. El diseño o modelo estructural de análisis se define de la siguiente forma:

Se han considerado tres factores o variables independientes: A - Tipo de mezcla, B - Tipo de acondicionamiento realizado y C - Nivel de deformación aplicado, cada uno de los factores está integrado por diferentes niveles y cada nivel contiene dos especímenes ensayados. Además, el modelo incluye como variable respuesta el número de ciclos o vida de fatiga de los especímenes.

El factor tipo de mezcla posee tres niveles distintos: mezcla de control (CT), mezcla modificada con 1% de cal (CAL) y mezcla modificada con 1% de cal + 2% de SBS (SBS). El factor tipo de acondicionamiento realizado está integrado por otros tres niveles: acondicionamiento durante 5 días a 85 °C o estándar (Std), acondicionamiento durante 3 días a 90 °C (T) y acondicionamiento durante 11,5 días con radiación ultravioleta (UV). Mientras que el factor de nivel de deformación aplicado está integrado por dos niveles: 400 μ S de deformación unitaria y 600 μ S de deformación unitaria.

El ANOVA de tres factores se ha desarrollado utilizando un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$). A continuación, se presenta un cuadro con el resumen del análisis de varianzas realizado. En el apéndice se incluye el detalle del procedimiento ejecutado.

Cuadro 12. ANOVA de tres factores para viga a flexión en cuatro puntos.

Factor	g.l.	Valor - p	Conclusión
Tipo de Mezcla (A)	2	0,0141	Hay diferencias significativas entre los tipos de mezcla
Tipo de Acondicionamiento (B)	2	0.4323	NO hay diferencias significativas entre los acondicionamientos
Nivel de Deformación (C)	2	0,0000	Hay diferencias significativas entre los niveles de deformación

Con base en los resultados mostrados en el Cuadro 12, se puede concluir con un nivel de confianza del 95% que NO hay diferencias significativas entre los resultados de desempeño obtenidos a partir de los distintos procedimientos de acondicionamiento aplicados para cada tipo de mezcla (valor – p = 0,43 > 0,05).

Esto quiere decir que, los tres envejecimientos a largo plazo en laboratorio aplicados para los ensayos de viga a flexión en cuatro puntos ejecutados son equivalentes entre sí, pues generan el mismo efecto de envejecimiento en las mezclas y arrojan resultados muy similares.

También, el Cuadro 12 muestra que los tipos de mezcla (A) y los niveles de deformación unitaria aplicados (C) presentan diferencias significativas en sus resultados. Esto era de esperar, primero porque se están comparando una mezcla de control con dos mezclas modificadas con distintos aditivos, y segundo porque se comparan vidas de fatiga obtenidas para un nivel de deformación bajo y para un nivel de deformación alto (50% mayor).

5.3 Ensayo de flexión semicircular

Este procedimiento de ensayo se propone como alternativa para reducir los tiempos en la obtención de los resultados, para la toma de decisiones oportunas durante el control de calidad de mezclas asfálticas en caliente.

Se trata de un procedimiento en el cual se le aplica una carga incremental, a una deformación constante de 0,5 mm/min, a un espécimen semicircular con una ranura al centro de la media luna. Durante este proceso se registra, entre otras cosas, la carga máxima (pico) de fractura y la deformación asociada, con base en estos resultados se puede obtener la energía de deformación a la falla y a través de una regresión lineal, calcular la tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral (J_c).

Es importante mencionar que para lograr calcular la J_c , se puede generar un modelo de regresión lineal que utiliza como datos de entrada: la energía de deformación y la profundidad de la ranura. Por lo tanto, se deben graficar todos los resultados obtenidos para los especímenes semicirculares de cada una de las MAC realizadas, para así obtener la pendiente o tasa de cambio de la regresión, que, al dividir entre el espesor promedio de los especímenes, se obtiene la tasa de alivio de la energía de deformación crítica.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los especímenes elaborados con la mezcla de control y sometidos a los acondicionamientos a largo plazo en laboratorio propuestos en la presente investigación.

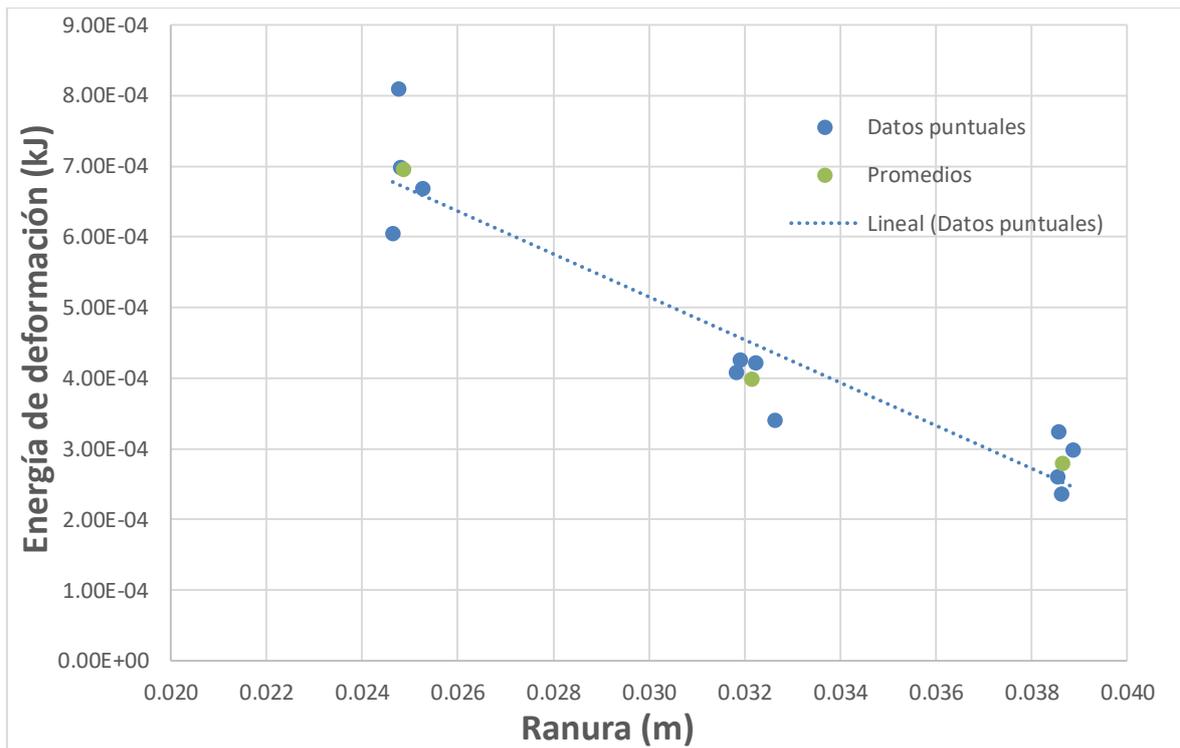


Figura 58. Energía de deformación en función de la ranura para MAC de CT, 5 días a 85 °C.

En la figura anterior se pueden observar los resultados obtenidos para cada grupo de especímenes de MAC de control ensayados según la profundidad de su ranura, y envejecidos bajo el acondicionamiento estándar.

De acuerdo con el modelo de ajuste elaborado, la ecuación que relaciona la energía de deformación a la falla (U) con la profundidad de la ranura (a) viene dada por:

$$U = -0,0304 * a + 0,0014 \quad \text{Ecuación 9}$$

Este modelo presenta un coeficiente de determinación elevado, $R^2 = 0,885$. Quiere decir que, el 88,5% de la varianza total de la energía de deformación a la falla es explicada por este modelo de regresión. Por lo tanto, el ajuste se considera bueno y confiable.

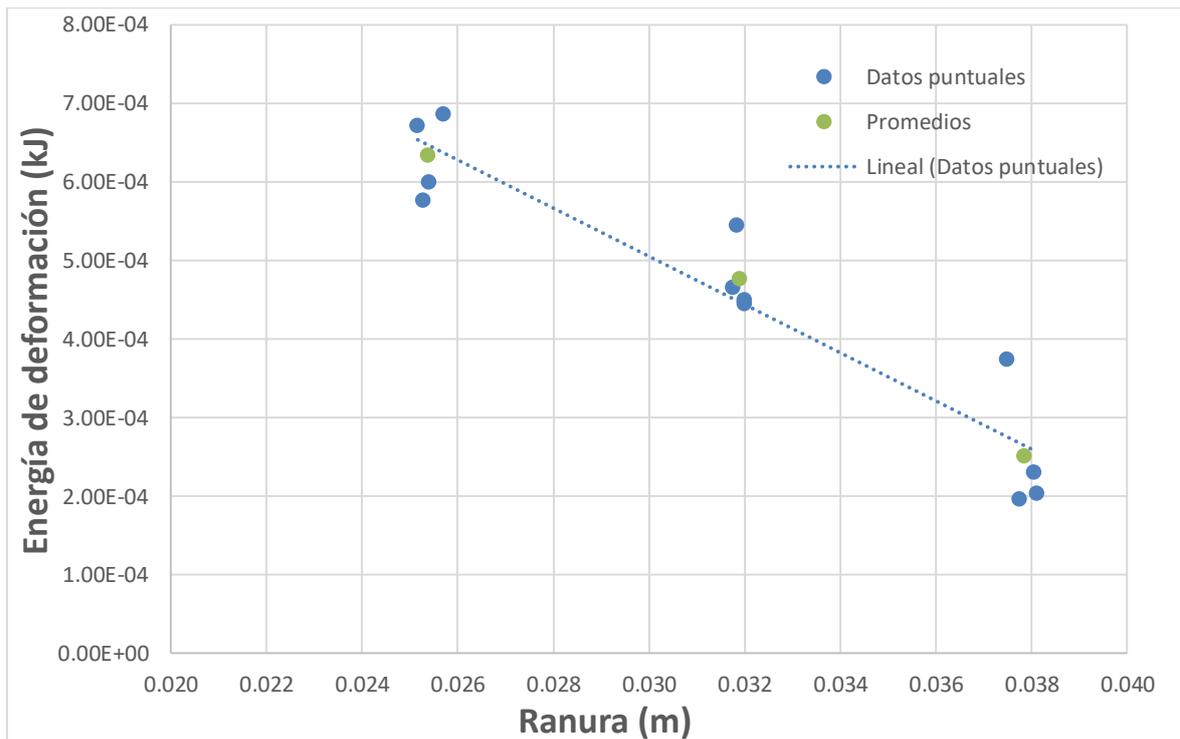


Figura 59. Energía de deformación en función de la ranura para MAC de CT, 3 días a 90 °C.

En la Figura 59 se muestran los resultados obtenidos para cada grupo de especímenes de MAC de control ensayados según la profundidad de su ranura, y envejecidos durante 3 días a 90 °C.

Con base en la regresión lineal presentada en la Figura 59, en la ecuación 9 se muestra el modelo numérico que correlaciona la energía de deformación a la falla (U) con la profundidad de la ranura (a), dada por la expresión:

$$U = -0,0307 * a + 0,0014 \quad \text{Ecuación 10}$$

Este modelo presenta un coeficiente de determinación elevado, $R^2 = 0,885$. Quiere decir que, el 88,5% de la varianza total de la energía de deformación a la falla es explicada por este modelo de regresión. Por lo tanto, se considera que el ajuste es bueno y confiable.

