

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**

**Comparación de procedimientos de ensayo para determinar la resistencia  
al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en caliente**

**Proyecto de Graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Andrey Gerardo Arrieta Méndez**

Directora del proyecto de Graduación:

**Ing. Adriana Vargas Nordcbeck Ph. D.**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

## Hoja de aprobación


### Tribunal de graduación:

  
\_\_\_\_\_  
**Directora:** Ing. Adriana Vargas Nordcbeck Ph. D.

  
\_\_\_\_\_  
**Asesor:** Ing. José Pablo Aguiar Moya Ph. D.

  
\_\_\_\_\_  
**Asesor:** Ing. Fabricio Leiva Villacorta Ph. D.

### Estudiante:

  
\_\_\_\_\_  
**Estudiante:** Andrey Gerardo Arrieta Méndez

## Derechos de autor

**Fecha:** 2016, Junio, 27

El suscrito, **Andrey Gerardo Arrieta Méndez**, cédula **2-0698-0125**, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B00636**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Comparación de procedimientos de ensayo para determinar la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en caliente**, bajo la Dirección de la **Ing. Adriana Vargas Nordcbeck 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 el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

A mi familia, en especial a mis padres, por ser una fuente de inspiración y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

## **Reconocimientos**

Al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) por brindar las herramientas, los recursos y la capacitación necesaria para realizar el proyecto final de graduación.

A mi comité asesor, los ingenieros Adriana Vargas, Fabricio Leiva y José Pablo Aguiar por la ayuda y paciencia que tuvieron durante el proceso llevado a cabo para la realización del proyecto de graduación.

Al personal del laboratorio de mezclas asfálticas y demás laboratorios utilizados, por su atención y ayuda prestada durante la realización de los ensayos del proyecto. A los ingenieros Fabián, Mónica y Andrea y a los técnicos Juan Carlos, Walter, José, Mario, Ronald y Alex. En especial, un agradecimiento al técnico de laboratorio José Sanabria por su ayuda, amistad y consejos brindados a lo largo del proyecto.

A todos los que fueron compañeros por circunstancia y ahora amigos por elección.

A mis compañeros asistentes del LanammeUCR. En especial a los asistentes y amigos Andrés y Mariam por toda su ayuda, compañía y por hacer que las labores realizadas se llevaran a cabo de una manera más amena.

A los que realizaron proyectos de graduación en los distintos laboratorios del LanammeUCR durante el proceso de realización de mi proyecto. En especial a mis amigos Miguel, Mariam, Daniela, Jorge, Mario, Yari y los demás que realizaron labores de sus proyectos en los distintos laboratorios mientras realice mi trabajo, por su compañía y ayuda incondicional.

# Índice

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.1.1 Descripción del problema .....	1
1.1.2 Importancia .....	2
1.1.3 Antecedentes .....	4
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo general .....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Delimitación del problema.....	6
1.3.1 Alcances .....	6
1.3.2 Limitaciones.....	8
1.4 Metodología.....	10
1.4.1 Fase I. Revisión Bibliográfica .....	11
1.4.2 Fase II. Ensayos de Laboratorio .....	11
1.4.3 Fase III. Análisis.....	11
Capítulo 2. Marco teórico .....	13
2.1 Fatiga .....	13
2.2 Modelos de predicción de agrietamiento por fatiga en capas de Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) .....	15
2.2.1 Modelos de iniciación de grietas.....	15
2.2.2 Modelos de propagación de grietas .....	18
2.3 Energía disipada .....	19
2.4 Modelo Viscoelástico de Daño Continuo .....	20
2.5 Fractura .....	22

2.3.1 Energía de fractura ( $G_c$ ).....	23
2.3.2 Factor de intensidad de esfuerzo (K) .....	25
2.3.3 $J_c$ -integral.....	25
2.6 Ensayos de fatiga y fractura en MAC.....	26
2.6.1 Pruebas de laboratorio a esfuerzo y deformación constante .....	27
2.6.2 Variables que afectan la resistencia a la fatiga de las MAC.....	28
2.6.3 Ensayo de viga a flexión en 4 puntos.....	30
2.6.4 Ensayo de tensión directa.....	34
2.6.5 Ensayo de Tensión Directa Repetida.....	36
2.6.6 Ensayo de Tensión Indirecta .....	38
2.6.7 Ensayo de Tensión Indirecta Repetida .....	40
2.6.8 Flexión Semicircular .....	40
2.6.9 Flexión Semicircular Repetida .....	44
2.6.10 Ensayo Overlay.....	47
2.6.11 Tensión en especímenes con forma de disco .....	53
2.7 Resumen.....	54
Capítulo 3. Metodología experimental .....	56
3.1 Diseños de MAC.....	56
3.1.1 Materiales utilizados en los diseños de MAC .....	57
3.2 Elección de ensayos evaluados.....	59
3.3 Preparación de especímenes de ensayo .....	61
3.3.1 Graduaciones de los agregados.....	61
3.3.2 Mezclado, envejecimiento en horno a corto plazo y compactación de especímenes .....	61
3.3.3 Procedimiento de corte de especímenes .....	63

3.3.4	Análisis volumétrico de especímenes .....	66
3.3.5	Envejecimiento de especímenes en horno a largo plazo .....	67
3.4	Procedimientos de ensayo .....	67
3.4.1	Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos .....	67
3.4.2	Ensayo Overlay .....	69
3.4.3	Ensayo de flexión semicircular repetida (RSCB) .....	71
Capítulo 4.	Resultados y análisis .....	75
4.1	Análisis general de los porcentajes de vacíos de aire .....	76
4.1.1	Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos .....	78
4.1.2	Ensayo Overlay .....	80
4.1.3	Ensayo RSCB.....	83
4.2	Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos .....	85
4.2.1	Deformación controlada de 600 $\mu$ s.....	89
4.2.2	Deformación controlada de 400 $\mu$ s.....	96
4.3	Ensayo Overlay.....	104
4.3.1	Grupo 1 - Especímenes sin envejecimiento en horno a largo plazo.....	104
4.3.2	Grupo 2 - Especímenes con envejecimiento en horno a largo plazo.....	108
4.3.3	Comparación de resultados de ensayos Overlay (Grupo 1 y Grupo 2).....	117
4.4	Ensayo a flexión semicircular repetida (RSCB) .....	119
4.4.1	Etapa I - Definición de carga, ensayo SCB .....	119
4.4.2	Etapa II- Ensayo RSCB.....	123
4.5	Comparación de resultados entre ensayos.....	128
4.5.1	Comparación de resultados de carga y rigidez.....	129
4.5.2	Comparación de resultados de fatiga.....	133
4.6	Modelos de predicción .....	143



4.6.1 Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos .....	145
4.6.2 Ensayo Overlay .....	148
4.6.3 Resumen .....	149
4.7 Comparación de métodos de ensayo.....	150
4.8 Comparación de criterios de análisis del comportamiento por fatiga de MAC .....	156
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones .....	160
5.1 Conclusiones .....	160
5.2 Recomendaciones .....	162
Capítulo 6. Bibliografía.....	166
Anexo A. Resultados individuales de los ensayos.....	A-1

## Índice de figuras

Figura 1-1. Metodología de trabajo .....	10
Figura 2-1. Fases de degradación de fatiga .....	14
Figura 2-2. Modos de aplicación de carga de fractura .....	18
Figura 2-3. Determinación de la energía total de fractura .....	24
Figura 2-4. Determinación de la energía hasta la carga máxima .....	25
Figura 2-5. Fenómeno de deformación y esfuerzo constante .....	28
Figura 2-6. Ensayo de viga a flexión en cuatro puntos .....	30
Figura 2-7. Configuración del ensayo de vigas a flexión y dimensiones del espécimen .....	31
Figura 2-8. Curva típica del método del Rowe y Bouldin.....	33
Figura 2-9. Curva de deterioro típica del ensayo de vigas a flexión .....	33
Figura 2-10. Configuración del ensayo de fatiga a tensión directa.....	34
Figura 2-11. Configuración de carga del ensayo de fatiga a tensión directa .....	34
Figura 2-12. Ensayo de Tensión Indirecta.....	38
Figura 2-13. Ensayo de flexión semicircular .....	41
Figura 2-14. Curvas típicas de carga deformación del ensayo SCB .....	43
Figura 2-15. Curva típica del deterioro del espécimen del ensayo RSCB .....	45
Figura 2-16. Curva inversa del deterioro de los especímenes del ensayo RSCB .....	46
Figura 2-17. Curva para determinación del criterio de falla adicional del ensayo SCBR.....	46
Figura 2-18. Ensayo Overlay .....	48
Figura 2-19. Bases metálicas para pegar especímenes del ensayo Overlay .....	48
Figura 2-20. Gráficos de carga-número de ciclos: número de ciclos en puntos adicionales de reducción de carga.....	50
Figura 2-21. Determinación del punto de falla con el método NLC .....	51
Figura 2-22. Agrietamiento del espécimen en diferentes momentos.....	51

Figura 2-23. Puntos de falla y estados presentados en la curva de carga .....	52
Figura 2-24. Especímenes del ensayo DC(T) .....	53
Figura 2-25. Configuración experimental del ensayo DC(T) .....	54
Figura 3-1. Curva granulométrica usada en la mezclas de 9,5 mm TMN .....	58
Figura 3-2. Curva granulométrica usada en la mezclas de 12,5 mm TMN .....	59
Figura 3-3. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo de vigas a flexión .....	63
Figura 3-4. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo Overlay.....	64
Figura 3-5. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo RSCB.....	65
Figura 3-6. Aparato de flexión en 4 puntos.....	68
Figura 3-7. Espécimen pegado a las placas metálicas de montaje del ensayo .....	69
Figura 3-8. Montaje del ensayo Overlay en la AMPT .....	70
Figura 3-9. Configuración de los ensayos RSCB y SCB .....	72
Figura 4-1. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Rigidez Inicial (600 $\mu$ s).....	91
Figura 4-2. Resultados de fatiga del ensayo de vigas a flexión (600 $\mu$ s) .....	94
Figura 4-3. Gráfico del ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (600 $\mu$ s).....	95
Figura 4-4. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Rigidez Inicial (400 $\mu$ s).....	98
Figura 4-5. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto al parámetro N(50% RI) (400 $\mu$ s) .....	100
Figura 4-6. Resultados de fatiga del ensayo de vigas a flexión (400 $\mu$ s) .....	102
Figura 4-7. Gráfico del ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (400 $\mu$ s).....	103
Figura 4-8. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Rigidez Inicial (Grupo 1-OT).....	106

Figura 4-9. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Carga Máxima (Grupo 2-OT).....	110
Figura 4-10. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto al parámetro Nmax (Grupo 2-OT) .....	112
Figura 4-11. Resultados de fatiga del ensayo Overlay .....	115
Figura 4-12. Gráfico del ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (400 $\mu$ s) .....	116
Figura 4-13. Gráfico del ranking de las Cargas Máximas obtenidas en los grupos de ensayos Overlay .....	118
Figura 4-14. Gráfico del ranking de los criterios de análisis de fatiga usados en los grupos de ensayos Overlay .....	119
Figura 4-15. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Carga Máxima (SCB).....	121
Figura 4-16. Resultados de fatiga del ensayo RSCB .....	126
Figura 4-17. Gráfico del ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (RSCB y SCB).....	127
Figura 4-18. Gráfico del ranking de los resultados de carga máxima y rigidez de los ensayos .....	132
Figura 4-19. Gráfico del ranking de los resultados de fatiga de los ensayos .....	137
Figura 4-20. Gráfico del ranking de los ensayos Overlay, RSCB y SCB .....	138
Figura 4-21. Gráfico del ranking de los ensayos de vigas a flexión y SCB.....	139
Figura 4-22. Comparación del N(50% RI) calculado y N(50% RI) medido en el ensayo .	146
Figura 4-23. Comparación del N(RB) calculado y N(RB) medido en el ensayo .....	146
Figura 4-24. Comparación del N(50% RI) calculado y N(50% RI) medido en el ensayo (excluyendo la mezcla 9,5 SBS+MB (400 $\mu$ s)).....	147
Figura 4-25. Comparación del N(RB) calculado y N(RB) medido en el ensayo (excluyendo la mezcla 9,5 SBS+MB (400 $\mu$ s)).....	147

Figura 4-26. Comparación del $N_{maxOT}$ calculado y $N_{maxOT}$ medido en el ensayo .....	149
Figura 4-27. Comparación del N(NLC) calculado y N(NLC) medido en el ensayo.....	149
Figura 4-28. Espécimen del ensayo Overlay al terminar la prueba .....	159
Figura 4-29. Espécimen del ensayo RSCB al terminar la prueba.....	159
Figura 5-1. Afectación del procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo .....	163

## Índice de cuadros

Cuadro 2-1. Factores que afectan la resistencia al daño por fatiga de MAC.....	29
Cuadro 2-2. Parámetros recomendados para el ensayo de fractura a flexión semicircular	42
Cuadro 2-3. Dimensiones recomendadas de los especímenes del ensayo DC(T).....	53
Cuadro 3-1. Características generales de las MAC .....	57
Cuadro 3-2. Granulometría utilizada en las mezclas de 9,5 mm TMN.....	58
Cuadro 3-3. Granulometría utilizada en las mezclas de 12,5 mm TMN.....	59
Cuadro 3-4. Dimensiones y tolerancias de los especímenes de ensayo .....	66
Cuadro 3-5. Parámetros de ensayo .....	74
Cuadro 4-1. Porcentaje de vacíos de aire promedio de las vigas de un mismo bloque de fatiga .....	78
Cuadro 4-2. Resultados del análisis ANCOVA del ensayo de vigas a flexión.....	80
Cuadro 4-3. Porcentaje de vacíos de aire promedio por tipo de MAC (Grupo 1 – OT) .....	81
Cuadro 4-4. Porcentaje de vacíos de aire promedio por tipo de MAC (Grupo 2 - OT) .....	82
Cuadro 4-5. Resultados del análisis ANCOVA del ensayo Overlay.....	82
Cuadro 4-6. Porcentaje de vacíos de aire promedio por tipo de MAC.....	83
Cuadro 4-7. Porcentaje promedio de vacíos de aire obtenidos para los especímenes del ensayo RSCB .....	84
Cuadro 4-8. Resultados del análisis ANCOVA de los ensayos SCB y RSCB .....	84
Cuadro 4-9. Número de ciclos obtenidos para las MAC aplicando deformaciones de 600 $\mu$ s y 400 $\mu$ s.....	85
Cuadro 4-10. Porcentaje de la Rigidez Inicial encontrado para el criterio de falla de Rowe y Bouldin.....	86
Cuadro 4-11. Rigidez Inicial de las MAC analizadas.....	87
Cuadro 4-12. Resultados del análisis estadístico usando la Rigidez Inicial como variable respuesta .....	88

Cuadro 4-13. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Rigidez Inicial .....	88
Cuadro 4-14. Análisis estadístico usando la Rigidez Inicial como variable respuesta y excluyendo el Tipo de mezcla SBS+CAL .....	88
Cuadro 4-15. Análisis estadístico usando la Rigidez Inicial como variable respuesta para las mezclas 9,5 SBS+CAL y 12,5 SBS+CAL .....	89
Cuadro 4-16. Resultados del ensayo de vigas a flexión usando una deformación de 600 $\mu$ s .....	90
Cuadro 4-17. Análisis estadístico utilizando la Rigidez Inicial como variable respuesta (600 $\mu$ s).....	91
Cuadro 4-18. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Rigidez Inicial (600 $\mu$ s).....	92
Cuadro 4-19. Clasificación de mezclas según la Rigidez Inicial (600 $\mu$ s).....	92
Cuadro 4-20. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(50% RI) (600 $\mu$ s)..	92
Cuadro 4-21. Clasificación de mezclas según el parámetro N (50% RI).....	93
Cuadro 4-22. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(Rowe y Bouldin) (600 $\mu$ s).....	93
Cuadro 4-23. Clasificación de mezclas según el parámetro N (Rowe y Bouldin) (600 $\mu$ s) .	93
Cuadro 4-24. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (600 $\mu$ s) .....	95
Cuadro 4-25. Diferencias de orden obtenidas para los resultados de ensayo (600 $\mu$ s) .....	96
Cuadro 4-26. Resultados del ensayo de vigas a flexión usando una deformación de 400 $\mu$ s .....	96
Cuadro 4-27. Análisis estadístico utilizando la Rigidez Inicial como variable respuesta (400 $\mu$ s).....	97
Cuadro 4-28. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Rigidez Inicial (400 $\mu$ s).....	98
Cuadro 4-29. Clasificación para la combinación de factores según la Rigidez Inicial (400 $\mu$ s) .....	99
Cuadro 4-30. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(50% RI) (400 $\mu$ s)..	99

Cuadro 4-31. Clasificación de mezclas según el parámetro N (50% RI) (400 $\mu$ s).....	100
Cuadro 4-32. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(Rowe y Bouldin) (400 $\mu$ s).....	101
Cuadro 4-33. Clasificación de mezclas según el parámetro N (Rowe y Bouldin) (400 $\mu$ s)	101
Cuadro 4-34. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (400 $\mu$ s) .....	102
Cuadro 4-35. Diferencias de orden obtenidas para los resultados de ensayo (400 $\mu$ s) ...	103
Cuadro 4-36. Resultados del grupo 1 de ensayos Overlay .....	104
Cuadro 4-37. Análisis estadístico utilizando la carga máxima como variable respuesta (Grupo 1-OT).....	105
Cuadro 4-38. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Carga Máxima (Grupo 1-OT) .....	106
Cuadro 4-39. Clasificación de mezclas de acuerdo con el valor de la carga máxima (Grupo 1-OT).....	107
Cuadro 4-40. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (Grupo 1-OT).....	108
Cuadro 4-41. Resultados del grupo 2 de ensayos Overlay .....	108
Cuadro 4-42. Análisis estadístico utilizando la carga máxima como variable respuesta (Grupo 2-OT).....	110
Cuadro 4-43. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Carga Máxima (Grupo 2-OT) .....	111
Cuadro 4-44. Clasificación de mezclas de acuerdo con el valor de la carga máxima (Grupo 2-OT).....	111
Cuadro 4-45. Resultados del análisis estadístico para el parámetro Nmax (Grupo 2-OT)	111
Cuadro 4-46. Clasificación para el Tipo de mezcla según el parámetro Nmax (Grupo 2-OT) .....	112
Cuadro 4-47. Clasificación de mezclas según el parámetro Nmax (Grupo 2-OT).....	113