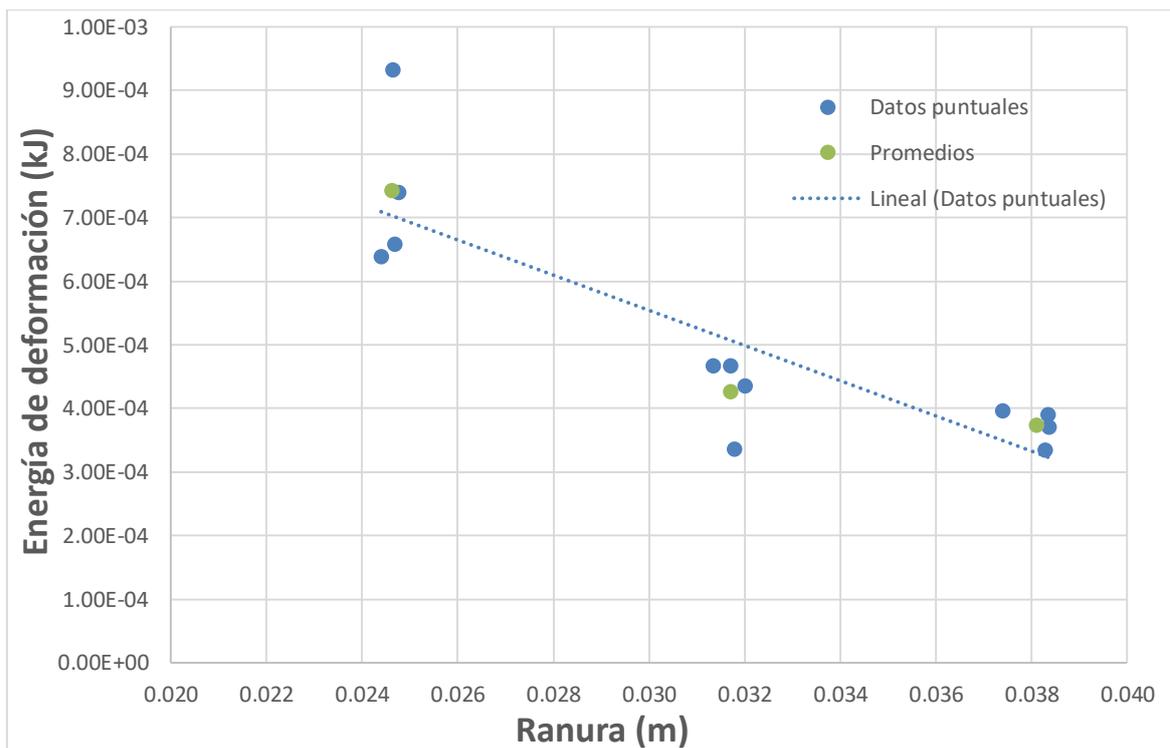


Figura 60. Energía de deformación en función de la ranura para MAC de CT, 11,5 días UV.

En la figura anterior se ilustran los resultados obtenidos para cada grupo de especímenes de MAC de control ensayados según la profundidad de su ranura, y envejecidos durante 11,5 días con radiación UV.

De acuerdo con el modelo de ajuste elaborado, la ecuación que mejor ajusta la energía de deformación a la falla (U) en función de la profundidad de la ranura (a) es la siguiente.

$$U = -0,0277 * a + 0,0014 \quad \text{Ecuación 11}$$

Este modelo presenta un coeficiente de determinación relativamente bajo, $R^2 = 0,725$. Es decir, apenas el 72,5% de la varianza total de la energía de deformación a la falla es explicada por el modelo de regresión propuesto. Este valor relativamente bajo se debe a que uno de los ensayos con ranura de 24 mm de profundidad, presentó un valor de energía de deformación hasta 35% mayor que el promedio de los restantes ensayos.

En el siguiente cuadro se presenta, a manera de resumen, una comparación de los principales parámetros de medición obtenidos de los ensayos a flexión semicircular. Es importante mencionar que también se presenta la tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral (J_c), calculada a partir de los modelos de ajuste presentados en las ecuaciones anteriores.

Cuadro 13. Comparación de energía de fractura promedio para la MAC de control.

Mezcla	Envejecimiento aplicado	Ranura nominal (m)	U (kJ)	Desv. Est. (kJ)	C.V. (%)	Jc (kJ/m ²)
CT	5 días a 85 °C	0,025	$7,0 \times 10^{-4}$	$8,6 \times 10^{-5}$	12,3	0,528
		0,032	$4,0 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-5}$	10,1	
		0,038	$2,8 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-5}$	14,1	
	3 días a 90 °C	0,025	$6,3 \times 10^{-4}$	$5,4 \times 10^{-5}$	8,5	0,533
		0,032	$4,8 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-5}$	9,8	
		0,038	$2,5 \times 10^{-4}$	$8,3 \times 10^{-5}$	33,2	
	11,5 días con UV	0,025	$7,4 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$	18,1	0,482
		0,032	$4,2 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-5}$	14,6	
		0,038	$3,7 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-5}$	7,6	

Con base en los resultados presentados en el Cuadro 13, los valores de Jc para el envejecimiento estándar y el acondicionamiento de 3 días a 90 °C son prácticamente iguales (variabilidad inferior al 1%). Mientras que al comparar la Jc del envejecimiento estándar con la Jc del acondicionamiento con radiación UV, se desprende una variación menor al 10%.

Por lo tanto, se puede decir que los resultados de Jc obtenidos para la mezcla de control, bajo los diferentes procesos de acondicionamiento, son similares entre sí y presentan variaciones menores al 10%.

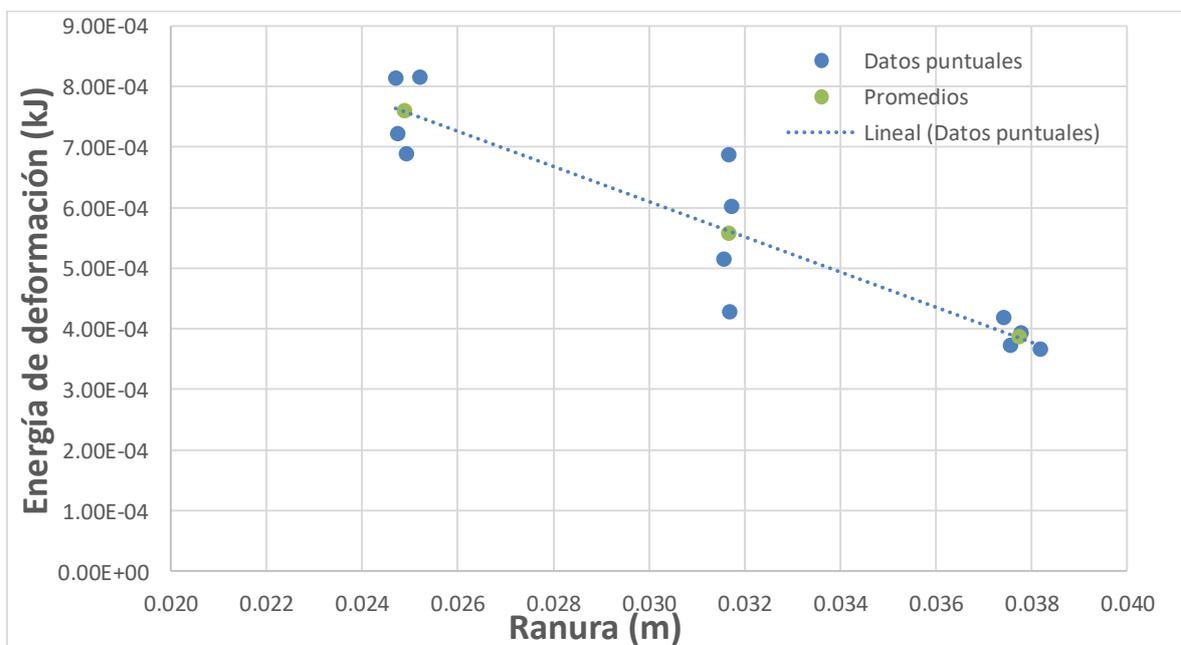


Figura 61. Energía de deformación en función de la ranura para MAC CAL, 5 días a 85 °C.

En la Figura 61 se muestran los resultados obtenidos para los especímenes de MAC con 1% de cal ensayados según la profundidad de su ranura, y envejecidos durante 5 días a 85 °C.

Con base en el ajuste de mínimos cuadrados realizado de la Figura 61, se presenta en la ecuación 11 el modelo numérico de la regresión lineal que correlaciona la energía de deformación a la falla (U) con la profundidad de la ranura (a).

$$U = -0,0289 * a + 0,0015 \quad \text{Ecuación 12}$$

Este modelo presenta un coeficiente de determinación regular, $R^2 = 0,842$. Quiere decir que, el 84,2% de la varianza total de la energía de deformación a la falla es explicada por el modelo de ajuste propuesto. Por lo tanto, se considera que el modelo tiene una representatividad de regular a buena y puede utilizarse de forma confiable.

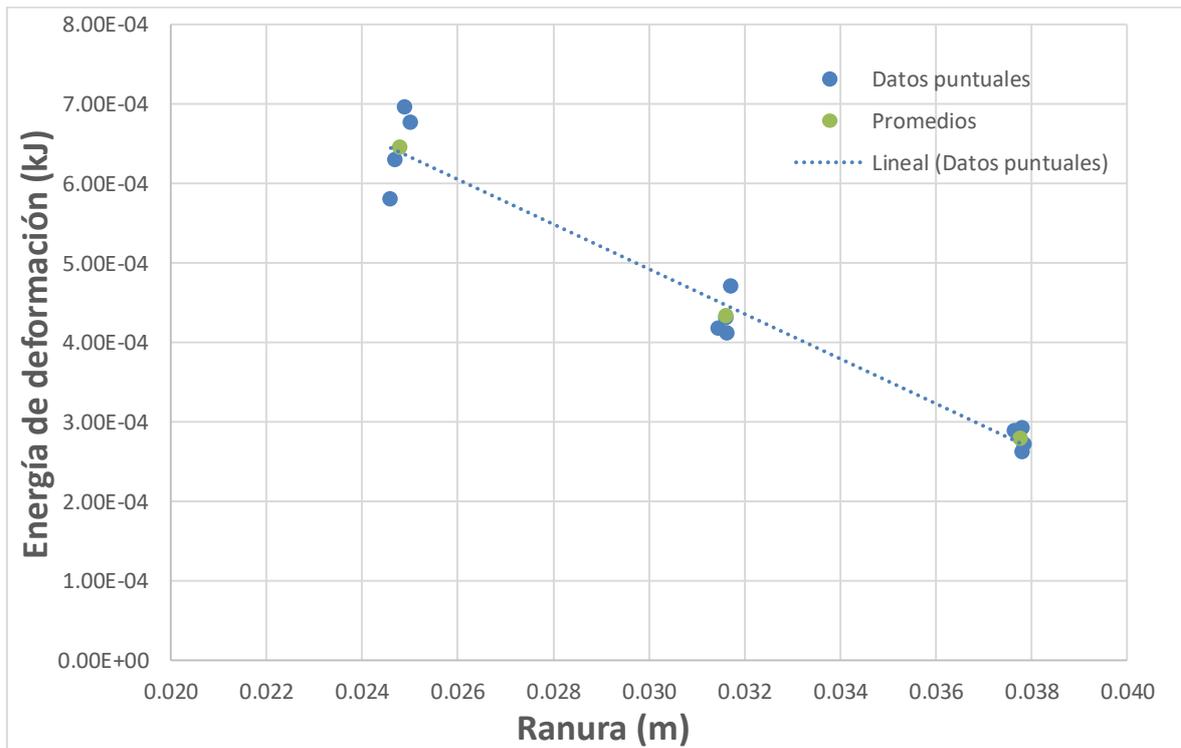


Figura 62. Energía de deformación en función de la ranura para MAC CAL, 3 días a 90°C.

En la figura anterior se muestran los resultados obtenidos para los especímenes de MAC con 1% de cal ensayados por grupos según la profundidad de su ranura, y expuestos a un envejecimiento de 3 días a 90 °C dentro de un horno.

Con base en la regresión lineal ilustrada en la Figura 62, en la ecuación 12 se detalla un modelo numérico que correlaciona la energía de deformación a la falla (U) con la profundidad de la ranura (a).

$$U = -0,0282 * a + 0,0013 \quad \text{Ecuación 13}$$

Este modelo anterior presenta un coeficiente de determinación bastante elevado, $R^2 = 0,952$. Quiere decir que, hasta un 95,2% de la varianza total de la energía de deformación a la falla, se explica por este modelo de regresión lineal. Por lo tanto, se considera que el ajuste presentado es bastante bueno.

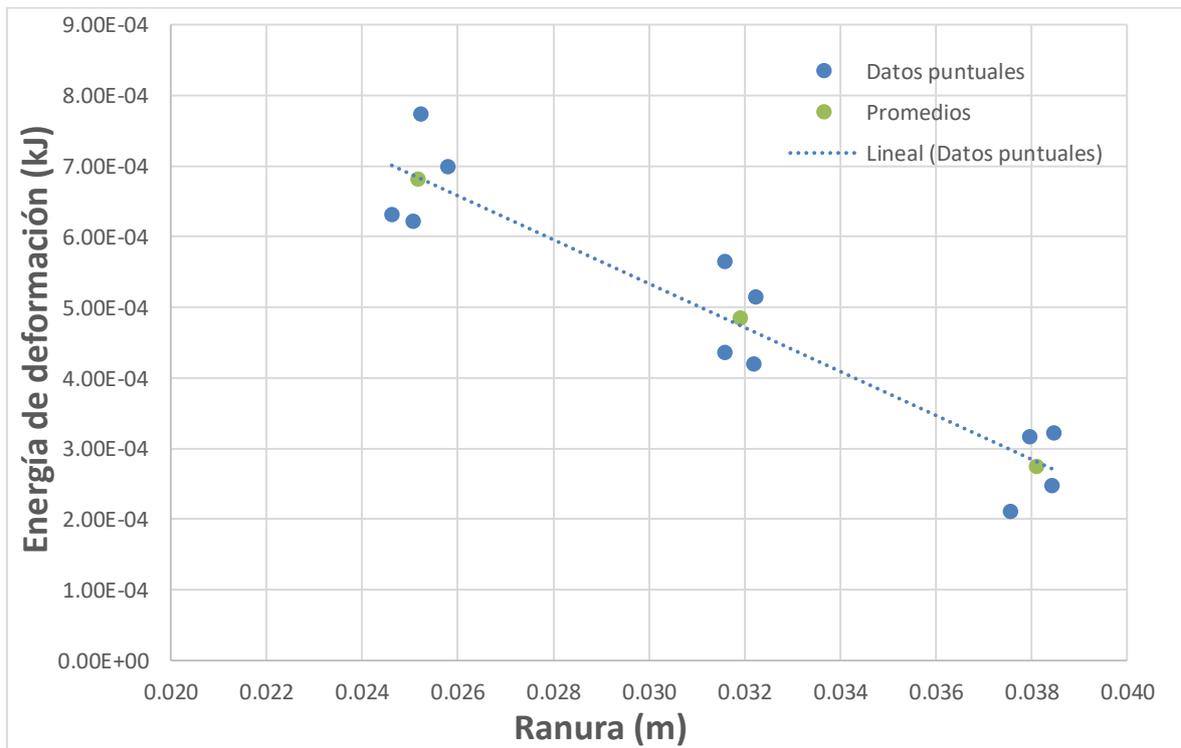


Figura 63. Energía de deformación en función de la ranura para MAC CAL, 11,5 días UV.

En la figura anterior se ilustran los resultados obtenidos para los especímenes de MAC con 1% de cal ensayados según la profundidad de su ranura, y envejecidos en un horno con aplicación de radiación UV durante 11,5 días.

De acuerdo con el modelo de regresión elaborado, la ecuación que mejor ajusta la energía de deformación a la falla (U) como función de la profundidad de la ranura (a) es la siguiente.

$$U = -0,0311 * a + 0,0015 \quad \text{Ecuación 14}$$

Este modelo presenta un coeficiente de determinación relativamente elevado, $R^2 = 0,881$. Es decir, el 88,1% de la varianza total de la energía de deformación a la falla es explicada por el modelo de regresión propuesto. Por lo tanto, el ajuste se considera bueno y confiable.

Cuadro 14. Comparación de energía de fractura promedio para la MAC con 1% de cal.

Mezcla	Envejecimiento aplicado	Ranura nominal (m)	U (kJ)	Desv. Est. (kJ)	C.V. (%)	Jc (kJ/m ²)
CAL	5 días a 85 °C	0,025	$7,6 \times 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-5}$	8,5	0,503
		0,032	$5,6 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	20,0	
		0,038	$3,9 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-5}$	6,0	
	3 días a 90 °C	0,025	$6,5 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-5}$	8,0	0,492
		0,032	$4,3 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-5}$	6,0	
		0,038	$2,8 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-5}$	5,1	
	11,5 días con UV	0,025	$6,8 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-5}$	10,5	0,542
		0,032	$4,8 \times 10^{-4}$	$6,8 \times 10^{-5}$	14,1	
		0,038	$2,7 \times 10^{-4}$	$5,4 \times 10^{-5}$	19,6	

Con base en los resultados presentados en el Cuadro 14, al comparar el valor para la tasa de alivio de la energía de deformación crítica para el envejecimiento estándar y con la Jc del acondicionamiento durante 3 días a 90 °C, se obtiene una diferencia de apenas el 2%. Mientras que al comparar la Jc del envejecimiento estándar con la Jc del acondicionamiento con radiación UV durante 11,5 días, se determina que la diferencia es inferior al 8%.

Por lo tanto, se puede decir que los resultados de la Jc obtenidos para la mezcla con 1% de cal, considerando los diferentes procesos de acondicionamiento a largo plazo, son similares entre sí y presentan apenas un 8 % de variación máxima.

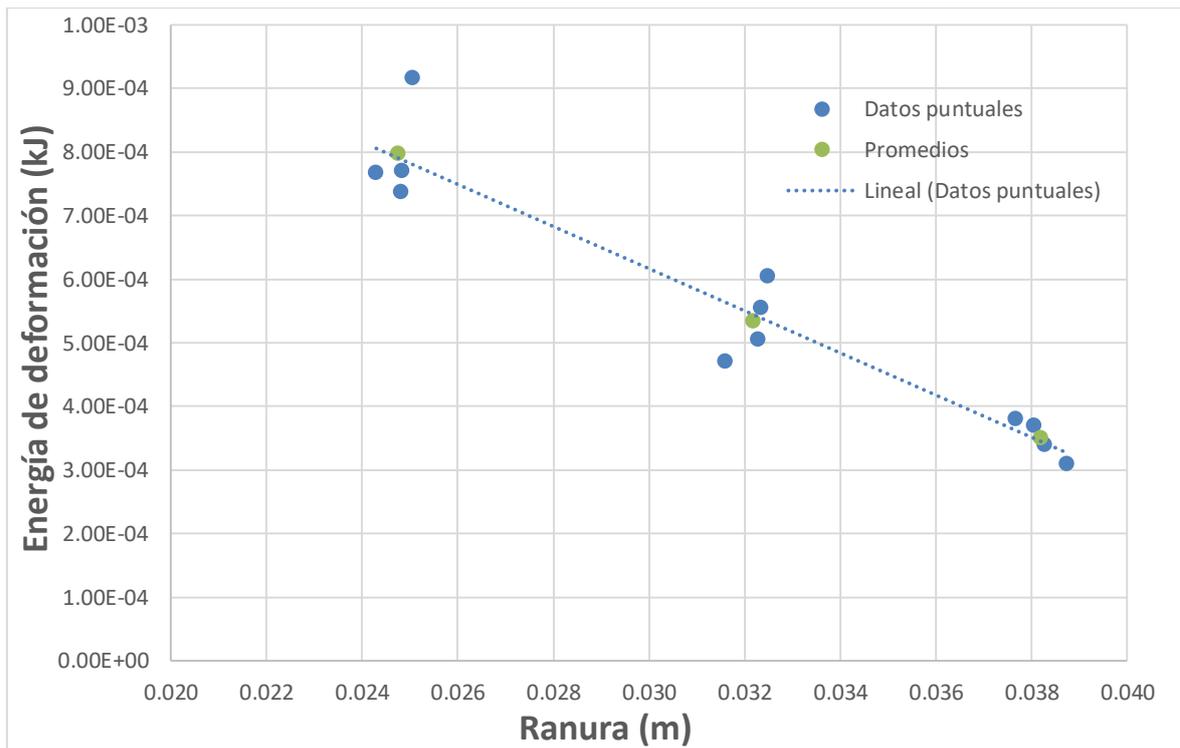


Figura 64. Energía de deformación en función de la ranura para MAC SBS, 5 días a 85 °C.

En la Figura 64 se muestran los resultados obtenidos para los especímenes de MAC modificada con 1% de cal y 2% de SBS ensayados según la profundidad de su ranura, y expuestos al envejecimiento estándar.

De acuerdo con el modelo de regresión elaborado, la ecuación que mejor ajusta la energía de deformación a la falla (U) como función de la profundidad de la ranura (a) es la siguiente.

$$U = -0,0332 * a + 0,0016 \quad \text{Ecuación 15}$$

Este modelo presenta un coeficiente de determinación relativamente elevado, $R^2 = 0,911$. Es decir, el 91,1% de la varianza total de la energía de deformación a la falla es explicada por el modelo de regresión propuesto. Por lo tanto, el ajuste se considera bastante bueno y confiable para la predicción de la J_c .