Cuadro 4-48. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(NLC) (Grupo 2-OT)	113
Cuadro 4-49. Clasificación para el Tipo de mezcla según el parámetro N(NLC) (Grupo 2-OT)	113
Cuadro 4-50. Clasificación de mezclas según el parámetro N(NLC) (Grupo 2-OT)	114
Cuadro 4-51. Análisis estadístico para el porcentaje de reducción de carga NLC (Grupo 2-OT)	114
Cuadro 4-52. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (Grupo 2-OT)	115
Cuadro 4-53. Diferencias de orden obtenidas para los resultados del Grupo 2 del ensayo Overlay	116
Cuadro 4-54. Comparación de Cargas Máximas obtenidas en los ensayos Overlay	117
Cuadro 4-55. Comparación de criterios de análisis de fatiga usados en los grupos de ensayo Overlay	118
Cuadro 4-56. Resultados obtenidos en el ensayo SCB	120
Cuadro 4-57. Análisis estadístico utilizando la carga máxima como variable respuesta (SCB)	121
Cuadro 4-58. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Carga Máxima (SCB)	122
Cuadro 4-59. Clasificación de mezclas de acuerdo con el valor de la carga máxima (SCB)	122
Cuadro 4-60. Resultados del análisis estadístico para la energía de fractura (SCB)	123
Cuadro 4-61. Clasificación de mezclas de acuerdo con el valor de la energía de fractura (SCB)	123
Cuadro 4-62. Resultados del ensayo RSCB	124
Cuadro 4-63. Análisis estadístico utilizando el parámetro Nmax como variable respuesta (RSCB)	124
Cuadro 4-64. Clasificación de mezclas de acuerdo con el parámetro Nmax (RSCB)	125

Cuadro 4-65. Análisis estadístico utilizando el parámetro N(adicional) como variable respuesta (RSCB).....	125
Cuadro 4-66. Clasificación de mezclas de acuerdo con el parámetro N(adicional) (RSCB) .....	125
Cuadro 4-67. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (RSCB y SCB) .....	126
Cuadro 4-68. Diferencias de orden obtenidas para los resultados de ensayo (RSCB y SCB) .....	127
Cuadro 4-69. Resultados de carga máxima y rigidez de los ensayos .....	129
Cuadro 4-70. Rangos de los coeficientes de variación de la carga máxima y rigidez de los ensayos.....	129
Cuadro 4-71. Resumen de los análisis estadísticos realizados usando la carga o rigidez como variable respuesta y las variables explicativas TMN y Tipo de mezcla .....	130
Cuadro 4-72. Resumen de los análisis estadísticos realizados usando la carga o rigidez como variable respuesta y la combinación de variables explicativas (Tipo de Mezcla (TMN))...	131
Cuadro 4-73. Ranking de los resultados de carga y rigidez de los ensayos.....	131
Cuadro 4-74. Resultados de fatiga de los ensayos.....	133
Cuadro 4-75. Rangos de los coeficientes de variación de los resultados de fatiga de los ensayos.....	134
Cuadro 4-76. Resumen de los análisis estadísticos realizados usando los resultados de fatiga como variable respuesta y las variables explicativas TMN y Tipo de mezcla .....	134
Cuadro 4-77. Resumen de los análisis estadísticos realizados usando los resultados de fatiga como variable respuesta y la combinación de variables explicativas (Tipo de Mezcla (TMN)) .....	135
Cuadro 4-78. Ranking de los resultados de fatiga de los ensayos .....	136
Cuadro 4-79. Diferencias de orden entre criterios de falla de los ensayos.....	137
Cuadro 4-80. Promedio de orden de las MAC para todos los ensayos.....	141

Cuadro 4-81. Tiempos de ensayo (minutos) requeridos para la obtención de los resultados de los ensayos .....	142
Cuadro 4-82. Modelos obtenidos para a predicción de la vida de fatiga del ensayo de vigas a flexión .....	145
Cuadro 4-83. Resumen de parámetros de los modelos de predicción para el ensayo de vigas a flexión .....	145
Cuadro 4-84. Modelos obtenidos para a predicción de la vida de fatiga del ensayo Overlay .....	148
Cuadro 4-85. Resumen de parámetros de los modelos de predicción para el ensayo Overlay .....	148
Cuadro 4-86. Comparación de métodos de ensayo .....	151
Cuadro 4-87. Comparación de criterios de falla por ensayo .....	156
Cuadro A-1. Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos (600 $\mu$ s) .....	A-1
Cuadro A-2. Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos (400 $\mu$ s) .....	A-2
Cuadro A-3. Ensayo Overlay (Grupo 1).....	A-3
Cuadro A-4. Ensayo SCB.....	A-3
Cuadro A-5. Ensayo Overlay (Grupo 2).....	A-4
Cuadro A-6. Ensayo RSCB.....	A-5

## Resumen

Arrieta Méndez, Andrey Gerardo

Comparación de procedimientos de ensayo para determinar la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en caliente

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

A.G. Arrieta M., 2016

xix, 169, [5]h; ils. col. – 35 refs.

La evaluación del agrietamiento por fatiga en laboratorio permite asegurar y verificar si las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) utilizadas para la construcción de carreteras son resistentes a la fatiga. No hay muchos ensayos de laboratorio estandarizados o con protocolos universalmente adoptados para la evaluación del comportamiento por fatiga.

El objetivo principal de este estudio fue realizar una comparación de procedimientos de ensayo para determinar la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en caliente, para lo cual se realizaron comparaciones y correlaciones con los resultados obtenidos y se determinaron ventajas y desventajas de los ensayos.

Se evaluaron tres ensayos de evaluación por fatiga, el ensayo de vigas a flexión en 4 puntos, el ensayo *Overlay* y el ensayo a flexión semicircular repetida (RSCB). Se utilizaron 4 tipos de mezclas (control, modificada con polímero SBS, modificada con polímero SBS y antidesnudante y modificada con polímero SBS y cal) y dos granulometrías diferentes (9,5 mm y 12,5 mm de tamaño máximo nominal (TMN)).

Los resultados de los ensayos RSCB y *Overlay* muestran una clasificación del comportamiento a la fatiga similar y adecuada según las propiedades de las MAC. Los ensayos de vigas presentan resultados inadecuados en algunas mezclas. El tamaño y forma de los especímenes, la duración y configuración de la prueba y los coeficientes de variación obtenidos son ventajas del ensayo RSCB con respecto a los ensayos *Overlay* y el de vigas.

Los modelos de predicción de los resultados de los ensayos presentan indicadores estadísticos adecuados y por lo tanto constituyen una alternativa de adecuada para la obtención o predicción de resultados y uso en procedimientos de diseño.

Ing. Adriana Vargas Nordcbeck Ph. D.

Escuela de Ingeniería Civil

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Justificación**

#### ***1.1.1 Descripción del problema***

El comportamiento de fatiga de las mezclas asfálticas en caliente (MAC) es uno de los más importantes parámetros en el diseño de pavimentos flexibles, debido a que este daño es uno de los mecanismos de deterioro de la carpeta más frecuente y de mayor afectación. Normalmente la falla en carreras se puede visualizar como grietas longitudinales o como piel de cocodrilo.

El agrietamiento generado produce graves problemas en la superficie de rodadura. Este fenómeno genera pérdida de confort para el usuario, favorece la acumulación de agua en la estructura del pavimento, baches, entre otros problemas, afectando finalmente la vida útil del pavimento. En teoría, si el diseño es adecuado, el agrietamiento por fatiga no debería presentarse hasta que la carretera haya soportado el número de ejes equivalentes para la cual fue diseñada.

Existen diversos métodos de evaluación de fatiga, desarrollados en base a distintos criterios (flexión, tensión directa e indirecta, torsión, entre otros), sin embargo, la validez de los mismos en ocasiones es cuestionable principalmente por variabilidad de datos encontrados en los resultados, limitaciones de los ensayos o por falta de investigación.

En Costa Rica y muchas partes del mundo, el método más utilizado para la evaluación de fatiga en mezclas asfálticas es el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos, descrito en la norma AASTHO T321 (Determinación de la Vida de Fatiga de Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC) Sujeta a Flexotracción con Carga Dinámica). Se han encontrado algunas desventajas del método mencionado, principalmente debido a la duración del mismo (en ocasiones requiere de más de un día de ensayo), especímenes que requieren de mucho material y que necesitan mucho trabajo para su elaboración, entre otros aspectos.

Existe cierta incertidumbre a la hora de predecir la vida de fatiga de las MAC con el criterio de la norma AASTHO T321, pues el criterio de evaluación (50% de reducción de la capacidad máxima, cuando se realiza a un nivel de deformación controlada) es empírico. Existen otras metodologías posibles de evaluación o definición del punto de fatiga a partir de métodos de energía, curvas de esfuerzo deformación, entre otros.

De acuerdo con Pérez et al. (2009), los ensayos a flexión suelen realizarse a deformación controlada. En estos ensayos la amplitud de carga requerida para causar fatiga disminuye con el número de ciclos y se considera que el espécimen ha fallado cuando la rigidez llega a un 50 % de su valor inicial. Dicho criterio de falla es erróneo para mezclas cuya fractura no es frágil dada su flexibilidad, como los son las mezclas con alto contenido de asfalto o modificadas con polímeros (Pérez et al., 2009).

Ante algunas condiciones específicas que dependen del equipo o materiales, otros métodos de evaluación de fatiga tienen similares limitaciones a las mencionadas e inclusive mayores, principalmente a la hora de la generación de resultados.

Algunos métodos como el de fatiga mediante el análisis viscoelástico de daño continuo, el método de ensayo de especímenes a flexión semicirculares (SCB, por sus siglas en inglés, *Semicircular Bending test*), además de otros que se mencionarán posteriormente se han desarrollado en las últimas décadas. La falta de estudios que verifiquen sus resultados e inclusive la falta de información sobre la metodología de aplicación de los ensayos imponen una limitación a su uso.

Uno de los aspectos más importantes a considerar, es que el ensayo de fatiga mediante el procedimiento de la norma AASHTO T321 no es práctico para evaluar el deterioro en campo, principalmente por las dimensiones de los especímenes. El equipo de ensayo es especializado y específico para dicho ensayo y no es accesible para laboratorios que no se dediquen a la investigación.

La normativa del país (Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)) especifica condiciones o requerimientos de mezclas asfálticas Superpave diseñadas para resistir agrietamiento por fatiga. Las condiciones se basan únicamente en el número de ciclos de fatiga obtenidos en el ensayo de la norma AASHTO T321, por lo que no hay versatilidad para la aplicación de otras pruebas de laboratorio.

### **1.1.2 Importancia**

Toda carretera debe estar diseñada y construida para transportar al usuario de manera cómoda y segura. El agrietamiento por fatiga genera condiciones que afectan a la superficie de rodadura y con esto, la comodidad del usuario para transitar. La determinación de la capacidad de fatiga

en mezclas asfálticas ayuda a verificar si las estructuras de pavimento van a ser transitables de manera adecuada en el período de diseño.

Los métodos de diseño de pavimentos más conocidos utilizan parámetros de fatiga para especificar espesores y características de la estructura de pavimento. Métodos como el empírico de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO, por sus siglas en inglés, *American Association of State Highway and Transportation Officials*) utilizan factores de carga de ejes equivalentes basados en criterios de falla por fatiga. El Instituto del Asfalto en su método de diseño utiliza la deformación de la carpeta asfáltica, para evaluar la falla por fatiga. Además, utiliza al igual que la AASHTO factores de carga equivalente.

Más recientemente, el Método Mecánico-Empírico de la AASHTO analiza tanto el comportamiento por fatiga generado desde la superficie de la capa de rodadura, como el que se genera desde abajo hacia arriba sobre la misma. En este método se utilizan factores de daño que dependen del número de repeticiones de carga necesarias para la falla por fatiga, las cuales dependen de las propiedades de los materiales, deformaciones y parámetros calibrados en laboratorio.

Generalmente, los métodos de diseño ya están calibrados con parámetros de fatiga, no obstante, las pruebas de laboratorio son de suma importancia para corroborar los parámetros de diseño y la calidad de las mezclas asfálticas.

En nuestro país, en la sección 4.18 del CR-2010 se especifican los requisitos generales para mezclas bituminosas fabricadas en planta para diferentes usos. Para el caso de resistencia a la fatiga, como ya se mencionó, se especifican los criterios mínimos de diseño y las especificaciones en base al ensayo AASHTO T321.

Debido a la gran importancia de la vida de fatiga en el diseño de mezclas asfálticas y las desventajas del ensayo de la norma AASHTO T321, adquiere importancia la evaluación de resultados de otros métodos que no tienen las desventajas de la prueba mencionada y cuyos resultados sean aplicables a mezclas realizadas con materiales del país. Utilizar MAC modificadas en el análisis permite un análisis más general, al mismo tiempo que se puede identificar la capacidad de los ensayos a evaluar dichas mezclas.

Se hace indispensable buscar y estandarizar otras metodologías de evaluación del daño por fatiga, adicionales a la de la norma AASHTO T321, que sean más sencillas de implementar con especímenes de campo y que faciliten un control de calidad frecuente durante el proceso

constructivo. Utilizar ensayos que se puedan realizar en equipos accesibles para cualquier laboratorio facilitaría procesos de control de calidad y permitiría ampliar y dar mayor versatilidad dentro de la normativa nacional.

Comparar distintos criterios de evaluación de los resultados de los diferentes ensayos de fatiga, con el fin de establecer distintas posibilidades de aplicación, puede permitir disminuir los tiempos de ensayo y aumentar las posibilidades de análisis.

El criterio de evaluación de fatiga de la norma AASHTO T321 es empírico, por lo que se requiere encontrar otro método de análisis alternativo relacionado con alguna propiedad física de la falla por fatiga. Se podrían comparar los resultados y definir si el número de ciclos obtenido cuando se presenta una reducción del 50 % de la Rigidez Inicial es un buen parámetro de evaluación de fatiga.

### ***1.1.3 Antecedentes***

Se realizó una investigación bibliográfica en diversos artículos, investigaciones y proyectos de graduación que describen diversos ensayos de fatiga, además de documentos que presentan comparaciones entre los métodos.

A nivel nacional se encontraron informes del LanammeUCR (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales) orientados a la calibración de modelos a partir de los cuales se puede predecir el desempeño por fatiga de mezclas asfálticas. Se encontraron proyectos de graduación desarrollados sobre la misma línea de investigación que el LanammeUCR. Para la obtención de resultados en estos trabajos se utiliza el método de la norma AASHTO T321.

A nivel internacional hay gran cantidad de documentos que describen metodologías de evaluación de otros ensayos, además del trasfondo teórico detrás de las mismas.

El ensayo de vigas a flexión en cuatro puntos posee diversas investigaciones con varias líneas de estudio. La mayoría de investigaciones de propiedades de mezclas asfálticas que contemplan la predicción del comportamiento por fatiga utilizan este ensayo para la generación de resultados.

De acuerdo a la problemática planteada, Pérez y sus colaboradores (2009) exponen la problemática de utilizar el criterio tradicional de evaluación para la falla por fatiga (50% de la reducción de carga, con respecto a la carga inicial) cuando se utilizan mezclas muy flexibles en



el ensayo de fatiga de viga a cuatro puntos. Otras investigaciones como la de Montazeri (2009) estudian la variabilidad y repetitividad del ensayo de vigas.

Montazeri (2009) realizó una evaluación de los resultados del ensayo de viga a cuatro puntos y la influencia del contenido de asfalto y vacíos de aire en los mismos. Además, describe otros métodos de falla a fatiga como el de tensión indirecta y el *Overlay*.

Un documento de importancia, es el proyecto de graduación realizado por Parker en la Universidad de Texas en San Antonio (2010), donde se evalúan distintos métodos de fractura y fatiga para calificar las mezclas típicas usadas en Texas. En dicho estudio se evalúan algunos métodos como el *Overlay Tester* (OT), Tensión Directa (TD), "*Semicircular Bending*" (SCB) y Tensión Indirecta. Los criterios de evaluación de los ensayos en esta investigación fueron: correlación con el comportamiento de campo, repetitividad y variabilidad, simplicidad, entre otros. Los ensayos fueron orientados a comparar el comportamiento de falla de las mezclas, al mismo tiempo que se comparó los resultados entre ensayos.

Se encuentran investigaciones detalladas que evalúan parámetros de algunos ensayos y la variabilidad de los mismos. Ma (2014) y Walubita et al. (2012) presentan estudios extensos de los parámetros del ensayo *Overlay*, incluyendo la afectación de cada uno en los resultados y distintas maneras de evaluación del método. Nsengiyumva (2015) presenta un análisis orientado a definir los parámetros del ensayo a flexión semicircular que disminuyen los coeficientes de variación en los resultados.

Se encuentran otros artículos donde resumidamente se realizan comparaciones entre ensayos, como del desarrollado por Wu, Huang, & Shu (2014) y el publicado por Di Benedetto, de la Roche, Baaj, Pronk, & Lundstrom (2004). Muchos otros artículos se pueden encontrar, donde se describen resultados y aplicaciones de diferentes ensayos de fatiga. Los documentos más recientes son los que explican y exponen de mejor manera las metodologías de ensayo.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo general***

Comparar procedimientos de ensayo para determinar la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en caliente de tamaños máximos nominales de 9,5 mm y 12,5 mm.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Seleccionar, con base en la revisión bibliográfica, dos ensayos de evaluación de fatiga en laboratorio alternativos al ensayo de vigas a flexión en cuatro puntos.
- Determinar parámetros de evaluación de fatiga en mezclas asfálticas en caliente por medio de ensayos de laboratorio.
- Comparar la clasificación de mezclas asfálticas en caliente obtenida mediante los resultados de los ensayos de laboratorio.
- Correlacionar los parámetros de evaluación de fatiga obtenidos en los ensayos de laboratorio.
- Determinar ventajas y desventajas de los ensayos de evaluación de fatiga.

## **1.3 Delimitación del problema**

### **1.3.1 Alcances**

El presente trabajo se enfocó en la evaluación de la falla por fatiga de mezclas asfálticas en caliente y la comparación de resultados obtenidos para diferentes ensayos. Se utilizaron MAC con granulometrías de 9,5 y 12,5 mm de tamaño máximo nominal (TMN). Únicamente se utilizó una fuente de agregados.