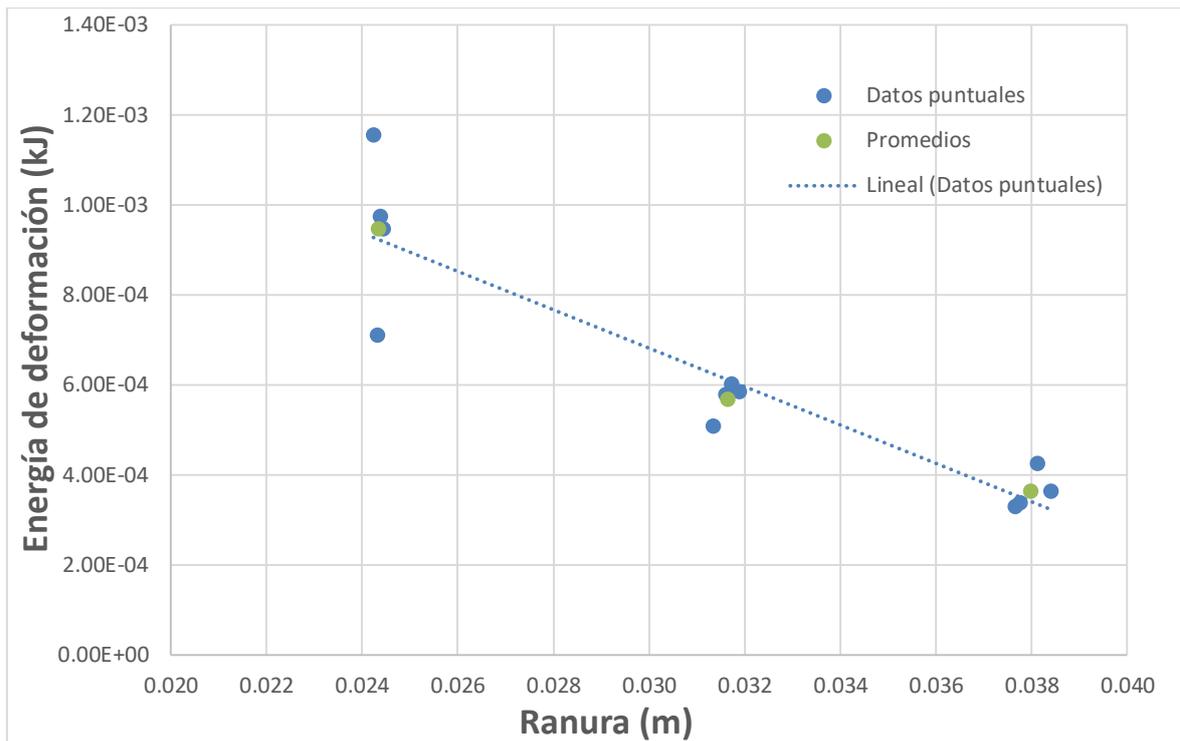


Figura 65. Energía de deformación en función de la ranura para MAC SBS, 3 días a 90 °C.

En la figura anterior se muestran los resultados obtenidos para los especímenes de MAC modificada con 1% de cal y 2% de SBS, agrupados según la profundidad de ranura, y expuestos a un envejecimiento de 3 días a 90 °C dentro de un horno.

Con base en el ajuste por mínimos cuadrados mostrado en la Figura 65, se detalla en la ecuación 15 un modelo numérico que correlaciona la energía de deformación a la falla (U) con la profundidad de la ranura (a).

$$U = -0,00428 * a + 0,0002 \quad \text{Ecuación 16}$$

El modelo anterior presenta un coeficiente de determinación (R^2) = 0,844. Quiere decir que un 84,4% de la varianza total de la energía de deformación a la falla, es explicado por este modelo de regresión lineal. Por lo tanto, se considera que el ajuste presentado es bueno y confiable para la determinación de la J_c .

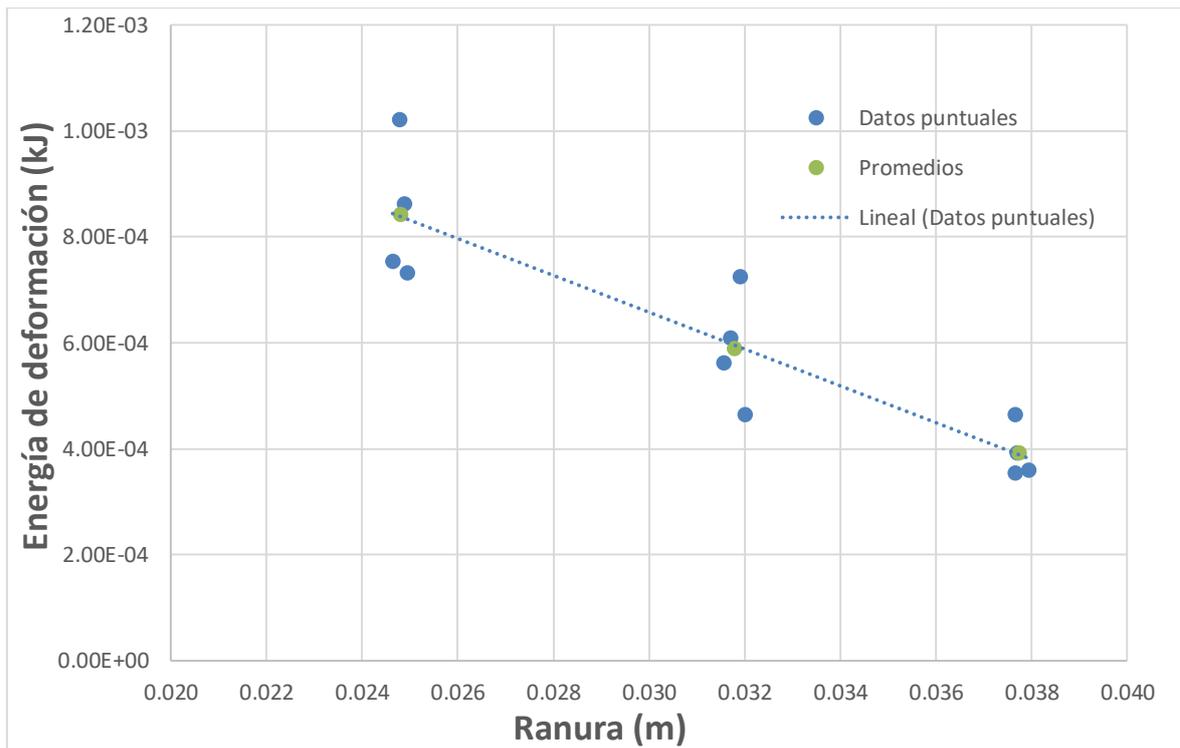


Figura 66. Energía de deformación en función de la ranura para MAC SBS, 11,5 días UV.

En la figura anterior se presentan los resultados obtenidos para los especímenes de MAC modificada con 1% de cal y 2% de SBS, ensayados según la profundidad de su ranura, y envejecidos en un horno con aplicación de radiación UV durante 11,5 días.

De acuerdo con el modelo de regresión elaborado, la ecuación que mejor ajusta la energía de deformación a la falla (U) como función de la profundidad de la ranura (a) es la siguiente.

$$U = -0,0348 * a + 0,0017 \quad \text{Ecuación 17}$$

Este modelo presenta un coeficiente de determinación relativamente elevado, $R^2 = 0,812$. Es decir, el 81,2% de la varianza total de la energía de deformación a la falla es explicada por el modelo de regresión propuesto. Por lo tanto, se considera que el ajuste tiene una buena representatividad estadística y puede utilizarse de forma confiable.

Cuadro 15. Comparación de energía de fractura promedio para la MAC con 1% cal y 2% SBS.

Mezcla	Envejecimiento aplicado	Ranura nominal (m)	U (kJ)	Desv. Est. (kJ)	C.V. (%)	Jc (kJ/m ²)
SBS	5 días a 85 °C	0,025	$8,0 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-5}$	10,1	0,577
		0,032	$5,3 \times 10^{-4}$	$5,8 \times 10^{-5}$	11,0	
		0,038	$3,5 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-5}$	9,2	
	3 días a 90 °C	0,025	$9,4 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	19,3	0,745
		0,032	$5,7 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-5}$	7,3	
		0,038	$3,6 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-5}$	11,9	
	11,5 días con UV	0,025	$8,4 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$	15,7	0,608
		0,032	$5,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	18,3	
		0,038	$3,9 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-5}$	13,0	

Con base en los resultados presentados en el Cuadro 15, se puede observar que los valores de Jc para el envejecimiento estándar y el acondicionamiento de 3 días a 90 °C presentan una diferencia de aproximadamente un 29%. Mientras que al comparar la Jc del envejecimiento estándar con la Jc del acondicionamiento durante 11,5 días con radiación UV, la variación es de apenas un 5%.

En este caso, se da la presencia de un "valor fuera de rango" para el grupo de especímenes con ranuras de 25 mm, que excede en más de un 22% los valores promedio de las demás probetas ensayadas. Este valor tan elevado de resistencia a la fractura provoca que la energía de deformación a la falla se aumente considerablemente, y, por ende, se produce un aumento de hasta el 29% en su Jc.

Si se excluyera del análisis este "valor fuera de rango" para el envejecimiento de 3 días a 90 °C, la nueva tasa de alivio de la energía de deformación crítica sería de 0,650 kJ/m², por lo que, la diferencia con el procedimiento de acondicionamiento estándar se reduciría a un 13%.

Por lo tanto, y bajo la justificación anterior, se puede decir que los resultados de Jc obtenidos para la mezcla con 1% de cal y 2% de SBS, para los especímenes sometidos a los diferentes procesos de acondicionamiento, son similares entre sí y presentan variaciones inferiores al 13%.

Considerando que los valores de Jc obtenidos para los distintos envejecimientos, según el tipo de tipo de mezcla ensayada, son bastante similares entre sí (ver

Cuadro 13, Cuadro 14 y Cuadro 15) se puede decir, de manera preliminar, que los envejecimientos aplicados son similares entre sí. Es decir, no generan grandes diferencias entre los resultados obtenidos.

Sin embargo, para poder verificar esta conclusión preliminar es necesario realizar una validación estadística mediante un análisis de varianzas multifactorial para todos los resultados obtenidos durante el ensayo semicircular bajo diferentes envejecimientos.

El diseño o modelo estructural de análisis multifactorial para el ensayo semicircular se define a continuación.

Se consideran tres factores o variables independientes: A - Tipo de mezcla, B - Tipo de acondicionamiento realizado y C – Profundidad de ranura, cada uno de los factores está integrado por tres niveles y cada nivel contiene cuatro especímenes ensayados. Además, el modelo utiliza como variable respuesta la energía de deformación a la falla (U).

El diseño de análisis es semejante al planteado para el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos. El factor tipo de mezcla posee tres niveles distintos: mezcla de control (CT), mezcla modificada con 1% de cal (CAL) y mezcla modificada con 1% de cal + 2% de SBS (SBS). El factor tipo de acondicionamiento realizado está integrado por otros tres niveles: acondicionamiento durante 5 días a 85 °C o estándar (Std), acondicionamiento durante 3 días a 90 °C (T) y acondicionamiento durante 11,5 días con radiación ultravioleta (UV). Por último, los tres niveles del factor profundidad de ranura son: ranura de 25 mm de profundidad, ranura de 32 mm de profundidad y ranura de 38 mm de profundidad.

El ANOVA de tres factores se ha desarrollado utilizando un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$). A continuación, se presenta un cuadro con el resumen del análisis de varianzas realizado. En el apéndice se incluye el detalle del procedimiento ejecutado.

Cuadro 16. ANOVA de tres factores para ensayo de flexión semicircular.