Se evaluaron cuatro tipos de mezclas asfálticas para cada granulometría, una mezcla de control, una modificada con polímero SBS (estireno-butadieno-estireno), una con adición de un producto promotor de adhesión (antidesnudente líquido, Magnabond 2700) y polímero SBS y una última modificada con polímero SBS y cal. En total se evaluaron 8 tipos diferentes de mezclas asfálticas, teniendo en cuenta las dos granulometrías. No se realizó ningún estudio detallado sobre las propiedades del polímero SBS, el antidesnudente líquido y la cal, ni sobre su afectación en las mezclas.

El diseño de cada una de las mezclas asfálticas se estableció bajo la metodología Superpave de acuerdo con lo establecido en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes del MOPT. Los diseños de las mezclas se obtuvieron de investigaciones realizadas en el LanammeUCR. La investigación no contempla la realización de ningún diseño de mezcla ni la corroboración del cumplimiento de ningún parámetro de diseño.

Las proporciones o cantidades de los modificantes utilizados fueron especificadas junto con los diseños de mezclas, por lo que se excluyó del alcance la justificación de las proporciones utilizadas.

Se realizó el ensayo de fatiga por flexión en vigas con el método establecido por la norma AASHTO T321 y según las prácticas comunes aplicadas en el LanammeUCR. Se utilizaron únicamente dos niveles de deformación para cada mezcla (600  $\mu$ s y 400  $\mu$ s).

Se estudiaron varias metodologías de ensayos de fatiga o fractura, con el fin de tener distintas posibilidades de elección para la realización del presente proyecto. Únicamente se realizaron dos ensayos adicionales de evaluación de fatiga (flexión semicircular repetida (RSCB) y *Overlay*), elegidos a partir de la revisión bibliográfica.

La elección de los ensayos adicionales implementados se basó principalmente en la disponibilidad de equipo, software y facilidad de realización de la prueba. Se establecieron metodologías para la realización de especímenes y se implementaron sin conocer la variabilidad del contenido de vacíos obtenidos. En la medida de lo posible se utilizaron 3 especímenes por ensayo. No se repitieron ensayos que generaron resultados insuficientes de análisis (especímenes que no alcanzaron la falla), en dichos casos se excluyeron los especímenes del análisis.

La comparación de resultados 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 en el ensayo de vigas.

El procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo se realizó sin saber la verdadera afectación en cada espécimen. No se sabe cuál es la reducción en la vida de fatiga de las mezclas al someter los especímenes a dicho procedimiento. Para algún tipo de espécimen o mezcla la temperatura del procedimiento de envejecimiento podría no ser adecuada.

Se excluyó del alcance un análisis donde se verifique y comparen los ensayos con especímenes sin el acondicionamiento. No se analiza la posibilidad, se excluye del alcance, de que alguna mezcla pueda ser menos susceptible que otra al proceso del envejecimiento.

El porcentaje de vacíos de aire de todos los especímenes fue determinado antes de aplicar el procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo. No se verificó el porcentaje de vacíos luego de dicho procedimiento.

Aunque se sabe que el porcentaje de vacíos de los especímenes de ensayo puede afectar la viga a fatiga, no se realiza un análisis exhaustivo del efecto de dicho parámetro en los resultados obtenidos por tipo de mezcla, pues es un parámetro difícil de controlar. Únicamente se realiza un estudio del comportamiento general del porcentaje de vacíos de todas las mezclas con respecto a los resultados generales, para notar si siempre se encuentran las mismas tendencias para todas las MAC. Se excluye del alcance cualquier análisis detallado que intente relacionar y ajustar los resultados de cada MAC con el porcentaje de vacíos de aire.

Para los ensayos de fatiga se respeta el porcentaje de vacíos requerido ( $7\% \pm 1\%$ ) en la medida de lo posible y se analizan los resultados de acuerdo al promedio de la vida a fatiga de los especímenes fallados. En los casos donde, debido a la metodología de obtención de especímenes utilizada, algún espécimen obtenga un porcentaje de vacíos fuera del rango ( $7\% \pm 1\%$ ) se analizó individualmente la afectación y se determinó si el uso de los resultados de dicho espécimen afectaba los resultados generales.

En la evaluación de los resultados del ensayo SCB y RSCB se incluyen los resultados de resistencia a tensión diametral de las mezclas, con el fin de realizar un análisis comparativo entre resultados. Dichos datos fueron obtenidos de las bases de datos del proyecto de Daño por Humedad del LanammeUCR. La explicación de la metodología del ensayo de tensión diametral no se expuso en el presente proyecto, aunque tiene mucha similitud con el ensayo de fatiga a tensión diametral (tensión indirecta).

No se realizó ningún tipo de análisis económico detallado para comparar la aplicabilidad de los ensayos. El único parámetro de evaluación económica tomado en cuenta es el tamaño del espécimen.

### ***1.3.2 Limitaciones***

Solo se realizaron ensayos para un tipo de asfalto base. En el país solo se tiene un tipo de asfalto (AC-30 equivalente a un asfalto PG 70-22 en la clasificación por grado de desempeño) que es brindado por la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). La clasificación por grado de desempeño del asfalto puede variar al modificarlo con polímero o antidesnudante líquido. Solo se utilizó una fuente de agregados.

El ensayo RSCB no posee una normativa detallada de ensayo. Los criterios de comparación y evaluación realizados se fundamentaran principalmente en la investigación bibliográfica.

Muchas de las mezclas analizadas poseen un comportamiento similar a la fatiga, por lo que es difícil encontrar diferencias de comportamiento considerables. Las mezclas se seleccionaron sin conocer su comportamiento a la fatiga. Las MAC utilizadas son mezclas exclusivamente de laboratorio, ninguna se ha utilizado en campo.

## 1.4 Metodología

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

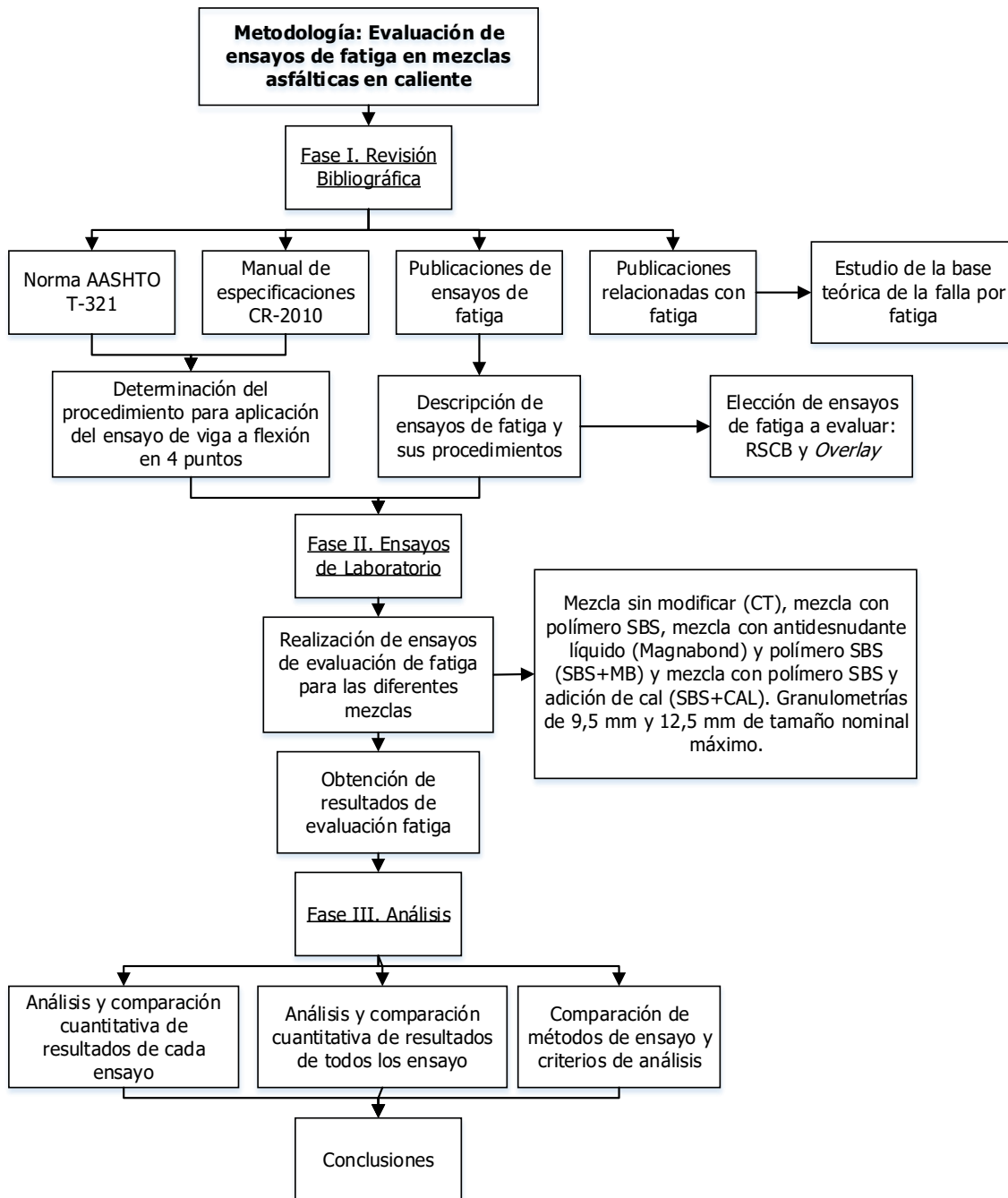


Figura 1-1. Metodología de trabajo

#### **1.4.1 Fase I. Revisión Bibliográfica**

Inicialmente se realizó un estudio general sobre el daño por fatiga y los modelos de evaluación y predicción normalmente utilizados para dicho tipo de deterioro. También se estudiaron parámetros de fractura y su relación con las propiedades de fatiga.

El estudio del ensayo de vigas a flexión en cuatro puntos se realizó investigando los parámetros y resultados especificados en la norma AASHTO T321. Posteriormente se revisaron los requerimientos establecidos en la normativa nacional y presentados en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2010). También se realizó un estudio de criterios alternativos de evaluación de los resultados del ensayo de la norma AASHTO T321.

Finalmente se efectuó una recopilación bibliográfica de algunos de los ensayos más comunes para evaluación de fatiga y fractura, centrándose en los seleccionados para la realización del proyecto. Con la información recopilada a partir de la revisión bibliográfica se realizó el capítulo 2 de la presente investigación (Marco Teórico) y se definieron los parámetros de ensayo establecidos en el capítulo 3 (Metodología Experimental).

#### **1.4.2 Fase II. Ensayos de Laboratorio**

En esta fase se realizaron los ensayos de laboratorio para evaluación de fatiga y se obtuvieron los resultados del proyecto. Se utilizaron 4 tipos de mezclas (control, con polímero SBS, con antidesnudante líquido y polímero SBS y con polímero SBS y adición de cal) para dos granulometrías diferentes (12,5 mm y 9,5 mm de tamaño máximo nominal). En total se evaluaron 8 tipos diferentes de mezclas considerando las variaciones en la granulometría.

#### **1.4.3 Fase III. Análisis**

La fase de análisis se divide en tres etapas:

##### *Etapas I. Análisis y comparación cuantitativa de los resultados de cada ensayo*

En esta etapa se realiza el análisis individual de los resultados de cada ensayo. Se realizaron análisis estadísticos y se compararon cuantitativamente los resultados obtenidos. Se determina el comportamiento individual de cada mezcla para cada ensayo por aparte.

*Etapa II. Análisis y comparación cuantitativa de los resultados de todos ensayos*

En esta etapa se comparan los resultados entre ensayos. Se buscan similitudes y diferencias entre los resultados de los ensayos y entre mezclas.

*Etapa III. Comparación de métodos de ensayo y criterios análisis*

En esta etapa se realiza una comparación de los métodos de ensayo según las ventajas y desventajas de cada uno. Adicionalmente se realiza una comparación de los criterios de análisis de evaluación de fatiga utilizados en cada prueba, con el fin de determinar cuáles criterios son más recomendables de usar.



## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Fatiga**

El agrietamiento por fatiga es uno de los principales daños que se presentan en pavimentos flexibles. Este tipo de falla es generada por las repeticiones de carga que experimenta el pavimento debido al paso de vehículos. Además se relaciona con la temperatura, propiedades de los materiales, contenido de aire de la mezcla, condiciones de las bases y otras características del pavimento. Las cargas generalmente inducen esfuerzos de tensión en las interfaces de las capas, las cuales eventualmente pierden su integridad como estructura y se agrietan.

La fatiga inicia en los puntos donde las deformaciones o esfuerzos de tensión críticos ocurren. La ubicación de los puntos críticos depende de la rigidez de la capa y de la configuración de carga. Este tipo de deterioro es más propenso a ocurrir cuando se generan grandes deflexiones a una frecuencia de carga mayor.

El daño por fatiga puede verse facilitado o generarse al mismo tiempo que otras fallas, debido a defectos constructivos, daño por humedad, entre otros. La formación de grietas favorece la filtración de agua hasta las capas inferiores, debilitando la estructura de pavimento y reduciendo su rendimiento. En condiciones idóneas se espera que la estructura no se fatigue hasta que un cierto número de ciclos de carga o vehículos, definido durante la fase de diseño, hayan transitado por la carretera.

Existen dos tipos principales de agrietamiento por fatiga, los cuales son el agrietamiento por fatiga de arriba hacia abajo y el agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba. En pavimentos semirrígidos es posible tomar en cuenta la fatiga en las capas estabilizadas.

El agrietamiento de abajo hacia arriba ocurre cuando, por la acción de las cargas de las ruedas de los vehículos, la estructura de pavimento se flexiona y experimenta las deformaciones y esfuerzos de tensión críticos en la parte inferior de la capa (Monterazi, 2009). Las grietas se originan en la parte inferior de la capa y se propagan hacia arriba conforme las repeticiones de carga se siguen aplicando. Este deterioro se manifiesta inicialmente con la formación de pequeñas grietas longitudinales en la superficie del pavimento, las cuales poco a poco se conectan formando el tipo de daño que se conoce como piel de cocodrilo.

El agrietamiento de arriba hacia abajo es propiciado por esfuerzos de tensión críticos que pueden presentarse en la superficie de la capa o como consecuencia de presiones de contacto extremadamente grandes que pueden generarse en la interfaz entre las llantas de los vehículos y el pavimento (NCHRP, 2004). El agrietamiento de arriba hacia abajo propicia la formación de grietas longitudinales y permite la infiltración de agua a las capas del pavimento.

De acuerdo con Di Benedetto et al. (2004), el proceso de degradación de fatiga de una mezcla ocurre en tres fases. La fase 1 (fase de adaptación) se caracteriza por una disminución rápida de la rigidez debida a la acción repetitiva de carga. El calentamiento de la mezcla por sus características viscosas y fenómenos locales influyen la rápida disminución del módulo.

La fase 2 (fase de fatiga) se caracteriza por una evolución del daño por fatiga en la que el efecto sobre la rigidez del material es menor. Los efectos del calentamiento y fenómenos locales pierden importancia. En la fase de fatiga se producen microfisuras en la mezcla, que al ir aumentando en densidad propician la formación de macrofisuras. La fase 3 (fase de ruptura) ocurre cuando la formación y evolución de las macrofisuras genera el fallo total de la mezcla. En la Figura 2-1 se muestran las fases mencionadas.

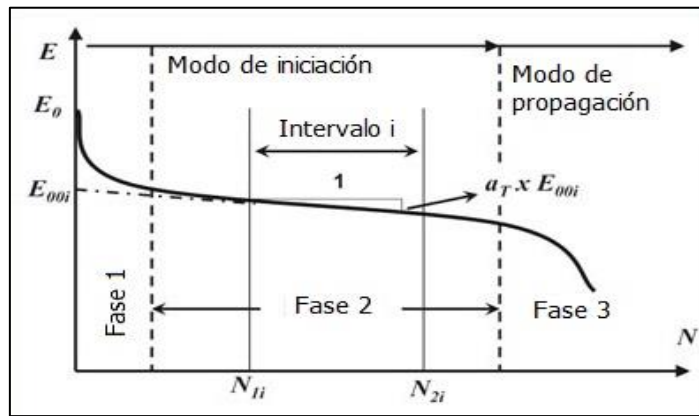


Figura 2-1. Fases de degradación de fatiga

Fuente: Di Benedetto et al. 2004

Nótese que las fases 1 y 2 del proceso de degradación de fatiga corresponden al modo de iniciación de daño, mientras que la fase 3 corresponde a un modo de propagación del daño. Existen diversos modelos para predecir el deterioro por fatiga y generalmente se clasifican de acuerdo a los modos de daño mencionados anteriormente.

## 2.2 Modelos de predicción de agrietamiento por fatiga en capas de Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC)

Los modelos de agrietamiento por fatiga en capas de MAC pueden clasificarse en tres grupos: modelos de iniciación del agrietamiento, modelos de propagación de grietas y modelos de iniciación y propagación de grietas. Durante el proceso de iniciación, las microgrietas pueden crecer desde tamaño microscópico hasta una longitud crítica aproximada de 7,5 mm (Zhou et al., 2008). En el proceso de propagación, las grietas crecen hasta alcanzar la superficie del pavimento o hasta propagarse a través del espesor de la capa.

El número de repeticiones de tráfico necesario para causar el agrietamiento por fatiga ( $N_f$ ) es la suma de repeticiones requeridas para causar la iniciación de grietas ( $N_i$ ) y el número de repeticiones necesarias para que las macrofisuras se propaguen a través del pavimento ( $N_p$ ).

$$N_f = N_i + N_p \quad (1)$$

### 2.2.1 Modelos de iniciación de grietas

Son modelos que únicamente describen la fase de iniciación de grietas y en los cuales los procesos de propagación de grietas son tomados en cuenta mediante la calibración con datos de campo. Los modelos de iniciación pueden ser basados en deformación, energía o daño.

Los modelos de fatiga basados en deformación, generalmente utilizan la deformación unitaria a tensión y la rigidez de la MAC para predecir la vida de fatiga. De acuerdo con Zhou et al. (2008) el modelo más utilizado para predecir el número de repeticiones de cargas para producir falla por fatiga es el descrito en la ecuación 2:

$$N_f = C k_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left( \frac{1}{S} \right)^{k_3} \quad (2)$$

Donde:

$N_f$ : Número de repeticiones de carga necesarias para causar la falla por fatiga

$\varepsilon_t$ : Deformación unitaria

S: Rigidez de la mezcla asfáltica

$k_1, k_2, k_3$ : Coeficientes de regresión obtenidos de pruebas de laboratorio

C: Constante de calibración campo-laboratorio

Algunos ejemplos de modelos basados en deformación son los propuestos por Shell Oil y la Guía de Diseño Mecánico Empírico (MEPDG por sus siglas en inglés).