Factor	g.l.	Valor - p	Conclusión
Tipo de Mezcla (A)	2	0,0000	Hay diferencias significativas entre los tipos de mezcla
Tipo de Acondicionamiento (B)	2	0.4008	NO hay diferencias significativas entre los acondicionamientos
Profundidad de Ranura (C)	2	0,0000	Hay diferencias significativas entre las ranuras

Con base en los resultados mostrados en el Cuadro 16, se puede concluir con un nivel de confianza del 95% que NO hay diferencias significativas entre los desempeños obtenidos para los distintos envejecimientos aplicados a cada tipo de mezcla (valor – $p = 0,40 > 0,05$).

Es decir, los tres envejecimientos a largo plazo en laboratorio aplicados para los ensayos de flexión semicircular ejecutados son equivalentes entre sí, pues generan el mismo efecto de envejecimiento en las mezclas y arrojan resultados muy similares.

A continuación, se muestra un cuadro resumen con los principales factores o parámetros de medición registrados durante los ensayos realizados, con el fin de establecer una clasificación del comportamiento de las mezclas analizadas.

Cuadro 17. Parámetros principales para clasificar el desempeño a la fatiga de las MAC.

MAC	Envejecimiento aplicado	Jc (kJ/m²)
CT	5 días a 85 °C	0,528
	3 días a 90 °C	0,533
	11,5 días con UV	0,482
CAL	5 días a 85 °C	0,503
	3 días a 90 °C	0,492
	11,5 días con UV	0,542
SBS	5 días a 85 °C	0,577
	3 días a 90 °C	0,745
	11,5 días con UV	0,608

De acuerdo con los resultados presentados en el Cuadro 17, en términos generales, la mezcla modificada con 1% de cal + 2% de SBS (MAC SBS) presenta un mejor desempeño contra la fatiga que la mezcla de control (MAC CT). Además, al comparar los desempeños ofrecidos por la MAC SBS con los desempeños obtenidos para la MAC CAL, la mezcla con SBS presenta un mejor desempeño a la fatiga. Por último, si se comparan los desempeños ofrecidos por la MAC CT y la MAC CAL, esta última posee un menor desempeño o vida de fatiga que la MAC CT.

Con base en los resultados y el análisis anterior, y con el fin de realizar (en la siguiente sección) una comparación cualitativa entre los desempeños obtenidos con cada procedimiento de ensayo aplicado según el tipo de mezcla ensayada, se presenta a

continuación la clasificación final de las mezclas de acuerdo con los desempeños obtenidos para el ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044):

- 1) Mezcla modificada con 1% de cal + 2% de SBS (SBS).
- 2) Mezcla de control (CT).
- 3) Mezcla modificada con 1% de cal (CAL).

Es decir, en términos generales la mezcla MAC SBS es la que presenta mejor desempeño al ser sometida al ensayo flexión semicircular. La mezcla MAC CT presenta el segundo mejor desempeño, mientras que la MAC CAL en términos generales es la que presenta el menor desempeño a la fatiga.

5.4 Comparación del desempeño para las MAC según el procedimiento de ensayo realizado

De acuerdo con lo explicado en el capítulo dos de la presente investigación, al contar con un ensayo de características dinámicas (AASHTO T321) basado en ciclos de carga y descarga que registra energía disipada, y un ensayo que no presenta las mismas características (ASTM D8044) sino que está basado en la energía de fractura a una tasa constante, no es correcto realizar una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos para cada ensayo, o tratar de generar algún modelo de regresión que trate de correlacionar los resultados.

Considerando esta situación, se ha generado una clasificación cuantitativa del desempeño a la fatiga de las mezclas evaluadas con cada procedimiento de ensayo. Estas clasificaciones permiten generar una comparación cualitativa de los resultados obtenidos para cada mezcla, así correlacionar de alguna forma los resultados finales de cada procedimiento de ensayo ejecutado. A continuación, se muestran las clasificaciones generadas, así como el análisis comparativo de los procedimientos de ensayo aplicados a lo largo de la presente investigación.

En la sección 5.2 de la presente investigación se realizó una clasificación de las mezclas ensayadas, tomando como referencia los resultados de desempeño contra la fatiga obtenidos para el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos (AASHTO T321). De acuerdo con el Cuadro 10, a continuación, se muestra la clasificación de las MAC con mejor desempeño y/o mayor vida de fatiga, en orden descendente.

- 1- MAC modificada con 1% de cal + 2% de SBS (MAC SBS).
- 2- MAC de control (MAC CT).
- 3- MAC modificada con 1% (MAC CAL).

La clasificación anterior muestra que, utilizando el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos, la MAC SBS tiene el mejor desempeño entre las mezclas evaluadas, mientras que la MAC CAL posee el menor rendimiento.

Por otra parte, al final de la sección 5.3 de la presente investigación, se generó una clasificación del desempeño a la fatiga de las MAC evaluadas con el ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044). A continuación, se muestra la clasificación realizada tomando como referencia los resultados obtenidos en el Cuadro 17.

- 1- MAC modificada con 1% de cal + 2% de SBS (MAC SBS).
- 2- MAC de control (MAC CT).
- 3- MAC modificada con 1% (MAC CAL).

La clasificación anterior determina que utilizando el ensayo de flexión semicircular, la MAC SBS tiene el mejor desempeño entre las mezclas evaluadas, mientras que la MAC CAL posee el menor rendimiento.

Es importante señalar que las clasificaciones mostradas anteriormente, para cada procedimiento de ensayo, son congruentes entre sí. Es decir, se puede utilizar de forma alternativa el ensayo de flexión semicircular para realizar una evaluación de mezclas asfálticas, pues los resultados obtenidos serán similares a los que se obtienen con el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos.

Aunque en esta sección se ha dejado en evidencia la posible aplicación del procedimiento de ensayo ASTM D 8044 como una alternativa para la evaluación de fatiga en las MAC, en la siguiente sección se realiza un análisis comparativo que trata de integrar todas las variables que influyen en los procesos de preparación, falla y análisis de los especímenes. Con el fin de determinar los rangos o bajo que situaciones es aplicable cada procedimiento de ensayo.

5.6 Análisis comparativo de los procedimientos de ensayo

Dado que en la presente investigación se ha demostrado que el ensayo de flexión semicircular ASTM D8044 puede ser utilizado como una alternativa para evaluar y clasificar distintas mezclas asfálticas en caliente, en esta sección se analizarán las

ventajas/desventajas que presenta este procedimiento de ensayo en comparación con el procedimiento de ensayo de viga a flexión en cuatro puntos AASHTO T321, y se creará una clasificación binaria subjetiva para los parámetros involucrados en los procesos.

Para realizar la comparación entre ambos procedimientos de ensayo se pretende incluir la mayor cantidad de parámetros involucrados en todo el proceso de análisis, desde la preparación de la mezcla y los especímenes hasta la falla de los mismos. Es importante mencionar que se incluirá como parámetro por analizar el equipo utilizado para la falla de los especímenes.

El análisis comparativo binario busca generar un indicador subjetivo que muestre de manera general las bondades de cada ensayo, y de ser posible, cuál resulta óptimo de aplicar para el diseño y/o control de calidad de las MAC. A continuación se muestra un cuadro comparativo de los ensayos, en el cual se estará asignando un valor de "1" para aquel ensayo que presente mejores condiciones al comparar un parámetro específico, y, por ende, se asignará un valor de "0" para el otro ensayo referente a ese factor.

Cuadro 18. Comparación binaria de los procedimientos de ensayo ejecutados.

Parámetro en análisis	AASHTO T321	ASTM D8044
Cantidad de mezcla necesaria	0	1
Compactación de especímenes base	0	1
Corte y preparación de especímenes	1	0
Verificación del porcentaje de vacíos	1	0
Tiempo para ensayar los especímenes	0	1
Versatilidad del equipo de compactación*	0	1
Versatilidad del equipo para ensayar los especímenes*	0	1
Ponderación total	2	5

* La versatilidad de los equipos utilizados es un factor determinante para la implementación de un procedimiento de ensayo en laboratorio, en especial si se considera el costo de adquirir los equipos y la funcionalidad de los mismos para ejecutar otros ensayos.

De acuerdo con el indicador binario subjetivo mostrado en el Cuadro 18, el ensayo de flexión semicircular posee mayores ventajas en su aplicación que el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos. En términos generales, el ensayo de flexión semicircular reduce el tiempo en que se pueden obtener los resultados de la evaluación y/o cumplimiento de una mezcla asfáltica ensayada.

Considerando que el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos ha sido ampliamente estudiado y que ofrece importantes parámetros-correlaciones para el proceso de diseño/verificación de MAC por colocar bajo determinadas condiciones en un proyecto, se recomienda seguir utilizando este ensayo durante las etapas de diseño preliminar de MAC, debido a que se cuenta con tiempo suficiente para la ejecución de los ensayos requeridos.

De acuerdo con el análisis anterior y considerando el tiempo de respuesta que se tiene en el desarrollo de proyectos viales, se recomienda la implementación del ensayo de flexión semicircular para realizar el control de calidad de la MAC que se está colocando en el proyecto. Esto con el fin de reducir lo máximo posible el tiempo en que se obtienen los resultados de verificación/cumplimiento de la mezcla colocada, sin disminuir la calidad del monitoreo o control de calidad.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Todos los especímenes seleccionados para los ensayos de vigas a flexión en cuatro puntos presentaban un porcentaje de vacíos del 4 ± 1 %. Mientras que los especímenes seleccionados para los ensayos de flexión semicircular poseían un porcentaje de vacíos de $4 \pm 0,5$ %.

Aplicar un acondicionamiento a largo plazo en laboratorio utilizando una temperatura superior a los 100 °C genera inestabilidad en la mezcla y produce deformaciones en la geometría de los especímenes.

Un acondicionamiento a largo plazo en laboratorio utilizando un horno a 95 °C durante dos días ofrece un envejecimiento similar al acondicionamiento estándar, pero, durante el proceso se da un flujo del asfalto hacia la parte inferior de los especímenes que genera una concentración o película delgada de bitumen oxidado y provoca una alteración en las propiedades y composición de los especímenes por analizar.

Con base en el barrido térmico realizado, se eligió como primer procedimiento de ensayo alternativo para el acondicionamiento a largo plazo en laboratorio, el envejecimiento de los especímenes de mezcla asfáltica en caliente dentro de un horno con una temperatura de 90 °C durante 3 días. Este procedimiento es similar al acondicionamiento estándar implementado actualmente, pero, su aumento de 5 °C en la temperatura aplicada acelera el acondicionamiento y disminuye dos días el tiempo total del ensayo.

Como segundo procedimiento de ensayo alternativo para el acondicionamiento a largo plazo en laboratorio se aplicó radiación UV durante 11,5 días dentro de un horno herméticamente cerrado. Este procedimiento busca simular el envejecimiento en campo que sufre una mezcla asfáltica en caliente durante 20 años de exposición, a través de la aplicación de radiación UV con lámparas que emiten longitudes de onda cercanas a los 368 nm.

De acuerdo con los análisis de varianzas (ANOVA) multifactorial realizados para los ensayos evaluados (AASHTO T321 y ASTM D8044) se concluye con un nivel de confianza del 95% que NO hay diferencias significativas entre los acondicionamientos a largo plazo en laboratorio propuestos en esta investigación y el procedimiento estándar AASHTO R30.