El modelo desarrollado por Shell Oil se basa en ecuaciones de predicción de daño por fatiga para las dos formas principales de pruebas de laboratorio (pruebas realizadas con esfuerzos constantes y deformaciones constantes). Se recomienda utilizar la ecuación de esfuerzo constante para capas de gran espesor, mientras que la ecuación de deformación constante se utiliza para capas delgadas. La transición entre capas de gran espesor y delgadas es arbitraria y no está bien definida para el uso de las ecuaciones (Zhou et al., 2008).

La ecuación para deformación constante se presenta en la ecuación 3:

$$N_f = A_f [0,17PI - 0,0085PI(V_b) + 0,0454V_b - 0,112]^5 \varepsilon_t^{-5} E^{-1,8} \quad (3)$$

La ecuación para esfuerzo constante es la mostrada en la ecuación 4:

$$N_f = A_f [0,0252PI - 0,00126PI(V_b) + 0,00673V_b - 0,0167]^5 \varepsilon_t^{-5} E^{-1,4} \quad (4)$$

Donde:

$N_f$ : Número de repeticiones necesarias para que se genere el agrietamiento por fatiga

$\varepsilon_t$ : Deformación unitaria a tensión en la zona crítica

$E$ : Rigidez del material

$V_b$ : Contenido de asfalto efectivo (%)

$A_f$ : Factor de ajuste campo-laboratorio

$PI$ : Índice de penetración

El modelo de agrietamiento por fatiga de la MEPDG se muestra en la ecuación 5:

$$N_f = 0,00432 * k_1 * C \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281} \quad (5)$$

Donde:

$N_f$ : Número de repeticiones para el agrietamiento por fatiga

$\varepsilon_t$ : Deformación unitaria a tensión en la zona crítica

$E$ : Rigidez del material

$k_1, C$ : Factores de corrección

$$C = 10^{4,84 * \left(\frac{V_b}{V_a - V_b - 0,69}\right)} \quad (6)$$

Donde:

$V_b$ : Contenido de asfalto efectivo (%)

$V_a$ : Contenido de vacíos de aire (%)

El factor  $k_1$  permite realizar una corrección para diferentes espesores de capas de asfalto y depende del tipo de agrietamiento.

Para el agrietamiento de abajo hacia arriba el factor puede ser determinado con la ecuación 7:

$$k_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 \cdot hac)}}} \quad (7)$$

Para el agrietamiento de arriba hacia abajo se presenta la ecuación 8:

$$k_1 = \frac{1}{0,01 + \frac{12}{1 + e^{(15,676 - 2,8186 \cdot hac)}}} \quad (8)$$

Donde:

$hac$ : Espesor de la capa de asfalto

Los modelos de fatiga basados en energía generalmente utilizan conceptos de energía disipada para determinar el número de repeticiones necesarias para que se produzca el daño. De acuerdo con Zhou et al. (2008), un modelo basado en energía que puede usarse para la predicción de número de ciclos hasta la falla es el mostrado en la ecuación 9:

$$W_N = A * N_f^z \quad (9)$$

Donde:

$W_N$ : Energía disipada acumulada hasta la falla

$A, z$ : Coeficientes de la mezcla (derivados experimentalmente)

$N_f$ : Número de repeticiones para el agrietamiento por fatiga

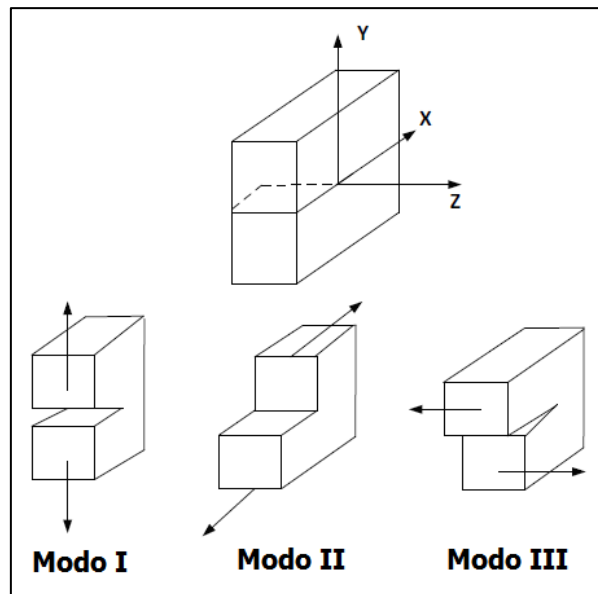
Los modelos de fatiga basados en daño utilizan conceptos habitualmente fundamentados en el análisis viscoelástico de daño continuo, el cual usa el concepto de pseudo rigidez para realizar la predicción del daño por fatiga. La pseudo rigidez se define como la relación entre un valor de esfuerzo máximo y un valor de pseudo deformación máxima en cada ciclo de carga (Zhou et al., 2008).

Una de las principales ventajas de este método es que puede utilizarse el principio de superposición tiempo-temperatura para calcular la curva característica de daño del material a varias temperaturas. Una desventaja de este enfoque es la necesidad de implementar pruebas de laboratorio sofisticadas y técnicas de análisis de datos más complejas.

### **2.2.2 Modelos de propagación de grietas**

Los modelos de propagación de grietas incluyen los modelos clásicos de fractura, los modelos de fisura cohesiva y los modelos de daño continuo no local (Zhou et al., 2008).

Los procesos de propagación de grietas pueden ser causados por 3 diferentes modos de carga o una combinación de ellos (ver Figura 2-2). El modo I de carga (modo de apertura) resulta de cargas que son aplicadas normalmente al plano de la grieta (cargas de tráfico y temperatura). El modo II (modo de deslizamiento) resulta al aplicar cargas de corte al plano de la grieta (cargas de tráfico). El modo III (modo de desgarro) resulta de la aplicación de cargas cortantes fuera del plano de la grieta.



*Figura 2-2. Modos de aplicación de carga de fractura*

Fuente: Tang, 2014

La ley generalmente aceptada de propagación de grietas es la propuesta por Paris y Erdogan (Modelo clásico de la mecánica de fractura) y se muestra en la ecuación 10:

$$\frac{dc}{dN} = A * (\Delta K)^n \quad (10)$$

Donde:

$c$ : Longitud de la grieta

$N$ : Número de repeticiones de carga

$A, n$ : Propiedades de fractura de la mezcla asfáltica (determinados mediante pruebas experimentales)

$\Delta K$ : Amplitud del factor de intensidad de esfuerzo (dependiente de la geometría de la estructura de pavimento, modo de fractura y la longitud de la grieta)

La ley de Paris ha sido aplicada con éxito en mezclas asfálticas por muchos investigadores para el análisis de pruebas experimentales, la predicción de la reflexión de grietas y agrietamiento a bajas temperaturas (Zhou et al., 2008). El número de repeticiones de carga necesario para que se propague una grieta a través de una capa asfáltica de espesor "h" se puede determinar utilizando la ecuación 11:

$$N_f = \int_0^h \frac{dc}{A * (\Delta K)^n} \quad (11)$$

### 2.3 Energía disipada

La energía disipada es la energía perdida por ciclo de carga en cualquier ensayo dinámico. De acuerdo con Abojaradeh (2013), el enfoque de la energía disipada es una técnica prometedora para la caracterización de la fatiga, puesto que es un indicativo consistente del nivel de deterioro del espécimen en términos de su comportamiento, daño acumulado o vida restante.

La energía disipada en cada ciclo se puede determinar con la ecuación 12:

$$w_i = \pi \varepsilon_i^2 S_i \sin(\varphi_i) \quad (12)$$

Donde:

$w_i$ : Energía disipada en el ciclo i

$\varepsilon_i$ : Deformación unitaria en el ciclo i

$S_i$ : Rigidez de la mezcla en el ciclo i

$\varphi_i$ : Cambio de fase entre el esfuerzo y la deformación en el ciclo i. Ángulo de fase

La energía disipada acumulada ( $W_N$ ) al ciclo N se puede calcular al sumar la energía de cada ciclo anterior:

$$W_N = \sum_i^N w_i \quad (13)$$

Cuando se realizan ensayos a deformación constante, la rigidez de la mezcla disminuye cada ciclo y por lo tanto la energía disipada también. Cuando se realizan ensayos a esfuerzo constante la deformación aumenta en cada ciclo y por lo tanto la energía disipada también. De acuerdo con Abojaradeh (2013), una mayor energía disipada acumulada generalmente se asocia con una mayor vida de fatiga.

#### **2.4 Modelo Viscoelástico de Daño Continuo**

El modelo Viscoelástico de Daño Continuo (VECD por sus siglas en inglés) se basa en la teoría de viscoelasticidad (principio de correspondencia Elástico-viscoelástico), la mecánica de daño continuo y el principio de superposición tiempo-temperatura para determinar el daño por fatiga como función de la temperatura, carga, entre otros factores.

Los materiales viscoelásticos poseen propiedades que dependen del tiempo y la temperatura, lo que los hace dependientes de la historia de carga. Muchos de los análisis de fatiga asumen un comportamiento elástico para facilitar la predicción de resultados.

Para el análisis viscoelástico se utilizan pseudo deformaciones, calculadas a partir de las deformaciones en función del tiempo real. En materiales elásticos las pseudo deformaciones son iguales a las deformaciones físicas. Si se sustituyen las deformaciones físicas por las pseudo deformaciones, se puede analizar el material como elástico lineal y aplicar la ley de Hooke.

De acuerdo con Hou (2009) los problemas de análisis de materiales viscoelásticos pueden resolverse usando soluciones elásticas cuando los esfuerzos o las deformaciones físicas son reemplazadas por pseudo esfuerzos o pseudo deformaciones. Cuando se grafican las pseudo deformaciones contra el esfuerzo viscoelástico lineal se eliminan los efectos del tiempo del análisis (Hou, 2009), lo que permite la cuantificación del daño independientemente de dichos efectos.

La teoría de daño continuo fue desarrollada por Schapery, el cual define la pseudo deformación como:



$$\varepsilon^R(t) = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t - \dot{t}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \dot{t}} d\dot{t} \quad (14)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación unitaria

$\varepsilon^R(t)$ : Pseudo deformación en el tiempo t

$E$ : Módulo elástico

$\dot{t}$ : Tiempo en el que la carga inicia

$E_R$ : Módulo de referencia arbitrario

El esfuerzo viscoelástico lineal (LVE por sus siglas en inglés) se obtiene de manera similar al utilizar la ecuación 15:

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \dot{t}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \dot{t}} d\dot{t} \quad (15)$$

Donde:

$\sigma(t)$ : Esfuerzo en el tiempo t

La pseudo rigidez (C) es la relación entre el esfuerzo LVE y la pseudo deformación máxima en cada ciclo:

$$C = \frac{\sigma(max)}{\varepsilon^R(max)} \quad (16)$$

El daño se cuantifica con una variable S que mide los cambios microestructurales del material resultantes de la reducción de la rigidez. S es una característica variable de la cantidad de daño interno del material (Zhou et al., 2008). En la teoría de daño continuo, la reducción de la rigidez se analiza mediante la pseudo rigidez (C). Al graficar la variable C contra la variable S se genera la curva característica de daño del material, la cual es independiente de las condiciones de carga.

La respuesta del material bajo cualquier historial de carga (carga cíclica a cualquier frecuencia o carga aplicada a una tasa de deformación constante) puede predecirse utilizando la curva característica obtenida a partir de una sola prueba (Kim et al., 2002).

Es posible establecer una función que relaciona las variables C y S:

$$C = e^{C_2 S} \quad (17)$$

Donde:

$C_2$ : Indicativo constante de la tasa de acumulación de daño de un espécimen bajo carga cíclica

El modelo VECD permite la predicción del comportamiento del material a cualquier temperatura, utilizando los resultados obtenidos para una temperatura particular y los factores de cambio tiempo-temperatura obtenidos a partir del ensayo de módulo dinámico.

A partir del desarrollo de los conceptos anteriores es posible obtener una ecuación para predecir el número de repeticiones de carga para que se genere el fallo por fatiga, como la presentada por Zhou et al. (2008) y mostrada en la ecuación 18:

$$N_f = \frac{2^\alpha f (e^{(-\alpha C_2 S_f)} - 1)}{\alpha (-C_2)^{1+\alpha} |E|_{LVE}^{2\alpha}} \left(\frac{1}{\varepsilon_o}\right)^{2\alpha} \quad (18)$$

Donde:

$N_f$ : Número de repeticiones para el agrietamiento por fatiga

$f$ : Frecuencia de carga

$\varepsilon_o$ : Máxima deformación unitaria a tensión

$|E|_{LVE}$ : Módulo complejo LVE

$\alpha$ : Constante del material, usualmente cercana a 2

$S_f$ : Valor de la variable interna de daño S en la falla

En este análisis, la vida a fatiga  $N_f$  es función de las propiedades viscoelásticas del material ( $\alpha, E$ ), las características de evolución de los daños del material ( $C_2$ ), las condiciones de la prueba de fatiga ( $\varepsilon_o, f$ ) y las condiciones de falla ( $S_f$ ).

## 2.5 Fractura

La mecánica de fractura provee métodos para obtener parámetros físicos que pueden usarse para evaluar la resistencia a la fractura de los materiales. Generalmente los parámetros utilizados para determinar la susceptibilidad a la fractura son: el factor de intensidad de esfuerzo ( $K_c$ ), la energía de fractura ( $G_c$ ) y la J-integral ( $J_c$ ).

Fatiga, como se define en el presente documento, es una forma de agrietamiento que resulta de las repeticiones de las cargas en el pavimento. La fractura ocurre como resultado de la fatiga y otros esfuerzos (Parker, 2010).

Los ensayos de fractura son realizados generalmente bajo la acción de una carga que se aplica a una tasa de desplazamiento o deformación constante. La carga se incrementa hasta un punto máximo donde se produce la falla y a partir del cual se requiere aplicar menor carga para continuar agrietando el espécimen a la misma tasa de deformación. Los parámetros  $G_c$  y  $J_c$  son obtenidos a partir de análisis y cálculos que utilizan los datos de las gráficas de carga-deformación obtenidas en estos ensayos.

Aunque es posible obtener la carga máxima necesaria para producir el fallo de los especímenes, no es recomendable utilizarla como parámetro de evaluación de la resistencia a la fractura. Además, la determinación de los parámetros  $G_c$  y  $K_c$  no es recomendable en ensayos donde la temperatura sea lo suficientemente alta como para afectar el comportamiento a la fractura del material.

De acuerdo con Tang (2004), la carga máxima es insuficiente para evaluar la resistencia a la fractura de mezclas asfálticas, debido a su amplia variabilidad y mala relación con la resistencia a la fractura. Además, la determinación del factor de intensidad de esfuerzo y la simple medición de la energía de fractura no son adecuadas para evaluar mezclas asfálticas a temperaturas en las que el material se deforma de manera elastoplástica (Tang, 2004).

### **2.3.1 Energía de fractura ( $G_c$ )**

La tasa de liberación energía ( $G$ ) en los ensayos de fractura, es la reducción de energía elástica por unidad de área, asociada con las prolongaciones de la grieta:

$$G = \frac{\partial U}{\partial A} \quad (19)$$

Donde:

$\partial U$ : Cambio en la energía elástica

$\partial A$ : Área agrietada

La energía de fractura es el consumo de energía necesario para generar una unidad de área de superficie de grieta (Tang, 2014). La energía de fractura se determina con la ecuación 20:

$$G_c = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (20)$$

Donde:

$G_c$ : Energía de fractura

$W_f$ : Trabajo realizado para fracturar el espécimen

$A_{lig}$ : Área de ligamento

$$W_f = \int P du \quad (21)$$

$P$ : Carga aplicada

$u$ : Línea promedio de desplazamiento de carga

Entre mayor sea la cantidad de energía necesaria para fallar el espécimen, mejor será el desempeño de la MAC a la fractura y por lo tanto mejor el desempeño a fatiga.

Algunos autores definen la energía de fractura como el área bajo la curva carga-deformación, lo cual en realidad únicamente define el trabajo realizado para fracturar el espécimen. En términos de los ensayos de fractura dicha simplificación no afecta la comparación de los resultados, al suponer que el área de ligamento se mantiene constante entre especímenes.

La energía de fractura total se determina al calcular el trabajo total realizado hasta que no se requiera fuerza para continuar agrietando el espécimen, es decir, cuando el espécimen se agrietó totalmente. La energía de fractura hasta la falla se puede estimar con el trabajo realizado hasta que se alcanza la carga máxima, punto que se define como la falla del espécimen. La Figura 2-3 y Figura 2-4 muestran curvas típicas de carga obtenidas en los ensayos de fractura.

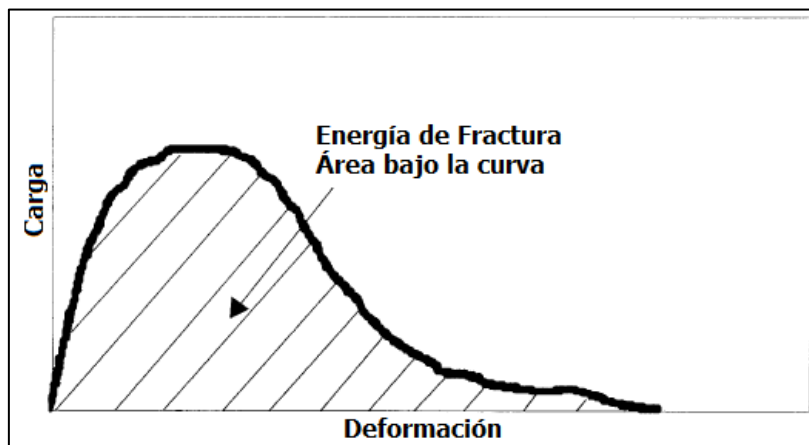


Figura 2-3. Determinación de la energía total de fractura

Fuente: NCHRP, 2002

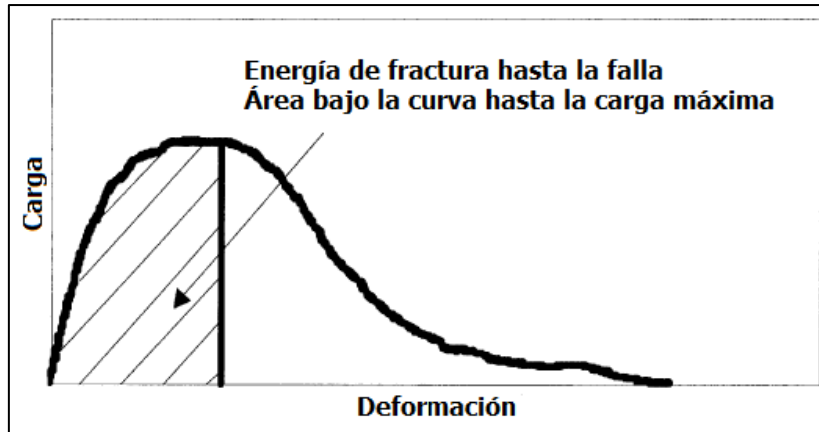


Figura 2-4. Determinación de la energía hasta la carga máxima

Fuente: NCHRP, 2002

### 2.3.2 Factor de intensidad de esfuerzo ( $K$ )

El factor de intensidad de esfuerzo es un factor empleado para calcular esfuerzos locales y que es utilizado para describir el esfuerzo alrededor del extremo de la grieta. El valor máximo del factor de intensidad determina el parámetro de resistencia a la fractura ( $K_c$ ). El factor de intensidad de esfuerzo cuantifica la amplificación de los efectos del esfuerzo global, la cual hace que el esfuerzo local cerca de la punta de la grieta sobrepase la resistencia a la cedencia del material y propicia el inicio y propagación de la grieta (Tang, 2014).

El factor de intensidad para la condición en que el plano de la grieta es normal a la dirección de la carga de tensión (Modo I de carga) se puede determinar con la ecuación 22:

$$K = \sigma\beta\sqrt{\pi a} \quad (22)$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo global aplicado en el límite exterior del elemento

$a$ : Longitud de la grieta

$\beta$ : Factor de geometría

### 2.3.3 $J_c$ -integral

El parámetro  $J_c$ -integral representa una tasa de liberación de energía elastoplástica, relacionada el cambio de energía obtenido o generado por un cambio en la longitud de la grieta. En general, es una tasa de cambio de energía dada por:

$$Jc = -\frac{1}{B} \left( \frac{\partial U}{\partial a} \right)_{\Delta} = - \left( \frac{\partial U}{\partial A} \right)_{\Delta} \quad (23)$$

Donde:

$U$ : es la energía de deformación

$B$ : es el espesor del espécimen

$a$ : es la longitud de grieta

$A$ : Área de agrietamiento

Conforme aumenta el valor de  $Jc$  mejor es el comportamiento a la fractura.

## 2.6 Ensayos de fatiga y fractura en MAC

Existen diversos ensayos de fatiga y fractura para mezclas asfálticas, basados en diferentes principios (flexión, tensión directa, tensión indirecta, ciclos de compresión-tensión, torsión, entre otros). Dependiendo de la configuración y la manera de realización de los ensayos se pueden obtener diferentes resultados para evaluar el comportamiento de una MAC a fatiga.

Uno de los principales problemas de los ensayos de fatiga y fractura es la variabilidad asociada a los resultados obtenidos. De acuerdo con Walubita et al. (2012) la mayoría de ensayos de fatiga, por la naturaleza de su configuración de carga y modo de falla repetida, son asociados con una alta variabilidad en sus resultados. De la revisión bibliográfica de dicho autor y sus colaboradores se encuentra que la mayoría de ensayos de fatiga, incluyendo los de flexión y tensión diametral, presentan coeficientes de variación (C.V.) entre 65,5 % (Fatiga en ensayos a tensión diametral) y 98,7 % (ensayos de fatiga en vigas).

El ensayo *Overlay* es un ensayo utilizado para evaluación de fatiga y predicción de la reflexión de grietas en MAC. Walubita et al. (2012) menciona que en dicho ensayo se presentan coeficientes de variación menores, no obstante, es posible encontrar C.V. mayores a 30% particularmente para la mayoría de mezclas densas y gruesas-graduadas.

Las propiedades de las MAC como el contenido de asfalto, contenido de vacíos de aire, entre otros pueden afectar el comportamiento por fatiga. Si no se controlan debidamente los parámetros de los ensayos y las propiedades de las MAC los coeficientes de variación obtenidos en los diferentes resultados pueden aumentar.

La diferencia entre los ensayos de fatiga y fractura se basa en el modo de aplicación de carga, mientras un ensayo de fatiga utiliza cargas cíclicas a una determinada frecuencia, el ensayo de fractura generalmente utiliza cargas aplicadas a una tasa de deformación o desplazamiento constante.

Aunque los ensayos de fractura brindan resultados a partir de los cuales se puede evaluar la susceptibilidad al daño por fatiga de MAC, no es recomendable relacionar los resultados directamente con los de ensayos de fatiga. Una mezcla más susceptible a la fractura será también más susceptible a la fatiga, por lo que las clasificaciones de las MAC obtenidas en los diferentes ensayos son comparables entre sí.

Algunos investigadores han indicado que la relación entre la energía de fractura y la fatiga no debe representarse mediante ecuaciones lineales o similares debido a que estas pueden generar una relación errónea y una predicción irreal de la vida a fatiga (Parker, 2010).

### ***2.6.1 Pruebas de laboratorio a esfuerzo y deformación contante***

Los principales tipos de carga controlada utilizados en laboratorio para la estimación de la falla por fatiga involucran esfuerzo o deformación constante. En el caso de las pruebas que utilizan deformación constante, esta permanece invariante con el número de repeticiones. Debido al daño generado por la carga repetitiva, el esfuerzo aplicado se reduce provocando una reducción de la rigidez como función del número de repeticiones.

En el caso de esfuerzo constante, no hay cambio en el esfuerzo aplicado durante el ensayo y como causa de la aplicación de carga, la deformación aumenta generando una disminución de la rigidez con el tiempo o número de cargas. La Figura 2-5 muestra el fenómeno de la aplicación de cargas controladas con esfuerzo y deformación constante.

De acuerdo con Montazeri (2009), el ensayo a esfuerzo constante es aplicable cuando los espesores de pavimento son mayores a 200 mm, mientras que capas delgadas se pueden analizar mejor con deformaciones controladas.

NCHRP (2004), menciona que en estructuras de pavimentos donde la carpeta asfáltica posee gran espesor, la capa asfáltica es el principal componente soportador de carga y de los aumentos de deformación. Debido al gran espesor de la capa, los cambios en el esfuerzo no son significativos y por lo tanto se puede considerar que es constante. En capas asfálticas

menores a 50 mm, la deformación es gobernada por las capas inferiores y por lo tanto se relacionan conceptualmente de mejor manera con modos de carga a deformación constante (NCHRP, 2004). En capas de espesor intermedio la vida a fatiga se rige por una combinación de esfuerzo y deformación constante.

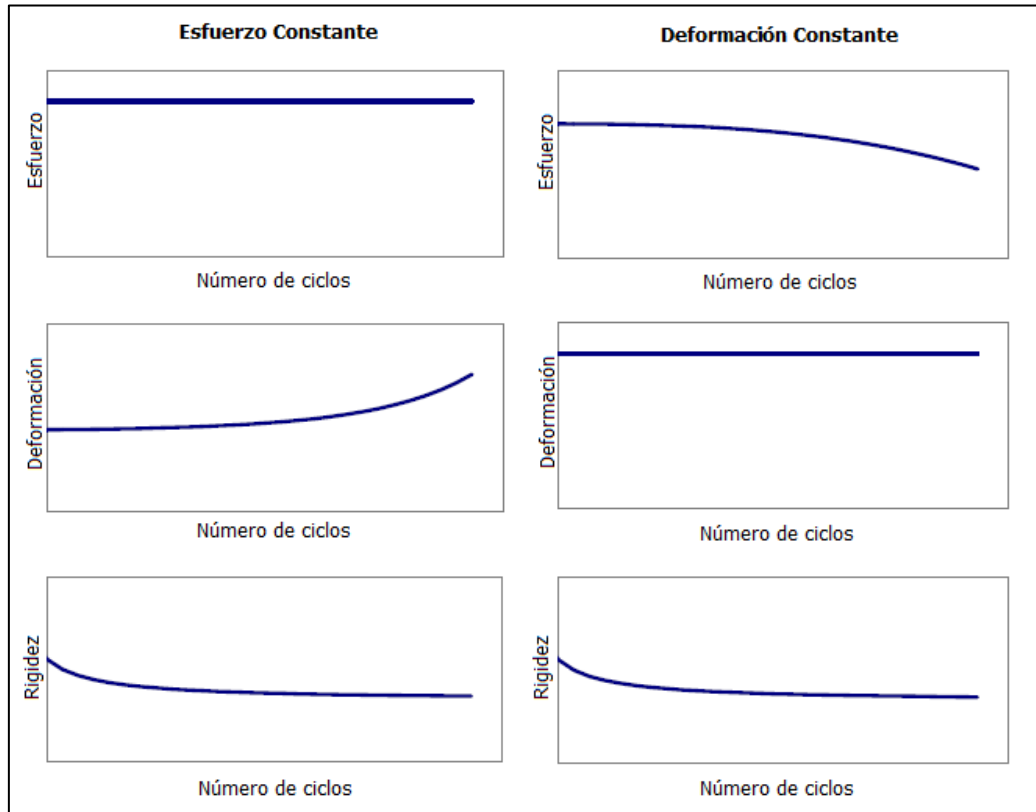


Figura 2-5. Fenómeno de deformación y esfuerzo constante

Fuente: NCHRP, 2004

### 2.6.2 Variables que afectan la resistencia a la fatiga de las MAC

La resistencia a la fatiga de diferentes mezclas asfálticas es distinta y puede verse afectada por el contenido de asfalto, tipo de asfalto, tipo de agregados, graduación de los agregados y el contenido de vacíos de aire. De acuerdo con Na (2010), generalmente la resistencia a la fatiga de especímenes realizados en laboratorio es afectado principalmente por cambios del contenido de asfalto y contenido de aire. El Cuadro 2-1 muestra la afectación en la vida a fatiga ante el cambio de diferentes factores o propiedades.



Cuadro 2-1. 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
<i>Contenido de asfalto</i>	Incremento	Aumenta	Aumenta	Aumenta
<i>Contenido de vacíos de aire</i>	Disminución	Aumenta	Aumenta	Aumenta
<i>Tipo de agregado</i>	Incremento de la angulosidad	Aumenta	Aumenta	Disminuye
<i>Graduación del agregado</i>	Abierta-Graduada	Aumenta	Aumenta	Disminuye
<i>Temperatura</i>	Disminución	Aumenta	Aumenta	Disminuye

Fuente: Na, 2010

Es posible modificar el asfalto para mejorar sus propiedades de desempeño como la resistencia a la fatiga, deformación permanente, entre otras. Existen diversos polímeros que pueden mejorar dichas propiedades, como el SBS (estireno-butadieno-estireno) y SBR (caucho estireno-butadieno).

En el presente documento se evalúan mezclas modificadas con polímero SBS, polímero SBS junto con agente antidesnudante líquido (Magnabond) y polímero SBS con adición de cal. La cal se adiciona a la granulometría de las mezclas sustituyéndola por un porcentaje del material pasando el tamiz número 200. El polímero SBS y el agente antidesnudante líquido se agregan al asfalto directamente.

De acuerdo con la investigación bibliográfica realizada por Castro (2015), es posible mejorar las propiedades reológicas del asfalto modificándolo con el polímero SBS, puesto que dicho polímero mejora la elasticidad del ligante cuando se trabaja a temperaturas altas, además mejora la flexibilidad a temperaturas bajas.

Existen aditivos que buscan mejorar la adherencia entre el ligante y el agregado con el fin de mejorar la resistencia a otros tipos de daño, como el daño por humedad. El agente antidesnudante líquido es un aditivo utilizado para mejorar la resistencia al daño por humedad.

La adición de cal a la MAC suele realizarse para mejorar la resistencia al daño por envejecimiento, no obstante, un exceso de este material en la MAC podría generar un aumento significativo en la rigidez y afectar la resistencia al daño por fatiga. De acuerdo con Blanchetto

et al. (2007) mientras no se exceda la concentración crítica de cal, se evita sacrificar propiedades como la resistencia a la deformación, aun cuando se logre aumentar la resistencia al daño por envejecimiento. La concentración en la que la MAC comienza a rigidizarse es la concentración crítica.

### ***2.6.3 Ensayo de viga a flexión en 4 puntos***

Este es uno de los ensayos más populares de evaluación de la resistencia al agrietamiento por fatiga. La configuración del ensayo trata de simular la flexión que experimenta la capa de mezcla asfáltica en la estructura del pavimento. La prueba permite determinar la energía disipada, la rigidez y la vida de fatiga de mezclas asfálticas en caliente.

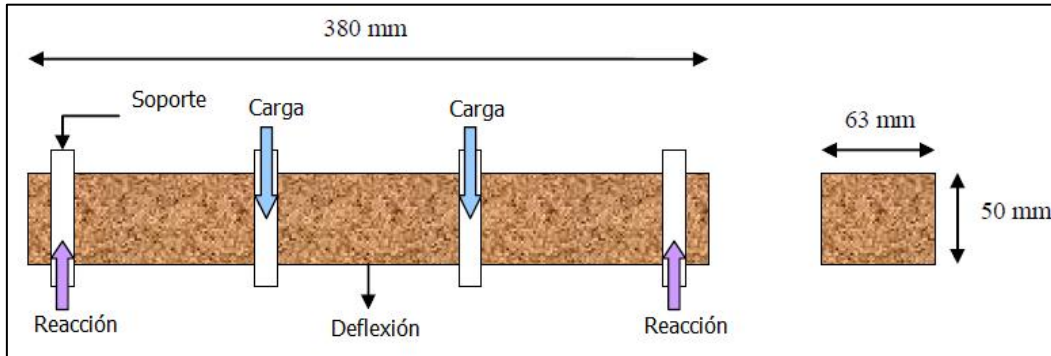
Una norma que especifica el procedimiento de ensayo de flexión en vigas es la AASHTO T-321 (Determinación de la Vida de Fatiga de Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC) Sujeta a Flexotracción con Carga Dinámica). En la prueba, cargas sinusoidales son aplicadas a diferentes frecuencias (normalmente de 5 a 10 Hz) a los tercios medios de la viga. Dichas cargas generan un momento de flexión constante en el tercio central del espécimen. Cada ciclo incluye una carga en dirección opuesta que regresa la viga a la posición original durante el período de descanso, lo que genera reversión de esfuerzos. Este ensayo evalúa rigidez y vida de fatiga de la mezcla asfáltica. La Figura 2-6 muestra el equipo del ensayo a flexión con vigas.



*Figura 2-6. Ensayo de viga a flexión en cuatro puntos*

Fuente: Montazeri, 2009

Los especímenes utilizados son vigas de  $380 \pm 6$  mm de largo,  $63 \pm 6$  mm de ancho y  $50 \pm 6$  mm de altura. El ensayo se realiza normalmente a una temperatura de  $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . La Figura 2-7 muestra la configuración del ensayo de vigas a flexión y las dimensiones del espécimen.



*Figura 2-7. Configuración del ensayo de vigas a flexión y dimensiones del espécimen*

Fuente: Hou, 2009

Otra norma del ensayo es la ASTM D7460-08 (Método de prueba estándar para determinar la falla por fatiga en mezcla asfáltica sujeta a flexotracción con Carga Dinámica). Las normas normalmente especifican niveles de deformación entre  $200 \mu\text{s}$  y  $750 \mu\text{s}$  para la realización de la prueba. Al menos dos niveles de deformación deben evaluarse para poder generar un modelo de fatiga.

El ensayo puede realizarse mediante estimación a partir de pruebas a esfuerzos o deformaciones constantes. Normalmente el ensayo se realiza bajo la modalidad de deformaciones constantes.

Cuando se realiza la prueba a esfuerzo controlado, se aplica una carga de amplitud constante hasta que la falla ocurre. Dependiendo del esfuerzo aplicado, el tiempo necesario para que el espécimen falle se puede prolongar por más de un día. Las mezclas con rigideces altas se comportan mejor para esta metodología.

El criterio más comúnmente utilizado para la evaluación de la vida de fatiga (criterio de la norma AASHTO T-321), en ensayos de vigas a deformación constante, es el número de ciclos equivalentes a un 50% de la reducción de la rigidez inicial (la rigidez inicial se toma como el valor luego de 50 ciclos de carga).

De acuerdo con estudios realizados por Pérez et al. (2009), para mezclas muy flexibles, cuando se ha reducido la rigidez un 50% aún no se ha llegado a la falla por fatiga. Abojaradeh (2013),

menciona que el punto de falla en ensayos de vigas normalmente se encuentra entre 35% y 65% de la reducción de la rigidez.

Una desventaja del ensayo es que en ocasiones se requiere mucho tiempo para fallar cada espécimen, principalmente para mezclas resistentes al deterioro por fatiga y cuando se aplican deformaciones bajas.

Los ensayos de vigas a flexión en cuatro puntos suelen presentar coeficientes de variación altos en los resultados, lo anterior aunado al criterio de falla que no es adecuado para mezclas muy flexibles ha propiciado que se desarrollen propuestas alternativas para la definición del punto de falla.

Abojaradeh (2013) presenta una compilación de criterios de falla para mezclas asfálticas evaluadas con el ensayo de vigas a flexión en 4 puntos. Muchos de los métodos mencionados por Abojaradeh (2013) son muy subjetivos y no establecen un punto fácil de localizar y definir como falla, no obstante, el método de Rowe y Bouldin permite desarrollar una gráfica con un punto máximo fácil de identificar y que representa la formación de grietas en el espécimen.

El método de Rowe y Bouldin es funcional para analizar el desempeño por fatiga en ensayos realizados a deformación o esfuerzo constante. Este método consiste en multiplicar el valor de la rigidez en el ciclo  $i$  ( $S_i$ ) por el número de ciclo  $i$  ( $n_i$ ) y graficar los valores contra el número de ciclos. La vida de fatiga es definida como el pico de la curva.

De acuerdo con Abojaradeh, (2013), la falla a fatiga es definida como el punto donde la curva cambia del régimen de formación de microfisuras al punto de formación y propagación de macrofisuras. En la Figura 2-8 y la Figura 2-9 se muestran las gráficas del método de evaluación de fatiga desarrollado por Rowe y Bouldin.