Al comparar los C.V. obtenidos para los dos criterios de falla utilizados en el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos (estándar y Rowe y Bouldin), se pudo evidenciar que las variaciones obtenidas para ambos métodos son muy similares entre sí. Es decir, el criterio de Rowe y Bouldin para determinar la falla de una viga es aceptable.

De acuerdo con varios autores y sus investigaciones, la variabilidad (C.V.) de los resultados obtenidos para el ensayo de viga de fatiga es relativamente baja y varía entre el 15% - 38% según la MAC analizada.

La rigidez final promedio obtenida para las MAC analizadas utilizando el criterio de Rowe & Bouldin (2012) varía entre el 68% – 72%, rango muy cercano al definido por Abojaradeh (2013).

El ensayo de flexión semicircular presenta coeficientes de variación más bajos que el ensayo de viga de fatiga. Los C.V. para la energía de deformación a la falla varían entre el 5% - 20% para todas las MAC.

Se realizó una clasificación de las MAC según su resistencia al agrietamiento por fatiga y el ensayo ejecutado. En ambos casos la mezcla asfáltica en caliente modificada con 1% de cal + 2% de SBS fue la que presentó mejor desempeño, mientras que la mezcla asfáltica en caliente modificada con 1% de cal presentó el menor desempeño. A continuación se muestra la clasificación de las MAC evaluadas con ambos ensayos.

- 1- MAC modificada con 1% de cal + 2% de SBS.
- 2- MAC de control.
- 3- MAC modificada con 1%.

De la conclusión anterior se desprende que el ensayo de flexión semicircular ejecutado en la presente investigación es válido para realizar evaluación/clasificación y control de calidad de MAC.

De acuerdo con el indicador binario presentado en el Cuadro 18, que considera: el costo y la disponibilidad de los equipos, la cantidad de mezcla utilizada, la preparación previa de los especímenes y sobre todo el tiempo requerido para generar resultados confiables en el menor tiempo posible, se concluye que el procedimiento de ensayo de flexión semicircular utilizado (ASTM D8044-16) es una alternativa económica y técnicamente viable para la evaluación y control de la susceptibilidad a la fatiga de las mezclas asfálticas en caliente.

Los modelos de regresión lineal simple obtenidos del ensayo de flexión semicircular para determinar el $\frac{dU}{da}$ presentaron coeficientes de determinación (R^2) en el rango de 0,725 – 0,952. Los límites (inferior y superior) se presentan en un único grupo para cada caso, los restantes grupos presentaron valores más cercanos al promedio general (0,866).

En el siguiente cuadro se resumen los valores de J_c obtenidos para cada combinación de MAC – acondicionamiento aplicado.

Cuadro 19. Resumen de la tasa de alivio de energía de deformación crítica (J_c).

Mezcla	Acondicionamiento	J_c (kJ/m²)
CONTROL	5 días a 85 °C	0,528
	3 días a 90 °C	0,533
	11,5 días con UV	0,482
1% CAL	5 días a 85 °C	0,503
	3 días a 90 °C	0,492
	11,5 días con UV	0,542
1% CAL + 2% SBS	5 días a 85 °C	0,577
	3 días a 90 °C	0,650
	11,5 días con UV	0,608

A partir del ensayo a flexión semicircular se demostró que el acondicionamiento de 3 días a 90 °C ofrece resultados muy similares a los obtenidos con el envejecimiento estándar, sus variaciones se encuentran entre el 1% y 13%.

Se puede concluir, con base en los resultados obtenidos de los ensayos a flexión semicircular, que el acondicionamiento de 11,5 días con radiación UV presenta resultados muy similares a los obtenidos con el envejecimiento estándar, la variación entre resultados es menor al 10%.

Como conclusión general, la implementación en conjunto del procedimiento de acondicionamiento a largo plazo en laboratorio propuesto (3 días a 90 °C) y el ensayo de flexión semicircular (ASTM D8044) llevaría a una reducción sustancial en el tiempo para la obtención de los resultados y el costo de la evaluación por fatiga de MAC.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda ampliar la investigación de fatiga en MAC utilizando el ensayo de flexión semicircular ASTM D8044, con el fin de generar una base estadística robusta que permita la inclusión de este ensayo (ASTM D8044) en la normativa nacional, para la evaluación y/o control de calidad de las MAC colocadas en campo.

Se recomienda que los bloques de MAC utilizados para extraer las vigas de fatiga se compacten hasta alcanzar un 5,0 – 5,5 % de vacíos de aire.

Se recomienda que los cilindros/pastillas base elaboradas para extraer los especímenes semicirculares se compacten hasta alcanzar un 4,5 – 5,0 % de vacíos de aire.

Se recomienda replicar el barrido térmico implementado en la presente investigación con una mayor cantidad de muestras, para generar un sustento estadístico que permita considerar la implementación del acondicionamiento de 3 días a 90 °C en futuras actualizaciones a la normativa técnica nacional.

Se recomienda analizar en una nueva investigación, en conjunto con la recomendación anterior, el desempeño de las vigas de fatiga para el acondicionamiento de 2 días a 95 °C, colocadas de forma contraria a como fueron envejecidas, es decir, luego de aplicar el acondicionamiento mencionado al espécimen, se hace el montaje para la falla colocando la cara inferior de la viga (donde se forma la película de asfalto) hacia arriba. Esta recomendación es con el fin de analizar el desempeño de los especímenes por el lado contrario donde se forma la película delgada de asfalto oxidado-rigidizado, que se muestra en la Figura 34.

Para el proceso de compactación de bloques al 4% de vacíos se recomienda generar bloques con la mitad del tamaño regular (entre 7,5 – 8,0 cm), es decir, elaborar bloques que ofrezcan únicamente dos vigas. Este proceso se recomienda debido a que en muchos de los bloques compactados, la parte superior del mismo alcanzaba los vacíos deseados, pero en la parte inferior se cerraba mucho la mezcla.

Una recomendación para la preparación de los especímenes semicirculares es que se reduzca el espesor del disco utilizado en la sierra (máquina de cortar), para que el espesor de las ranuras cumpla con lo establecido en la norma ASTM D 8044 – 16.

Con base en los resultados obtenidos y los costos asociados a cada ensayo realizado se recomienda seguir utilizando el ensayo de viga de fatiga para el proceso de diseño de

MAC, mientras que se recomienda la implementación del ensayo de flexión semicircular para realizar el control de calidad o evaluación de las MAC colocadas en campo. Esta recomendación busca agilizar la obtención de resultados y la toma de decisiones en un menor tiempo.

En esta misma línea, se recomienda utilizar el criterio de falla propuesto por Rowe y Bouldin únicamente para los proyectos de investigación o para el proceso de diseño de MAC en algunos casos específicos, debido a la duración de los ensayos (conllevan mayor tiempo).

CAPÍTULO 7. FUENTES DE CONSULTA

- Abojaradeh, M. (2013). Development of fatigue failure criterion for Hot-Mix Asphalt based on dissipated energy and stiffness ratio. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 54-69.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). *AASHTO T 321-17, Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending*. Washington, D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *AASHTO T 269-14. Standard Method of Test for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures*. Washington, D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). *AASHTO R 30-02 Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA)*. Washington, D.C.
- American Society of Testing Materials. (2016). *ASTM D8044-16. Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures*. Pennsylvania.
- Arana, J., & González, J. (2003). *Mecánica de fractura*. España: Universidad del País Vasco.
- Arrieta, A. (2016). *Comparación de procedimientos de ensayo para determinar la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en caliente*. San José.
- Asphalt Institute. (2001). *Superpave Mix Design (3.ª ed.)*. Estados Unidos de América.
- Blanchetto, H., Miró, R., & Pérez, F. (2007). *Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales. Primera parte: Estudios en base al método UCL*. Argentina: Universidad Nacional de La Plata.
- Di Benedetto, H., De La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., & Lundstrom, R. (2004). Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 202-216.
- Faruk, A., Hu, X., López, Y., & Walubita, L. (2014). Using the Fracture Energy Index Concept to Characterize the HMA Cracking Resistance Potential Under Monotonic

- Crack Testing. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 40-48.
- García, J., & Hansen, K. (2001). *HMA Pavement Mix Type Selection Guide*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- González, S., & Velandia, S. (2006). *Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales*. Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design (Vol. II)*. United States of America: Pearson Prentice Hall.
- Limón, P., Pérez, F., Pérez, M., Jiménez, J., & Villalobos, J. L. (2017). *El ensayo 8TD: Nueva metodología para medir la energía de fractura en mezclas asfálticas*. Cancún, México: Congreso Mexicano del Asfalto.
- Loría, L. G., Aguiar, J., Elizondo, F., & Arce, M. (2006). *Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas*. Obtenido de Repositorio LanammeUCR:
https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/435/E_SPECIFICACION_FATIGA-MEZCLAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Matthews, J., Monismith, C., & Craus, J. (1993). Investigation of Laboratory Fatigue Testing Procedures for Asphalt Aggregate Mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, 119(4), 634-654.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)*. San José, Costa Rica.
- Miranda, F., Aguiar, J., & Loría, L. (Diciembre de 2017). *DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Obtenido de Repositorio LanammeUCR:
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/977>
- Montazeri, S. (2009). *Assessing repeatability of four-point bending method for estimating fatigue cracking of hot mix asphalt*. United States of America: ETD Collection for University of Texas, El Paso.

- Moreno, F. (2013). *Diseño de un método de ensayo de laboratorio para el análisis de la resistencia a fisuración de mezclas bituminosas*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Na, C. (2010). *Fatigue-fracture relation on asphalt concrete mixtures*. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- National cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2002). *Simple Performance Test of Superpave Mix Design*. Washington: National Academy Press.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Illinois: Eres Consultans Division.
- Noguera, A., & Rodrigo, M. (2011). Efecto de la tenacidad del asfalto en la resistencia a fatiga de las mezclas asfálticas. *Revista Ingeniería de Construcción*, 224-239.
- Parker, B. (2010). *Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete fatigue cracking resistance*. Texas, United States of America: Texas A&M University.
- Rivera, F. (2019). *Determinación de la energía de fractura en mortero asfáltico*. San José.
- Rodríguez, J. D., & Loría, L. G. (Noviembre de 2016). *EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO, CLAVE PARA LA PROTECCIÓN DEL PATRIMONIO VIAL*. Obtenido de Repositorio LanammeUCR:
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/766/LM-PI-166-2016%20Mant%20Preventivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sánchez, M. (2017). *Implementación de metodología de envejecimiento de asfaltos mediante radiación UV*. San José.
- Tang, S. (2014). *Evaluate the fracture and fatigue resistances of hot mix asphalt containing high percentage reclaimed pavement (RAP) materials at low and intermediate temperatures*. Iowa, United States of America: Iowa State University.
- Transportation Research Board. (2015). *NCHRP Report 815: Short-Term Laboratory Conditioning of Asphalt Mixtures*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

- Valdés, G., Pérez, F., & Botella, R. (2013). Nuevo procedimiento para evaluar el comportamiento a fatiga en pavimentos asfálticos a través del ensayo Fénix. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 362-371.
- Vargas, A., Aguiar, J., Leiva, F., & Loría, L. G. (Enero de 2014). *EVALUACIÓN DE RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL ENFOQUE DE ENERGÍA DISIPADA*. Obtenido de Repositorio LanammeUCR:
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/134/LM-PI-UMP-019-R1%20%28con%20firmas%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Walubita, L., Álvarez, A., & Sánchez, F. (2012). Using fracture energy to characterize the hot mix asphalt cracking resistance based on the direct-tensile test. *Revista Facultad Ingeniería Universidad de Antioquia*, 126-137.