La vida a fatiga de la mezcla, para el modo de iniciación de grietas, se determina mediante el número de ciclos que soporta hasta el punto definido como falla. Los principales resultados a obtenerse de este ensayo son la rigidez y el número de ciclos. La rigidez es determinada mediante la ecuación 24:

$$S_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (24)$$

Donde:

$S_i$ : Rigidez en el ciclo  $i$

$\sigma_i$ : Esfuerzo a tensión en el ciclo i

$\varepsilon_i$ : Deformación unitaria en el ciclo i

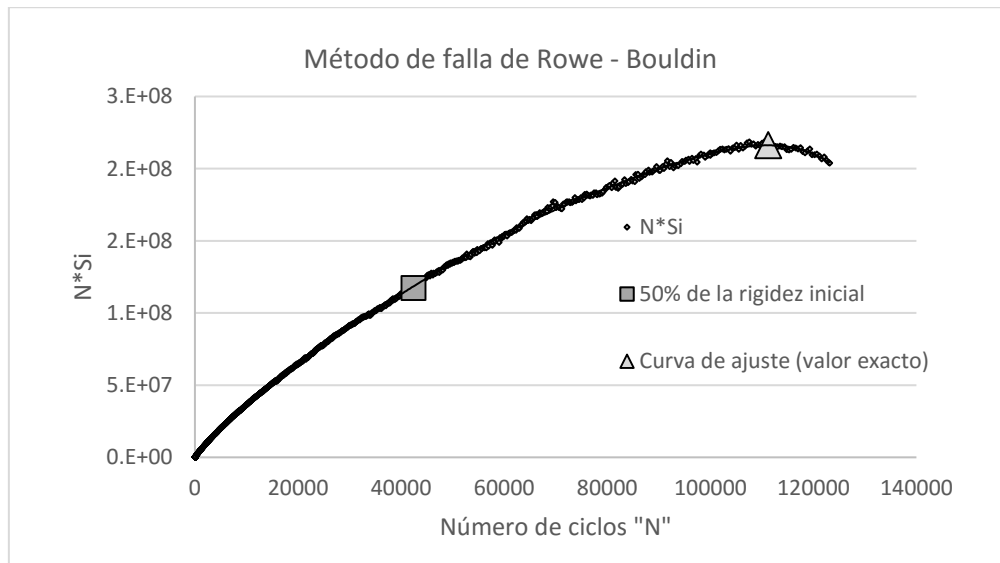


Figura 2-8. Curva típica del método del Rowe y Bouldin

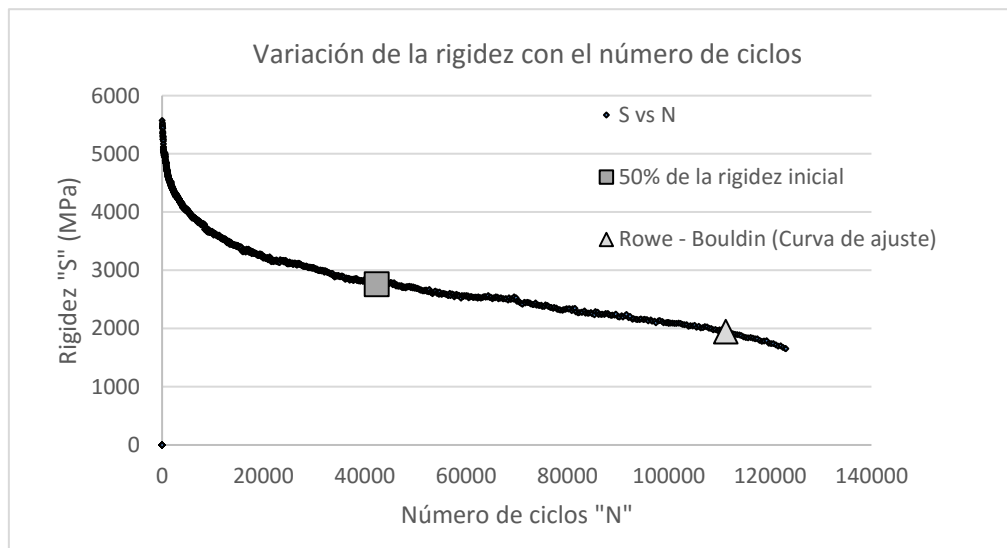


Figura 2-9. Curva de deterioro típica del ensayo de vigas a flexión

Los especímenes requeridos para el ensayo a fatiga son costosos y difíciles de hacer, por lo que este ensayo normalmente se utiliza para generación de datos de investigaciones y no para evaluación durante el diseño o la construcción.

#### 2.6.4 Ensayo de tensión directa

El ensayo de tensión directa utiliza una carga a tensión continua aplicada, a una tasa de desplazamiento constante, sobre un espécimen cilíndrico. La Figura 2-10 y Figura 2-11 muestran imágenes de la configuración experimental y de carga del ensayo.



Figura 2-10. Configuración del ensayo de fatiga a tensión directa

Fuente: Parker, 2010

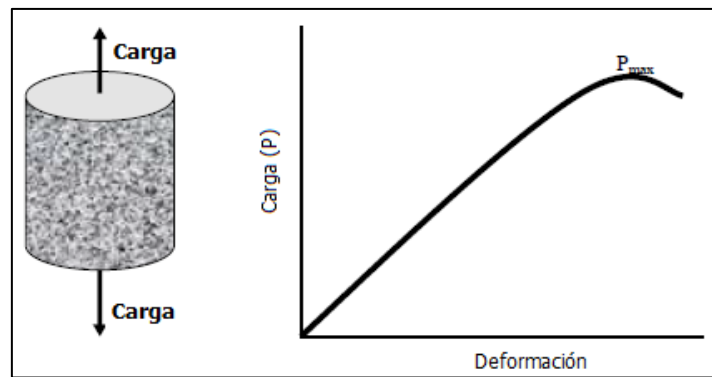


Figura 2-11. Configuración de carga del ensayo de fatiga a tensión directa

Fuente: Walubita et al., 2004

El espécimen debe ser pegado a placas metálicas sobre las que se aplica la carga, con el fin de brindar uniformidad y facilitar la implementación del ensayo. Este proceso debe realizarse cuidadosamente para generar resultados adecuados y evitar que la falla se genere cerca de la zona pegada a las placas (Parker, 2010).

Comúnmente se utilizan LVDTs (Transformadores Diferenciales de Variación Lineal) pegados al espécimen para medir la deformación en la parte central del mismo. La deformación se usa para determinar la rigidez de la mezcla asfáltica.

Los especímenes normalmente utilizados son cilindros de 150 mm de altura y 100 mm de diámetro, los cuales son extraídos de cilindros de mayores dimensiones, para que la distribución de vacíos de aire sea lo más uniforme posible.

El ensayo se realiza aplicando una carga a tensión a una tasa de desplazamiento constante de 1,27 mm/min hasta la falla (Walubita et al., 2004). El ensayo puede realizarse a cualquier temperatura, no obstante comúnmente se trabaja con una temperatura de 20 °C ± 0,5 °C. Durante la prueba, la carga, la deformación axial y el tiempo de ensayo son medidos.

El esfuerzo a tensión máximo es determinado con la carga máxima a tensión antes de la falla utilizando la ecuación 25:

$$\sigma_t = \frac{P_{max}}{\pi r^2} \quad (25)$$

Donde:

$\sigma_t$ : Esfuerzo a tensión

$P_{max}$ : Carga máxima a tensión

$r$ : Radio de espécimen cilíndrico

La rigidez de la mezcla asfáltica en caliente se obtiene con la ecuación 26:

$$S_t = \frac{\sigma_{tmax}}{\varepsilon_{tmax}} \quad (26)$$

Donde:

$S_t$ : Rigidez de la mezcla asfáltica en caliente

$\sigma_{tmax}$ : Máximo esfuerzo a tensión

$\varepsilon_{tmax}$ : Deformación unitaria a tensión de la carga axial máxima aplicada

La deformación axial a tensión puede obtenerse con la ecuación 27:

$$\varepsilon_t = 10^6 * \frac{V}{h} \quad (27)$$

Donde:

$\varepsilon_t$ : Deformación unitaria axial promedio del espécimen

$V$ : Deformación axial promedio del espécimen

$h$ : Altura del espécimen

De acuerdo con la investigación bibliográfica realizada por Parker (2010), el siguiente rango de valores define un adecuado comportamiento de fatiga para los resultados del ensayo a tensión directa:

$$\sigma_t \geq 65 \text{ psi} \quad (28)$$

$$\varepsilon_t \leq 3180 \mu\varepsilon \quad (29)$$

Es posible determinar la energía de fractura del espécimen como el área bajo la curva carga-deformación y realizar otro análisis para la caracterización de la susceptibilidad al daño por fatiga.

Los parámetros de resistencia a la fractura (esfuerzo a tensión y deformación axial) del ensayo de tensión directa son sensibles al tipo de asfalto y las condiciones de envejecimiento (Parker, 2010). El ensayo de tensión directa tiene dificultad para diferenciar entre asfaltos modificados y la energía de fractura no es adecuada para evaluar el comportamiento a fatiga de mezclas de campo (Parker, 2010). Este ensayo no es práctico para aplicarse en campo debido a la geometría del espécimen.

Las mediciones de este ensayo se pueden analizar mediante la teoría de viscoelasticidad y daño continuo (Ensayo de fatiga mediante el análisis viscoelástico de daño continuo), para lo cual se deben realizar el ensayo de módulo dinámico antes del ensayo de fractura.

### ***2.6.5 Ensayo de Tensión Directa Repetida***

El ensayo de tensión directa repetida utiliza especímenes con las mismas características que el de tensión directa con carga a desplazamiento constante. Este ensayo se realiza comúnmente a deformación controlada, donde el espécimen es deformado una magnitud constante cada ciclo de carga y el esfuerzo generado es medido. Una deformación axial de  $350 \mu\varepsilon$  es aplicada repetidamente al espécimen cilíndrico a una frecuencia de 1 Hz por 1000 ciclos (Walubita et al., 2004). La temperatura del ensayo normalmente usada es  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .



En caso de realizarse el ensayo a esfuerzo controlado, Parker (2010) menciona que la carga a aplicar se puede obtener como un porcentaje de la carga máxima obtenida en el ensayo de tensión directa, con una frecuencia de 25 Hz.

La carga aplicada, cuando el ensayo se realiza a deformación controlada, tiene forma de onda haversiana, con 0,1 s de aplicación de carga y 0,9 s de período de descanso entre pulsos (Parker, 2010). Los parámetros definidos para la realización del ensayo pretenden inducir daño por fatiga conforme se desarrolla la prueba. En el caso de que la prueba se realice en el modo de esfuerzo controlado no se recomienda utilizar períodos de descanso superiores a 0.4 s debido a un aumento significativo en la vida de fatiga (Parker, 2010).

Walubita et al. (2006) proponen una metodología comparar los resultados obtenidos para diferentes MAC. Ellos utilizan la pendiente de la gráfica  $\log(N)$ , donde N es el número de ciclos hasta la falla, contra la energía de pseudo deformación disipada (DPSE) para caracterizar la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas. La DPSE se obtiene con la ecuación 30:

$$DPSE = \sum \psi(t)(\varepsilon_R(t) \times \sigma_m(t)) \quad (30)$$

Donde:

$\psi(t)$ : Factor de corrección de no linealidad =  $\frac{\sigma_c(t)_1}{\sigma_m(t)_1}$

$\sigma_c(t)_1$ : Esfuerzo a tensión calculado en el primer ciclo,  $\sigma_c(t) = \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau$

$\sigma_m(t)_1$ : Esfuerzo a tensión medido en el primer ciclo,  $\sigma_m(t) = \frac{P(t)}{\pi r^2}$

$E(t - \tau)$ : Módulo de relajación a tensión (condición no dañada) en el tiempo  $t - \tau$

$P(t)$ : Carga aplicada en el tiempo t

$r$ : Radio del espécimen

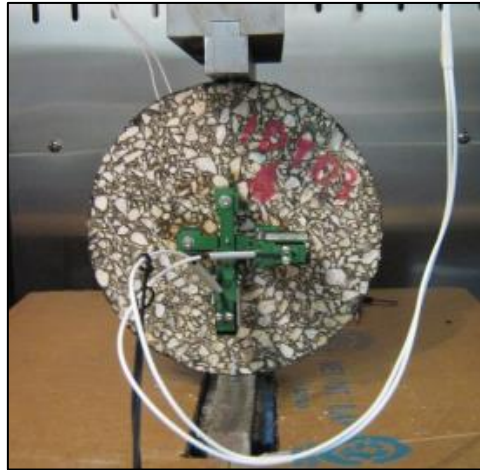
$\varepsilon_R(t)$ : pseudo deformación unitaria en el tiempo t  $\frac{\sigma_c(t)}{E_R}$

$E_R$ : Módulo de referencia =  $\frac{\sigma_m(t)_1}{\varepsilon_m(t)_1}$

Entre mayor sea el valor de la pendiente "b" más susceptible es la MAC al daño por fatiga. Valores del parámetro "b" menores a 0,65 representan un adecuado comportamiento al daño por fatiga.

### **2.6.6 Ensayo de Tensión Indirecta**

El ensayo a tensión indirecta utiliza una carga a compresión aplicada diametralmente, a una tasa de desplazamiento constante, sobre un espécimen cilíndrico. La configuración del espécimen induce indirectamente esfuerzos horizontales de tensión en la zona media, los cuales causan la falla del mismo. La Figura 2-12 muestra la configuración típica del ensayo.



*Figura 2-12. Ensayo de Tensión Indirecta*

Fuente: Parker, 2010

El tamaño de los especímenes de este ensayo generalmente concuerda con las dimensiones especificadas en el ensayo para determinar la resistencia a tensión diametral. Se utilizan cilindros de 150 mm de diámetro y 95 mm de alto o cilindros de 100 mm de diámetro y 63,5 mm de alto dependiendo del tamaño máximo nominal del agregado de la mezcla. La tasa de carga a compresión normalmente aplicada es de 50 mm/min y la temperatura de ensayo puede variar de -20°C hasta 25°C (Walubita et al., 2012).

El ensayo se realiza bajo la configuración de esfuerzos controlados, puesto que en el modo de deformaciones controladas se generan estados de esfuerzo diferentes de los que se aplican en el modelo elástico lineal para el análisis (Huang et al., 2005). Además, para el modo de deformaciones controladas se requiere pegar el espécimen al dispositivo de aplicación de carga y se podría aumentar la variabilidad de los resultados e inclusive inducir la falla en zonas cercanas a la zona pegada.

Durante el ensayo, la carga aplicada, la deformación horizontal y la deformación vertical en el centro del espécimen son medidas. La energía de fractura se puede determinar con los

parámetros medidos y así se puede evaluar y comparar el comportamiento por fatiga de la MAC.

El esfuerzo a tensión en el centro del espécimen utilizado en el ensayo puede determinarse utilizando la ecuación 31:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi t D} \quad (31)$$

Donde:

$\sigma_t$ : Esfuerzo a tensión en el centro del espécimen

$P$ : Carga axial máxima aplicada

$t$ : Espesor del espécimen

$D$ : Diámetro del espécimen

La ecuación anterior es válida únicamente cuando el espesor del espécimen es pequeño y por lo tanto para las pastillas del ensayo a tensión indirecta tiende a sobreestimar el valor del esfuerzo (Parker, 2010).

La deformación a tensión en la sección central del espécimen puede determinarse utilizando la ecuación 32:

$$\varepsilon_T = 13,2 H_T \quad (32)$$

Donde:

$\varepsilon_T$ : Deformación horizontal a tensión que se presenta cuando se aplica la máxima carga

$H_T$ : Deformación horizontal medida en la falla

Una desventaja de este ensayo es la existencia de un estado biaxial de esfuerzo. De acuerdo con Huang et al. (2005), el estado de esfuerzo en los especímenes de tensión indirecta es compleja y el modo de falla es una mezcla de tensión, compresión y cortante. Si el esfuerzo de compresión de la mezcla asfáltica es menor que tres veces que el esfuerzo a tensión, la fractura podría ser iniciada por fallo de compresión en lugar de tensión (Huang et al., 2005).

Es posible realizar ensayos adicionales de módulo dinámico para analizar los resultados con la teoría viscoelástica de daño continuo.

### ***2.6.7 Ensayo de Tensión Indirecta Repetida***

Este ensayo utiliza una carga cíclica, sobre especímenes con las mismas características que los utilizados en el ensayo de tensión indirecta, con el fin de obtener el número de ciclos hasta la falla.

El ensayo a tensión indirecta con carga repetida puede utilizar una carga de tipo haversiana con un tiempo de carga de 0,4 segundos y un período de descanso de 0,6 segundos, también es posible aplicar un tiempo de carga de 0,1 segundos y un período de descanso de 0.4 segundos (NCHRP, 2002). Como no hay un protocolo específico de ensayo, cada investigador puede utilizar la configuración de carga que desee y se ajuste a las condiciones que requiera, frecuencias de carga entre 0,1 Hz y 10 Hz con o sin período de descanso pueden aplicarse.

Normalmente se aplica una carga equivalente a un porcentaje de la carga máxima determinada en el ensayo de tensión indirecta con carga a desplazamiento controlado. Una carga menor que el 50% de la resistencia a tensión medida en el ensayo con carga incremental genera una correcta repuesta a la fatiga (Parker, 2010).

Parker (2010), realiza el ensayo a una frecuencia de 1 Hz (sin período de descanso) aplicando cargas equivalentes a un 10% y un 20% de la carga máxima obtenida en el ensayo con carga a desplazamiento controlado. El autor justifica la utilización de dichos parámetros al mencionar que proporcionan una duración adecuada del ensayo.

El criterio de falla para este modo de ensayo se establece con el número de ciclos con el cual ocurre la falla del espécimen o el número de ciclos al momento en que haya una reducción del 50% del valor del módulo resiliente original. Es posible someter diferentes especímenes a distintos niveles de deformación o esfuerzo con el fin de generar un modelo de fatiga entre dichos parámetros y el número de ciclos.

### ***2.6.8 Flexión Semicircular***

El ensayo a flexión semicircular (SCB por sus siglas en inglés) es una prueba de laboratorio que ha sido usada por diversos investigadores para evaluar la resistencia a la fractura de mezclas asfálticas.

El ensayo posee una configuración en la que se aplica carga de compresión sobre un espécimen semicircular en una configuración de flexión en tres puntos. La configuración típica del ensayo se muestra en la Figura 2-13.



*Figura 2-13. Ensayo de flexión semicircular*

La variabilidad de las características y parámetros de los ensayos SCB encontrados en diversos documentos de investigación es amplia, no obstante la configuración experimental es muy similar.

Es común que el espécimen posea un corte en la base del espécimen para asegurar que el agrietamiento se inicie y transmita a partir del centro del mismo. La geometría del espécimen induce tensión en la parte inferior del espécimen, que resulta en la propagación de la grieta a partir del corte en la base.

Entre los estudios que han utilizado o investigado este método de ensayo debido a las ventajas de fabricación de los especímenes y la facilidad de aplicabilidad en campo se encuentran Parker (2010), Prapoorna et al. (2012), Huang et al. (2013), Mohammad et al. (2012) y Nsengiyumva (2015).

De acuerdo con los estudios anteriores, se encuentra que generalmente las dimensiones del diámetro de los especímenes varía entre 100 y 150 mm, el espesor entre 25 y 60 mm, la longitud del corte inicial en la base del espécimen puede variar entre 0 mm y 40 mm, la temperatura de realización del ensayo entre -10 °C y 40 °C y la tasa de aplicación de carga varía de 0,5 mm/min a 51 mm/min.

La separación entre apoyos es función del diámetro del espécimen, normalmente se utiliza una separación de 0.8 veces el diámetro. Dichos apoyos deben ser circulares con el fin de reducir la fricción al momento de la realización del ensayo.

Es recomendable aplicar una pequeña carga de contacto en el espécimen antes de iniciar la aplicación de la carga incremental, dicha carga puede ser de aproximadamente 0,1 kN. (Nsengiyumva, 2015). La carga de contacto evita que el apoyo o el espécimen se desacomoden cuando inicie el ensayo.

Los parámetros recomendados del ensayo con el fin de disminuir el coeficiente de variación de los resultados en términos de la energía de fractura se pueden ver en el Cuadro 2-2.

*Cuadro 2-2. Parámetros recomendados para el ensayo de fractura a flexión semicircular*

<b>Variable</b>	<b>Valor recomendado</b>
Espesor (mm)	40-50
Longitud de la grieta en la base (mm)	5-15
Tasa de carga (mm/min)	1-15
Temperatura (°C)	15-40
Número de especímenes	5-6
Coeficiente de variación	≤15

Fuente: Nsengiyumva, 2015

Generalmente los parámetros a encontrar en los ensayos semicirculares a flexión con carga a desplazamiento controlado son la energía de fractura ( $G_c$ ), la carga máxima, el factor de intensidad de esfuerzo ( $K_c$ ) y la  $J_c$ -integral ( $J_c$ ).

De acuerdo con Parker (2010), las conclusiones de algunas de las investigaciones realizadas se contradicen con respecto a la sensibilidad de parámetros como la  $J_c$ , en relación con factores como la graduación del agregado, interacción del asfalto con el agregado y la rigidez del asfalto. Los resultados permiten ordenar diferentes tipos de mezcla de acuerdo con su resistencia a la fractura.

Para determinar la energía de fractura y el factor de intensidad de esfuerzo mediante el ensayo SCB, se requiere fallar los especímenes ante una carga aplicada a una tasa de desplazamiento constante y con un solo tamaño de corte en la base del espécimen. Para obtener el valor de la  $J_c$ -integral se requiere fallar especímenes con diferentes tamaños de corte en la base.

Valores mayores del parámetro  $J_c$  representan una mayor resistencia a la fractura. Parker (2010) presenta un rango de valores adecuados para mezclas con resistencia a la fractura apropiada.

$$0,43 \leq J_c \leq 1,607 \text{ kJ/m}^2 \quad (33)$$

En la Figura 2-14 se muestra una gráfica típica de carga obtenida del ensayo a flexión semicircular y utilizada para determinar la el parámetro Jc-integral. El área bajo las curvas hasta alcanzar la carga máxima representa la energía de deformación (U). Al graficar los valores de la energía de deformación contra el tamaño del corte en un modelo lineal se obtiene la relación  $\frac{\partial U}{\partial a}$  y es posible determinar el parámetro Jc.

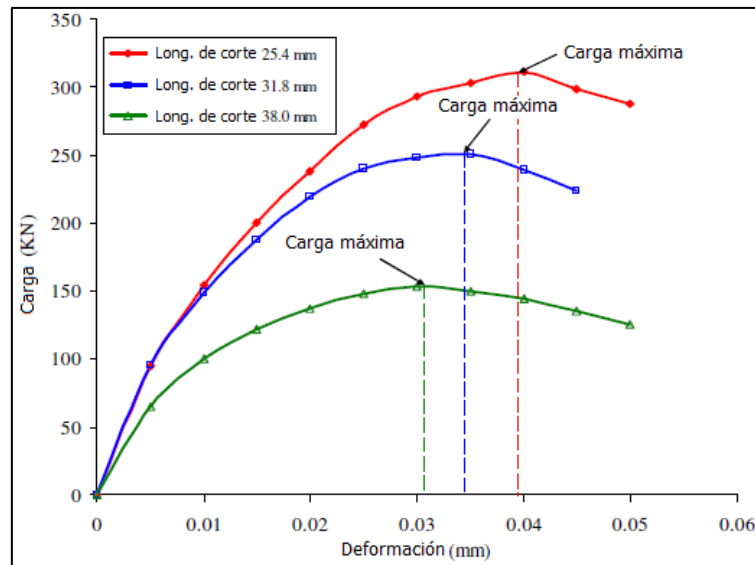


Figura 2-14. Curvas típicas de carga deformación del ensayo SCB

Fuente: Mohammad et al., 2012

El esfuerzo a tensión en el espécimen semicircular puede determinarse con la ecuación 34:

$$\sigma = \frac{6PL}{tD^2} \quad (34)$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo a tensión en el punto medio de la superficie inferior

$P$ : Carga

$L$ : Espaciamiento entre soportes

$t$ : Espesor del espécimen

$D$ : Diámetro del espécimen

La ecuación anterior asume una distribución ideal del esfuerzo en el espécimen. El esfuerzo a tensión determinado con la teoría lineal elástica no toma en cuenta la propagación de grietas, el efecto de arco del espécimen ni la no linealidad de la respuesta del material, de hecho, los

resultados obtenidos con esta teoría sobreestiman el verdadero esfuerzo a tensión del espécimen (Parker, 2010).

Para especímenes con cortes en la base la ecuación 35 puede aplicarse:

$$\sigma = \frac{4,263P}{tD} \quad (35)$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo a tensión en el punto medio de la superficie inferior

$P$ : Carga

$t$ : Espesor del espécimen

$D$ : Diámetro del espécimen

### ***2.6.9 Flexión Semicircular Repetida***

El ensayo a Flexión Semicircular Repetida (RSCB por sus siglas en inglés) se presenta como una propuesta para facilitar la comparación de resultados con ensayos de fatiga propiamente. Este ensayo utiliza especímenes con las mismas características que los del ensayo a Flexión Semicircular, pero con una carga de aplicación cíclica y constante.

En caso de que se requiera realizar el ensayo con un modo de carga a deformación constante, se requiere pegar el espécimen al actuador que aplica la carga, lo cual no es práctico debido a la geometría del mismo.

Parker (2010) implementa el ensayo a RSCB, pero en su investigación bibliográfica menciona que, aunque hay investigaciones que evalúan este ensayo previamente, los parámetros de carga no están totalmente definidos.

La frecuencia de carga puede ajustarse entre 1 y 10 Hz, no obstante, se puede aplicar una frecuencia que represente los patrones de carga de tráfico y que además genere un tiempo de ensayo adecuado. De acuerdo con Parker (2010) no es recomendable que haya período de descanso entre ciclos para tratar de excluir los efectos de la recuperación en el espécimen.

Similarmente como en el ensayo de Tensión Indirecta Repetida, la carga que utiliza Parker (2010) para realizar el ensayo RSCB es un porcentaje de la carga máxima encontrada en el ensayo SCB con carga incremental. El ensayo se realiza hasta que la grieta se propague a lo largo de todo el espécimen.



Parker (2010) implementa el ensayo a una frecuencia de 10 Hz (sin período de descanso) y con una carga equivalente al 50% de la carga máxima obtenida del ensayo con aplicación de carga a una tasa de desplazamiento constante.

Los resultados que se obtienen del ensayo RSCB son el número de ciclos y la deformación o desplazamiento vertical del espécimen medido en cada ciclo. Una gráfica típica de los resultados del ensayo RSCB se muestra en la Figura 2-15.

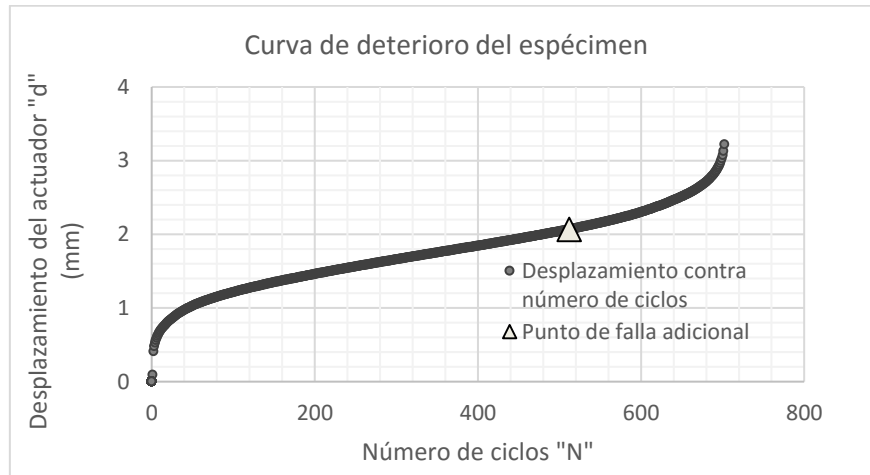


Figura 2-15. Curva típica del deterioro del espécimen del ensayo RSCB

A partir de la curva de deterioro, es posible desarrollar un método similar al propuesto por Rowe y Boulding para determinar la vida a fatiga en el ensayo de vigas a flexión. Primeramente se invierte la curva de deterioro al restar el máximo desplazamiento medido con el desplazamiento de cada ciclo:

$$d_{2i} = d_{max} - d_i \quad (36)$$

Donde:

$d_{2i}$ : Desplazamiento invertido del ciclo i

$d_{max}$ : Desplazamiento máximo, medido al último ciclo de carga

$d_i$ : Desplazamiento del ciclo i

La grafica invertida de desplazamiento se muestra en la Figura 2-16.

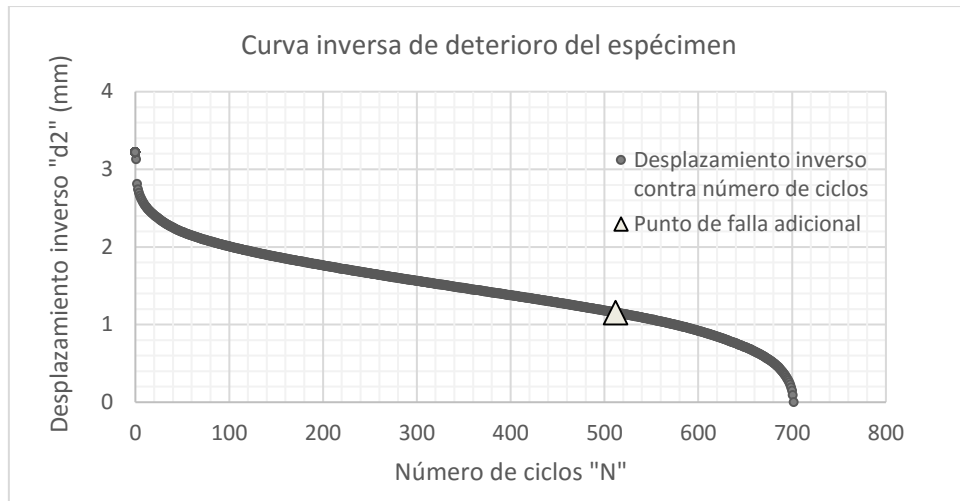


Figura 2-16. Curva inversa del deterioro de los especímenes del ensayo RSCB

A partir de la curva de deterioro inversa y multiplicando el desplazamiento inverso  $d_{2i}$  del ciclo  $i$  por el número de ciclo  $i$ , se puede realizar una gráfica que posee un punto máximo que puede definirse como punto de falla adicional. La curva generada se muestra en la Figura 2-17.

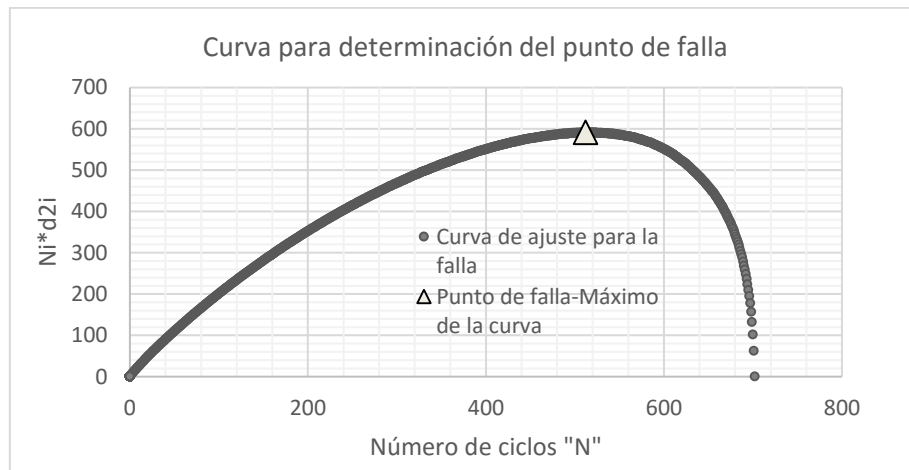


Figura 2-17. Curva para determinación del criterio de falla adicional del ensayo SCBR

Similar al proceso de degradación de fatiga explicado anteriormente, se puede establecer una fase inicial del deterioro caracterizado por un aumento del desplazamiento medido rápidamente al inicio, causado por la acción de la carga cíclica (fase de adaptación del espécimen). Conforme aumenta el número de ciclos, el deterioro permanece constante hasta que aparecen microfisuras en la parte superior del corte en la base. La microfisura se extiende en las inmediaciones del corte de la base hasta que la acción de la carga cíclica comienza a abrir el

espécimen en su parte inferior, causando la propagación de la grieta rápidamente a lo largo de la mayor parte de la altura del espécimen.

El punto máximo de la curva utilizada para la determinación del criterio de falla adicional ocurre justo antes de la propagación rápida de la grieta a lo largo de la altura del espécimen.

Parker (2010) concluye que el ensayo RSCB, con sus parámetros de ensayo, no es sensible al tamaño máximo nominal del agregado ni al contenido de asfalto, no obstante un mayor desarrollo es prometedor. Entre las recomendaciones se encuentran determinar una sola carga de aplicación independientemente del tipo de mezcla, no obstante para lo anterior se requiere de una base de datos suficientemente extensa y que sea representativa para la implementación del ensayo.

### ***2.6.10 Ensayo Overlay***

El ensayo *Overlay* es un ensayo diseñado para evaluar la reflexión de grietas en sobrecapas asfálticas colocadas sobre pavimentos de concreto, donde las juntas entre losas podrían reflejarse y por lo tanto ocasionar el fallo de la sobrecapa. Este ensayo también se puede utilizar para evaluar la capacidad de las mezclas asfálticas en caliente a resistir el daño por fatiga.

El procedimiento estándar para la realización de este ensayo (Tex-248-F, Procedimiento de ensayo para la prueba *Overlay*) fue realizado por el Departamento de Transportes de Texas. En el documento se especifica que el ensayo es adecuado para determinar la susceptibilidad de mezclas asfálticas al daño por fatiga o la reflexión de grietas. Una de las principales ventajas de este ensayo es la consistencia entre resultados de campo y laboratorio (Parker, 2010).

En el ensayo se aplica una carga a tensión directa sobre los especímenes. La carga (cíclica triangular) es aplicada hasta generar un desplazamiento constante de 0.635 mm en cada ciclo. Las dimensiones de los especímenes son de 38 mm  $\pm$  0,5 mm de alto, 150 mm  $\pm$  2 mm de largo y 76 mm  $\pm$  0,5 mm de ancho. En la Figura 2-18 se muestra el montaje del espécimen antes de la realización del ensayo.



*Figura 2-18. Ensayo Overlay*

Los especímenes son pegados sobre una base que se compone de dos bloques metálicos separados 2 mm, para simular el espaciamiento de las juntas de un pavimento de concreto. La Figura 2-19 presenta una imagen de las bases metálicas sobre las que se pegan los especímenes del ensayo *Overlay*.



*Figura 2-19. Bases metálicas para pegar especímenes del ensayo Overlay*

De los dos bloques metálicos de la base, cuando se fijan al dispositivo de aplicación de carga, uno se mantiene fijo y el otro es móvil. Cuando se aplica la carga, el bloque móvil se mueve hasta el máximo desplazamiento establecido en el ensayo y luego vuelve a su posición original en 10 s (equivalentes a un ciclo). La frecuencia del ensayo es de 1 Hz.

De acuerdo con el procedimiento de ensayo Tex-248-F, el ensayo se realiza hasta que se presente una reducción del 93% de la máxima carga aplicada (carga del primer ciclo). Si la carga no se reduce al 93% luego de 1000 ciclos el ensayo puede detenerse.

Algunos autores modifican el número máximo de ciclos para detener el ensayo a 1200, tal y como se muestra en la investigación de Walubita et al. (2012). Cuando se comparan mezclas asfálticas con buen desempeño a fatiga, en donde el número de ciclos necesario para fallar es superior a 1200, el ensayo no es adecuado si se realiza de acuerdo al protocolo Tex-248-F. Las pruebas a 25 °C y solo para 1200 ciclos no son suficientes para captar diferencias en la resistencia al agrietamiento de algunas mezclas, particularmente en mezclas con agregados de buena calidad (Walubita et al., 2012).

Entre las sugerencias y recomendaciones para mejorar la robustez y la repetitividad del ensayo *Overlay* se encuentran modificar los parámetros de ensayo (tasa de carga, temperatura, número de ciclos aceptables, entre otros) según sea necesario para los diferentes materiales, mezclas, aplicaciones y condiciones ambientales, con el fin de captar mejor el potencial de resistencia al agrietamiento de las diferentes mezclas (Walubita et al., 2012).

Diversos autores han investigado el efecto de la variación de la temperatura en el ensayo. Ma (2014) presenta un resumen de diversos estudios donde se han realizado ensayos a temperaturas entre 10 °C y 30 °C y donde se concluye que el punto de falla incrementa con la temperatura (aumento en el número de ciclos) pero la carga máxima disminuye conforme se aumenta este parámetro.