CAPÍTULO 8. APÉNDICE

A continuación se presentan los resultados individuales, por cada espécimen, obtenidos en todos los ensayos de flexión semicircular realizados, según la MAC analizada.

Cuadro 20. Resultados para MAC de CT con acondicionamiento de 5 días a 85 °C.

Especimen	Vacíos de aire (%)	Temperatura (°C)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	Energía de deformación a la falla (U)			Energía de deformación a la falla (U) (kJ)	Tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral (J _c) (kJ/m ²)
					(kN-mm)	(m)	(m)		
2-4	4.5	25.02	57.89	25.27	0.688	0.058	0.025	6.68E-04	0.528
4-1	4.4	25.00	57.89	24.81	0.697	0.058	0.025	6.97E-04	
4-3	4.5	25.02	57.81	24.78	0.809	0.058	0.025	8.09E-04	
4-4	4.5	25.08	57.72	24.64	0.604	0.058	0.025	6.04E-04	
Promedio	4.5	25.03	57.83	24.88	0.695	0.058	0.025	6.95E-04	
Desvest	0.0	0.03	0.08	0.27	0.086	0.000	0.000	8.57E-05	
C.V. (%)	1.1	0.14	0.14	1.10	12.333	0.140	1.100	1.23E+01	
2-2	4.4	25.06	57.64	32.65	0.339	0.058	0.033	3.39E-04	
3-1	4.4	25.04	57.16	31.91	0.425	0.057	0.032	4.25E-04	
3-3	4.4	25.01	57.51	32.23	0.421	0.058	0.032	4.21E-04	
5-2	3.8	25.00	57.61	31.84	0.408	0.058	0.032	4.08E-04	
Promedio	4.3	25.03	57.48	32.16	0.398	0.057	0.032	3.98E-04	
Desvest	0.3	0.03	0.22	0.37	0.040	0.000	0.000	4.02E-05	
C.V. (%)	7.1	0.11	0.38	1.15	10.084	0.384	1.149	1.01E+01	
1-1	3.6	24.98	57.52	38.56	0.259	0.058	0.039	2.59E-04	
1-2	3.7	24.99	57.60	38.57	0.323	0.058	0.039	3.23E-04	
1-4	3.6	24.98	57.32	38.63	0.235	0.057	0.039	2.35E-04	
5-4	3.7	24.96	57.31	38.88	0.298	0.057	0.039	2.98E-04	
Promedio	3.7	24.98	57.44	38.66	0.279	0.057	0.039	2.79E-04	
Desvest	0.1	0.01	0.15	0.15	0.039	0.000	0.000	3.93E-05	
C.V. (%)	1.6	0.05	0.25	0.39	14.098	0.253	0.388	1.41E+01	

Cuadro 21. Resultados para MAC de CT con acondicionamiento de 3 días a 90 °C.

Especimen	Vacíos de aire (%)	Temperatura (°C)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	Energía de deformación a la falla (U)			Energía de deformación a la falla (U) (kJ)	Tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral (J _c) (kJ/m ²)
					(kN-mm)	(m)	(m)		
6-2	4.5	24.81	57.56	25.69	0.686	0.058	0.026	6.86E-04	0.633
7-1	4.5	24.92	57.79	25.40	0.599	0.058	0.025	5.99E-04	
8-2	4.5	25.02	57.48	25.16	0.671	0.057	0.025	6.71E-04	
8-4	4.4	25.03	57.32	25.28	0.576	0.057	0.025	5.76E-04	
Promedio	4.5	24.95	57.54	25.38	0.633	0.058	0.025	6.33E-04	
Desvest	0.0	0.10	0.20	0.23	0.054	0.000	0.000	5.37E-05	
C.V. (%)	1.1	0.41	0.34	0.90	8.487	0.340	0.895	8.48E+00	
6-1	4.0	24.90	57.60	31.99	0.445	0.058	0.032	4.45E-04	
6-4	3.8	24.90	57.49	31.99	0.448	0.057	0.032	4.49E-04	
7-3	4.4	24.91	57.68	31.76	0.405	0.058	0.032	4.05E-04	
8-3	4.2	24.95	57.21	31.84	0.545	0.057	0.032	5.45E-04	
Promedio	4.1	24.92	57.50	31.90	0.476	0.057	0.032	4.76E-04	
Desvest	0.3	0.02	0.21	0.11	0.047	0.000	0.000	4.68E-05	
C.V. (%)	6.3	0.10	0.36	0.36	9.833	0.357	0.359	9.83E+00	
6-3	3.6	24.96	57.60	37.75	0.196	0.058	0.038	1.96E-04	
7-2	3.8	24.93	57.56	38.12	0.204	0.058	0.038	2.04E-04	
7-4	3.6	24.91	57.35	37.48	0.374	0.057	0.037	3.74E-04	
8-1	3.5	24.90	57.51	38.04	0.230	0.058	0.038	2.30E-04	
Promedio	3.6	24.93	57.51	37.85	0.251	0.058	0.038	2.51E-04	
Desvest	0.1	0.026	0.110	0.292	0.083	0.000	0.000	8.32E-05	
C.V. (%)	3.6	0.11	0.2	0.8	33.177	0.191	0.772	3.31E+01	

Cuadro 22. Resultados para MAC de CT con acondicionamiento UV durante 11,5 días.

Espécimen	Vacios de aire (%)	Temperatura (°C)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ·mm)	Espesor (m)	Ranura (m)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ)	Tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral (J _c) (kJ/m ²)
9-3	4.2	25.03	57.25	24.65	0.931	0.057	0.025	9.310E-04	0.482
9-4	4.2	24.96	57.01	24.40	0.638	0.057	0.024	6.380E-04	
11-3	4.2	24.90	57.46	24.78	0.739	0.057	0.025	7.390E-04	
11-4	4.3	25.06	57.61	24.68	0.657	0.058	0.025	6.570E-04	
Promedio	4.2	24.99	57.33	24.63	0.741	0.057	0.025	7.413E-04	
Desvest	0.0	0.07	0.26	0.16	0.134	0.000	0.000	1.339E-04	
C.V. (%)	1.2	0.29	0.45	0.66	18.061	0.455	0.656	1.806E+01	
9-2	4.2	24.94	57.30	31.34	0.466	0.057	0.031	4.660E-04	
10-1	4.0	25.02	57.38	31.71	0.466	0.057	0.032	4.660E-04	
10-2	4.2	25.01	57.57	31.79	0.335	0.058	0.032	3.350E-04	
10-4	4.0	25.00	57.61	32.02	0.434	0.058	0.032	4.340E-04	
Promedio	4.1	24.99	57.47	31.72	0.425	0.057	0.032	4.253E-04	
Desvest	0.1	0.04	0.15	0.28	0.062	0.000	0.000	6.203E-05	
C.V. (%)	2.8	0.14	0.26	0.89	14.586	0.259	0.891	1.459E+01	
9-1	3.8	25.06	57.18	38.38	0.370	0.057	0.038	3.700E-04	
10-3	3.8	24.96	57.61	38.35	0.390	0.058	0.038	3.900E-04	
11-1	3.8	25.01	57.37	37.40	0.396	0.057	0.037	3.960E-04	
11-2	3.7	25.01	57.50	38.30	0.333	0.058	0.038	3.330E-04	
Promedio	3.8	25.01	57.42	38.11	0.372	0.057	0.038	3.723E-04	
Desvest	0.0	0.041	0.185	0.473	0.028	0.000	0.000	2.843E-05	
C.V. (%)	1.3	0.16	0.3	1.2	7.637	0.322	1.241	7.637E+00	

Cuadro 23. Resultados para MAC de CAL con acondicionamiento de 5 días a 85 °C.

Espécimen	Vacios de aire (%)	Temperatura (°C)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ·mm)	Espesor (m)	Ranura (m)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ)	Tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral (J _c) (kJ/m ²)
2-4	3.5	25.02	57.69	24.70	0.813	0.058	0.025	8.130E-04	0.503
6-4	3.5	25.00	57.66	25.21	0.815	0.058	0.025	8.150E-04	
7-3	3.5	24.99	57.40	24.94	0.688	0.057	0.025	6.880E-04	
8-3	3.7	25.00	57.73	24.75	0.721	0.058	0.025	7.210E-04	
Promedio	3.5	25.00	57.62	24.90	0.769	0.058	0.025	7.593E-04	
Desvest	0.1	0.01	0.15	0.23	0.065	0.000	0.000	6.464E-05	
C.V. (%)	2.3	0.05	0.26	0.93	8.514	0.259	0.928	8.514E+00	
1-3	3.8	25.02	57.59	31.73	0.602	0.058	0.032	6.020E-04	
1-4	3.6	25.03	57.32	31.68	0.687	0.057	0.032	6.870E-04	
2-1	3.6	25.02	57.49	31.70	0.428	0.057	0.032	4.280E-04	
3-3	3.7	25.01	57.6	31.57	0.514	0.058	0.032	5.140E-04	
Promedio	3.7	25.02	57.50	31.67	0.558	0.058	0.032	5.578E-04	
Desvest	0.1	0.01	0.13	0.07	0.112	0.000	0.000	1.117E-04	
C.V. (%)	2.6	0.03	0.23	0.22	20.022	0.226	0.220	2.002E+01	
1-1	3.9	25.04	57.35	37.57	0.373	0.057	0.038	3.730E-04	
2-3	3.9	25.02	57.49	37.42	0.418	0.057	0.037	4.180E-04	
7-2	4.0	24.98	57.59	38.20	0.366	0.058	0.038	3.660E-04	
7-4	3.9	25.00	57.72	37.79	0.393	0.058	0.038	3.930E-04	
Promedio	3.9	25.01	57.54	37.75	0.388	0.058	0.038	3.875E-04	
Desvest	0.1	0.026	0.156	0.339	0.023	0.000	0.000	2.333E-05	
C.V. (%)	1.3	0.10	0.3	0.9	6.021	0.272	0.899	6.021E+00	

Cuadro 24. Resultados para MAC de CAL con acondicionamiento de 3 días a 90 °C.

Especimen	Vacios de aire (%)	Temperatura (°C)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ/mm)	Espesor (m)	Ranura (m)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ)	Tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral (J _c) (kJ/m ²)
4-1	3.5	25.02	57.38	24.89	0.696	0.057	0.025	6.980E-04	0.492
5-2	3.5	24.98	57.85	24.59	0.580	0.058	0.025	5.800E-04	
9-1	3.5	24.96	57.06	24.68	0.630	0.057	0.025	6.300E-04	
9-4	3.6	25.01	57.59	25.01	0.676	0.058	0.025	6.760E-04	
Promedio	3.5	24.99	57.42	24.79	0.646	0.057	0.025	6.455E-04	
Desvest	0.1	0.03	0.27	0.19	0.052	0.000	0.000	5.168E-05	
C.V. (%)	1.4	0.11	0.47	0.77	8.005	0.465	0.774	8.005E+00	
4-4	3.6	24.99	57.61	31.72	0.470	0.058	0.032	4.700E-04	
5-1	3.6	25.00	57.58	31.63	0.412	0.058	0.032	4.120E-04	
6-3	3.6	25.00	57.14	31.61	0.431	0.057	0.032	4.310E-04	
8-2	3.8	24.99	56.89	31.46	0.418	0.057	0.031	4.180E-04	
Promedio	3.7	25.00	57.31	31.61	0.433	0.057	0.032	4.328E-04	
Desvest	0.1	0.01	0.35	0.11	0.026	0.000	0.000	2.607E-05	
C.V. (%)	2.7	0.02	0.61	0.34	6.024	0.611	0.341	6.024E+00	
4-2	3.9	25.01	57.11	37.64	0.289	0.057	0.038	2.890E-04	
5-3	3.8	25.03	57.43	37.81	0.292	0.057	0.038	2.920E-04	
8-4	3.8	25.03	57.43	37.81	0.282	0.057	0.038	2.620E-04	
9-3	3.7	25.03	57.34	37.84	0.272	0.057	0.038	2.720E-04	
Promedio	3.8	25.03	57.33	37.78	0.279	0.057	0.038	2.788E-04	
Desvest	0.1	0.010	0.151	0.091	0.014	0.000	0.000	1.422E-05	
C.V. (%)	2.1	0.04	0.3	0.2	5.102	0.264	0.241	5.102E+00	

Cuadro 25. Resultados para MAC de CAL con acondicionamiento UV durante 11,5 días.

Especimen	Vacios de aire (%)	Temperatura (°C)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ/mm)	Espesor (m)	Ranura (m)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ)	Tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral (J _c) (kJ/m ²)
10-3	4.4	24.81	57.42	25.23	0.774	0.057	0.025	7.740E-04	0.542
11-1	4.5	24.96	57.28	25.80	0.699	0.057	0.026	6.990E-04	
11-3	4.3	24.97	57.24	24.82	0.631	0.057	0.025	6.310E-04	
12-1	4.3	24.95	57.48	25.08	0.622	0.057	0.025	6.220E-04	
Promedio	4.4	24.92	57.35	25.18	0.682	0.057	0.025	6.815E-04	
Desvest	0.1	0.08	0.12	0.49	0.071	0.000	0.000	7.960E-05	
C.V. (%)	2.2	0.30	0.21	1.93	10.359	0.206	1.932	1.036E+01	
10-1	4.0	24.82	57.59	31.59	0.585	0.058	0.032	5.850E-04	
10-4	4.0	24.75	57.39	32.19	0.420	0.057	0.032	4.200E-04	
11-2	3.9	24.88	57.48	32.24	0.515	0.057	0.032	5.150E-04	
12-3	4.1	24.88	57.04	31.60	0.436	0.057	0.032	4.360E-04	
Promedio	4.0	24.83	57.38	31.91	0.484	0.057	0.032	4.840E-04	
Desvest	0.1	0.06	0.24	0.36	0.068	0.000	0.000	6.812E-05	
C.V. (%)	2.0	0.25	0.41	1.12	14.075	0.415	1.124	1.407E+01	
10-2	3.6	24.93	57.61	37.57	0.211	0.058	0.038	2.110E-04	
11-4	3.6	24.87	57.47	37.96	0.316	0.057	0.038	3.160E-04	
12-2	3.5	24.94	57.64	38.43	0.248	0.058	0.038	2.480E-04	
12-4	3.5	24.77	57.66	38.48	0.322	0.058	0.038	3.220E-04	
Promedio	3.6	24.88	57.60	38.11	0.274	0.058	0.038	2.743E-04	
Desvest	0.1	0.078	0.086	0.429	0.054	0.000	0.000	5.389E-05	
C.V. (%)	1.6	0.31	0.1	1.1	19.650	0.149	1.127	1.965E+01	

Cuadro 26. Resultados para MAC de SBS con acondicionamiento de 5 días a 85 °C.

Espécimen	Vacios de aire (%)	Temperatura (°C)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ-mm)	Espesor (m)	Ranura (m)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ)	Tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-Integral (J _c) (kJ/m ²)
1-1	3.9	25.11	57.49	24.84	0.770	0.057	0.025	7.700E-04	0.577
1-2	3.9	25.04	57.57	24.29	0.768	0.058	0.024	7.680E-04	
1-3	3.9	24.98	57.54	25.06	0.917	0.058	0.025	9.170E-04	
1-4	3.8	24.97	57.46	24.82	0.738	0.057	0.025	7.380E-04	
Promedio	3.9	25.03	57.52	24.75	0.798	0.058	0.025	7.983E-04	
Desvest	0.1	0.06	0.05	0.33	0.081	0.000	0.000	8.051E-05	
C.V. (%)	1.3	0.26	0.09	1.32	10.086	0.086	1.321	1.009E+01	
2-4	4.0	25.02	57.81	32.33	0.555	0.058	0.032	5.550E-04	
3-2	4.1	25.02	57.51	32.27	0.505	0.058	0.032	5.050E-04	
3-3	3.8	25.02	57.58	31.59	0.471	0.058	0.032	4.710E-04	
3-4	3.8	25.00	57.10	32.48	0.605	0.057	0.032	6.050E-04	
Promedio	3.9	25.02	57.50	32.17	0.534	0.057	0.032	5.340E-04	
Desvest	0.2	0.01	0.29	0.39	0.059	0.000	0.000	5.857E-05	
C.V. (%)	3.8	0.04	0.51	1.23	10.969	0.512	1.228	1.097E+01	
2-1	3.5	25.00	57.60	38.27	0.339	0.058	0.038	3.390E-04	
2-2	3.5	25.02	57.51	38.06	0.370	0.058	0.038	3.700E-04	
2-3	3.7	25.01	57.70	37.66	0.381	0.058	0.038	3.810E-04	
3-1	3.6	25.00	57.44	38.74	0.310	0.057	0.039	3.100E-04	
Promedio	3.6	25.01	57.56	38.18	0.350	0.058	0.038	3.500E-04	
Desvest	0.1	0.010	0.113	0.450	0.032	0.000	0.000	3.205E-05	
C.V. (%)	2.7	0.04	0.2	1.2	9.158	0.196	1.178	9.158E+00	

Cuadro 27. Resultados para MAC de SBS con acondicionamiento de 3 días a 85 °C.

Espécimen	Vacios de aire (%)	Temperatura (°C)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ-mm)	Espesor (m)	Ranura (m)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ)	Tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-Integral (J _c) (kJ/m ²)
5-2	4.5	25.01	57.41	24.24	1.153	0.057	0.024	1.153E-03	0.745
5-3	4.4	25.01	57.30	24.32	0.709	0.057	0.024	7.090E-04	
5-4	4.5	25.00	57.29	24.39	0.972	0.057	0.024	9.720E-04	
6-2	4.4	25.01	57.77	24.44	0.946	0.058	0.024	9.460E-04	
Promedio	4.5	25.01	57.44	24.35	0.945	0.057	0.024	9.450E-04	
Desvest	0.1	0.01	0.23	0.09	0.182	0.000	0.000	1.823E-04	
C.V. (%)	1.3	0.02	0.39	0.36	19.290	0.392	0.357	1.929E+01	
4-1	4.3	25.02	57.34	31.89	0.584	0.057	0.032	5.840E-04	
5-1	4.2	25.08	57.39	31.35	0.507	0.057	0.031	5.070E-04	
6-3	4.0	25.01	57.33	31.73	0.601	0.057	0.032	6.010E-04	
6-4	4.1	24.96	57.31	31.62	0.577	0.057	0.032	5.770E-04	
Promedio	4.2	25.02	57.34	31.65	0.567	0.057	0.032	5.673E-04	
Desvest	0.1	0.05	0.03	0.23	0.041	0.000	0.000	4.141E-05	
C.V. (%)	3.1	0.20	0.06	0.72	7.300	0.059	0.718	7.300E+00	
4-2	3.6	25.02	57.30	37.67	0.327	0.057	0.038	3.270E-04	
4-3	3.7	25.01	57.54	38.41	0.363	0.058	0.038	3.630E-04	
4-4	3.5	25.01	57.52	37.76	0.337	0.058	0.038	3.370E-04	
6-1	3.8	25.01	57.56	38.13	0.423	0.058	0.038	4.230E-04	
Promedio	3.7	25.01	57.48	37.99	0.363	0.057	0.038	3.625E-04	
Desvest	0.1	0.005	0.121	0.342	0.043	0.000	0.000	4.309E-05	
C.V. (%)	3.5	0.02	0.2	0.9	11.888	0.211	0.901	1.189E+01	

Cuadro 28. Resultados para MAC de SBS con acondicionamiento UV durante 11,5 días.

Espécimen	Vacios de aire (%)	Temperatura (°C)	Espesor (mm)	Ranura (mm)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ-mm)	Espesor (m)	Ranura (m)	Energía de deformación a la falla (U) (kJ)	Tasa de alivio de la energía de deformación crítica J-integral (J _c) (kJ/m ²)
7-1	4.3	24.98	57.44	24.95	0.731	0.057	0.025	7.310E-04	0.608
8-3	4.5	25.03	57.27	24.80	1.020	0.057	0.025	1.020E-03	
8-4	4.4	24.99	57.20	24.89	0.861	0.057	0.025	8.610E-04	
9-2	4.3	25.04	57.16	24.64	0.753	0.057	0.025	7.530E-04	
Promedio	4.4	25.01	57.27	24.82	0.841	0.057	0.025	8.413E-04	
Desvest	0.1	0.03	0.12	0.13	0.132	0.000	0.000	1.320E-04	
C.V. (%)	2.2	0.12	0.22	0.54	15.693	0.216	0.544	1.569E+01	
7-3	4.1	24.88	57.17	31.71	0.608	0.057	0.032	6.080E-04	
7-4	4.1	25.11	57.29	32.02	0.463	0.057	0.032	4.630E-04	
9-3	3.9	25.14	57.37	31.91	0.723	0.057	0.032	7.230E-04	
9-4	4.2	24.99	56.97	31.57	0.561	0.057	0.032	5.610E-04	
Promedio	4.1	25.03	57.20	31.80	0.589	0.057	0.032	5.888E-04	
Desvest	0.1	0.12	0.17	0.20	0.106	0.000	0.000	1.080E-04	
C.V. (%)	3.1	0.48	0.30	0.63	18.340	0.304	0.633	1.834E+01	
7-2	3.7	24.85	57.35	37.95	0.359	0.057	0.038	3.590E-04	
8-1	3.9	24.97	57.32	37.71	0.391	0.057	0.038	3.910E-04	
8-2	3.6	24.90	57.28	37.67	0.353	0.057	0.038	3.530E-04	
9-1	3.6	25.10	57.27	37.67	0.464	0.057	0.038	4.640E-04	
Promedio	3.7	24.96	57.31	37.75	0.392	0.057	0.038	3.918E-04	
Desvest	0.1	0.108	0.037	0.135	0.051	0.000	0.000	5.097E-05	
C.V. (%)	3.8	0.43	0.1	0.4	13.012	0.065	0.357	1.301E+01	