Uno de los principales problemas en este tipo de ensayos es la variabilidad de los resultados. Algunos autores han buscado alternativas para proponer un criterio de falla o comparación que aumente la repetitividad de los resultados y en la medida de lo posible que disminuya el número de ciclos necesarios para terminar el ensayo. Walubita et al. (2012) analiza distintas alternativas para analizar los resultados del ensayo *Overlay*, entre las que destacan:

- Energía de pseudo fractura: es el área bajo la curva carga-número de ciclos del ensayo hasta una reducción de carga del 93 %.
- Número de ciclos a diferentes porcentajes de reducción de carga: evaluación de los resultados para un 50%, 75% y 85% de la reducción de la carga inicial.

Dichas alternativas no presentan una reducción significativa en el coeficiente de variación de los resultados y en algunos casos lo aumentan. Con respecto a la evaluación y comparación de las mezclas a un 50% y 75% de la reducción de carga inicial se tiene el problema de que dichas reducciones se podrían presentar muy rápido y no generan suficientes datos para comparar

entre MAC adecuadamente. En la Figura 2-20 se muestra un esquema de los puntos de reducción de carga adicionales mencionados.

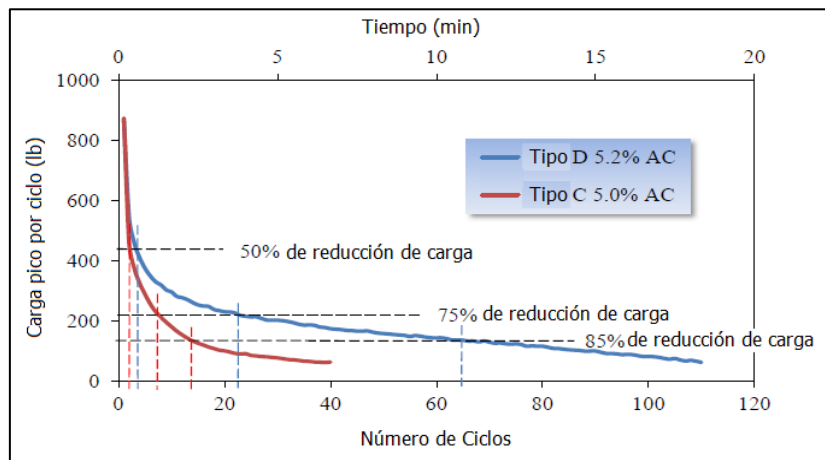


Figura 2-20. Gráficos de carga-número de ciclos: número de ciclos en puntos adicionales de reducción de carga

Fuente: Mohammad et al., 2012

El mayor problema de utilizar puntos alternativos de reducción de carga es definir una interpretación física adecuada que defina el porcentaje de reducción seleccionado y que pueda asociarse con las condiciones o resultados de campo (Walubita et al., 2012).

Ma (2014) presenta un método adicional de carga normalizada por ciclo (Método NLC por sus siglas en inglés) para la determinación del punto de falla del ensayo *Overlay*, al normalizar la carga por ciclo y graficarla contra el número de ciclos. La curva generada posee un punto máximo que es definido como punto de falla, tal y como se muestra en la Figura 2-21.

La carga normalizada por ciclo se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$NLC = \frac{P_i * N_i}{P_1 * N_1} \quad (37)$$

Donde:

$NLC$ : Carga normalizada por ciclo

$P_i$ : Carga pico al ciclo número  $i$

$N_i$ : Número de ciclo  $i$

$P_1$ : Carga pico del primer ciclo número

$N_1$ : Primer ciclo

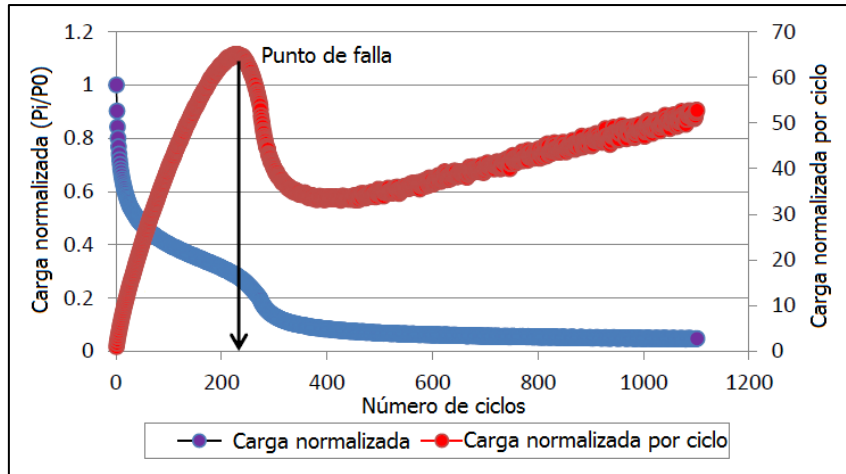
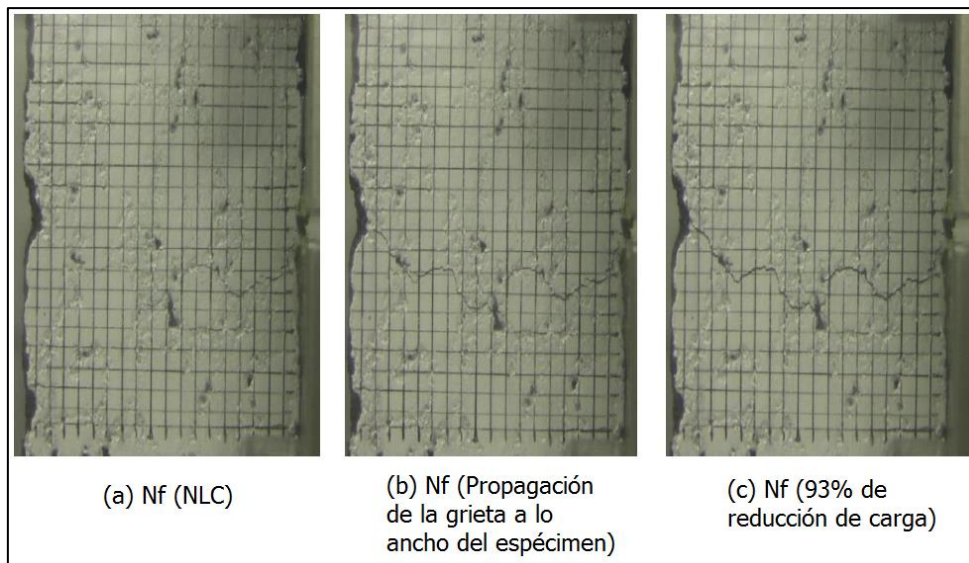


Figura 2-21. Determinación del punto de falla con el método NLC

Fuente: Ma, 2014

Para justificar la utilización del método NLC se presenta la Figura 2-22. La Figura 2-22 (a) presenta la condición de agrietamiento normalmente presentada al utilizar el método NLC, cuando la grieta aún no se ha propagado a través del ancho del espécimen. La Figura 2-22 (b) muestra la condición de agrietamiento en el momento en el que la grieta se termina de propagar a través de todo el ancho del espécimen. La Figura 2-22 (c) muestra la condición de agrietamiento cuando se da una reducción del 93% de la carga inicial, en este punto la grieta generalmente se ha propagado a lo ancho de todo el espécimen.



(a) Nf (NLC)

(b) Nf (Propagación de la grieta a lo ancho del espécimen)

(c) Nf (93% de reducción de carga)

Figura 2-22. Agrietamiento del espécimen en diferentes momentos

Fuente: Ma, 2014

Si se realiza una gráfica de la carga pico por ciclo contra el número de ciclos es posible identificar los siguientes estados (ver Figura 2-23):

- Estado I: Reducción de la carga drásticamente
- Estado II: La carga pico disminuye a una tasa casi constante. El punto de falla del método NCL se encuentra al final de este estado. En este punto, aunque las grietas no son visibles a través de todo el ancho del espécimen, podrían haber microgrietas a lo largo del espécimen que no son visibles y que posteriormente ocasionan una propagación rápida de la grieta visible.
- Estado III: La tasa de agrietamiento aumenta rápidamente antes del punto de falla, el punto final de este estado suele coincidir con la propagación de la grieta a lo largo del espécimen.
- Estado IV: La carga pico comienza a disminuir a una tasa menor, podrían presentarse muchos ciclos antes de alcanzar el 93% de la reducción de la carga inicial.

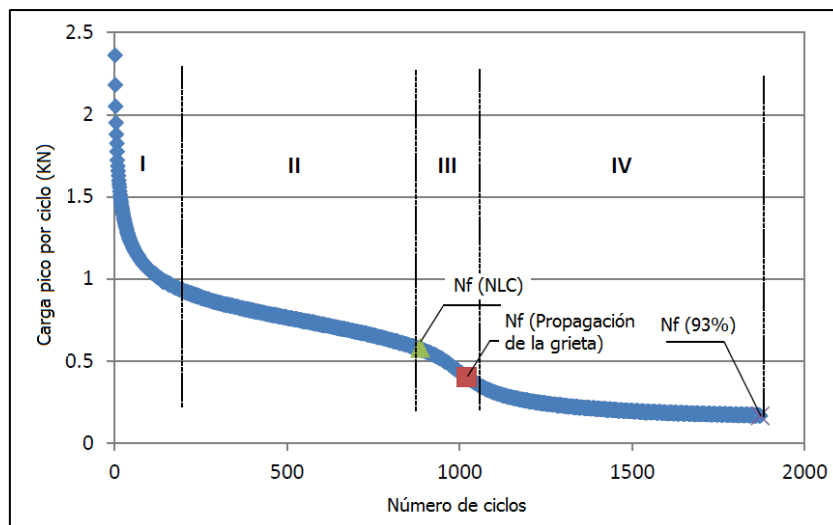


Figura 2-23. Puntos de falla y estados presentados en la curva de carga

Fuente: Ma, 2014

El punto de falla real debería definirse para el instante en el que la grieta se propaga a través del ancho del espécimen, no obstante definir dicho punto es difícil y se requiere realizar grabaciones de todos los ensayos para establecerlo adecuadamente. Ma, 2014 realiza un análisis para determinar cuál método (NCL o 93% de la reducción de la carga inicial) genera resultados más comparables o similares con el de la falla real y concluye que el método NCL es adecuado para el análisis de los resultados del ensayo.



### 2.6.11 Tensión en especímenes con forma de disco

El ensayo de fractura con especímenes en forma de disco (DC(T) por sus siglas en inglés) es utilizado para obtener la resistencia a la fractura de mezclas asfálticas, utilizando la energía de fractura como parámetro de comparación. En el ensayo se utilizan especímenes con características como las mostradas en la Figura 2-24

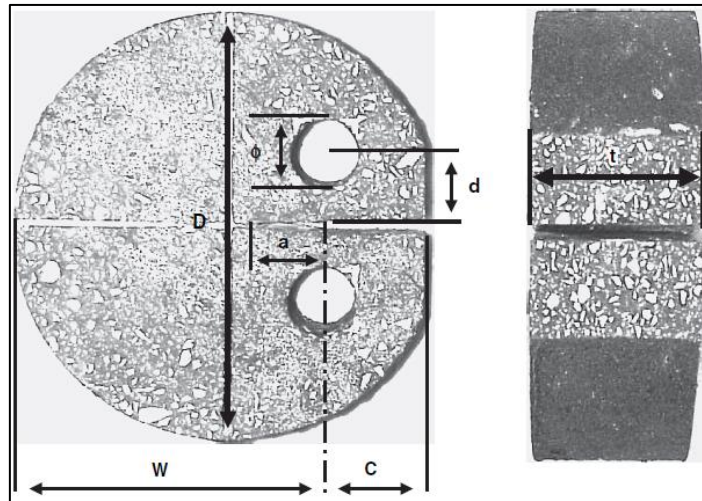


Figura 2-24. Especímenes del ensayo DC(T)

Fuente: Wagoner et al., 2014

Las dimensiones del ensayo, acordes con la nomenclatura de la Figura 2-24 se presentan en el Cuadro 2-3.

Cuadro 2-3. Dimensiones recomendadas de los especímenes del ensayo DC(T)

Dimensiones recomendadas (mm)	
D	150
W	110
Φ	25
a	27,5
d	25
C	35
t	50

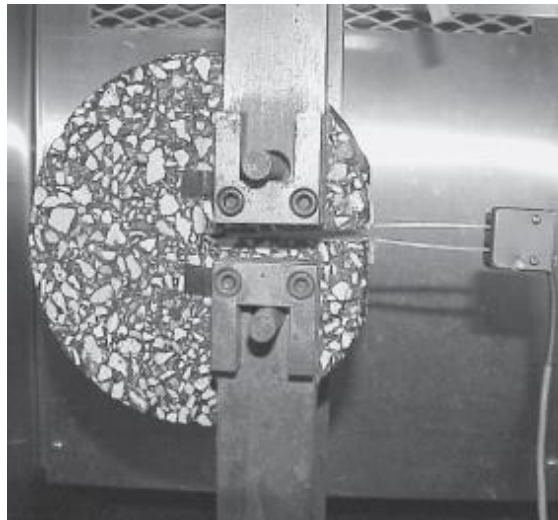
Fuente: Wagoner et al., 2014

Las características de la prueba de laboratorio son tomadas de la norma de ensayo ASTM E399 (Método estándar de prueba para fractura de materiales metálicos). La principal ventaja de la configuración de la prueba, respecto a otros ensayos del mismo tipo como la prueba de flexión

semicircular, es el aumento en el área de fractura. Dicho aumento reduce la influencia de la proximidad de las zonas exteriores del espécimen.

La configuración de carga consiste en aplicar una carga a una tasa de abertura constante en la base del corte del espécimen (desplazamiento de abertura de grieta en la boca, CMOD por sus siglas en inglés), para mantener una fractura estable luego de la falla. La energía de fractura es calculada determinando el área bajo la curva de carga contra CMOD.

Este ensayo generalmente se ha realizado a bajas temperaturas (inferiores a 0 °C). Una tasa de carga CMOD de 1 mm/min es utilizada normalmente (Wagoner et al., 2005) La carga se aplica en tensión, sobre los huecos realizados en el espécimen, hasta que el espécimen falle totalmente. En la Figura 2-25 se muestra la configuración experimental del ensayo.



*Figura 2-25. Configuración experimental del ensayo DC(T)*

Fuente: Wagoner et al., 2014

Las dimensiones del espécimen fueron inicialmente establecidas para mezclas de 9,5 mm de tamaño máximo nominal, pero se han aplicado con éxito para mezclas de 4,75 mm y 19 mm de tamaño máximo nominal de agregado. (Kim et al., 2008)

## **2.7 Resumen**

Existen diversos ensayos de que permiten evaluar la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de mezclas asfálticas en caliente. Los ensayos de fractura permiten obtener parámetros para comparar resultados entre mezclas y determinar cuáles son más propensas a sufrir daño por

fatiga. Los ensayos por fatiga permiten determinar el número de ciclos de carga necesarios para provocar el agrietamiento por fatiga.

El agrietamiento por fatiga en carreteras es generado principalmente por las repeticiones de carga de los vehículos, por lo que los ensayos con carga cíclica son más adecuados para predecir el comportamiento ante el tipo de daño estudiado. Además, la obtención del número de ciclos permite la generación de modelos de predicción que pueden usarse en procesos de diseño.

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **3.1 Diseños de MAC**

Los diseños de las MAC fueron realizados para el Proyecto de Daño por Humedad desarrollado en el LanammeUCR. Los diseños se realizaron en base a la metodología Superpave y respetan los requerimientos establecidos en el CR-2010 para un rango de ejes equivalentes de diseño (ESAL) de 3 millones a 30 millones. Para el desarrollo del presente proyecto se utilizan los diseños ya elaborados.

Se utilizaron mezclas de control (con asfalto sin modificar), mezclas con asfalto modificado con un 2% de SBS, mezclas con asfalto modificado con 2 % de SBS y 0,5 % de antidesnudante líquido (MB) y mezclas con asfalto modificado con 2% de SBS y donde se sustituyó un 1 % del peso del agregado por cal (el peso de cal agregado fue restado al material pasando el tamiz #200). Cada una de las mezclas se realizó con dos granulometrías diferentes, una de 9,5 mm de tamaño máximo nominal del agregado (TMN) y otra de 12,5 mm TMN.

El procedimiento de modificación del asfalto con SBS y antidesnudante líquido es muy similar. Se utiliza una olla y un agitador mecánico para mezclar el asfalto con el modificante o aditivo. El asfalto debe estar a la temperatura de modificación (177 °C en el caso de las mezclas utilizadas en el presente documento) antes de verterlo en la olla. Cuando la temperatura del controlador de la olla estabiliza en el valor deseado, se procede a pesar el asfalto virgen y a verterlo en la olla. Posteriormente se coloca el agitador mecánico y se pone a funcionar. Finalmente, se determina el peso del modificante y se agrega al asfalto. El proceso de mezclado dura al menos 3 horas.

Los contenidos de asfalto óptimo determinados en los diseños de las MAC y las temperaturas de mezclado y compactación obtenidas en el LanammeUCR para las mezclas utilizadas se muestran a en el Cuadro 3-1. Nótese que todas las mezclas modificadas tienen las mismas temperaturas de mezclado y compactación. El contenido de asfalto óptimo varía entre mezclas porque cada contenido es obtenido de un diseño específico de mezcla.

*Cuadro 3-1. Características generales de las MAC*

<b>Mezclas</b>	<b>Designación</b>	<b>Contenido óptimo de asfalto PTM (%)</b>	<b>Temperatura de mezclado (°C)</b>	<b>Temperatura de compactación (°C)</b>
9,5 mm TMN Control	9,5 CT	6,5	154-159	145-149
9,5 mm TMN + 2% SBS	9,5 SBS	6,5	171-177	161-165
9,5 mm TMN + 2% SBS + 0,5 % MB	9,5 SBS+MB	6,3	171-177	161-165
9,5 mm TMN + 2% SBS + 1% Cal	9,5 SBS+CAL	6,6	171-177	161-165
12,5 mm TMN Control	12,5 CT	7	154-159	145-149
12,5 mm TMN + 2% SBS	12,5 SBS	6,5	171-177	161-165
12,5 mm TMN + 2% SBS + 0,5 % MB	12,5 SBS+MB	5,9	171-177	161-165
12,5 mm TMN + 2% SBS + 1% Cal	12,5 SBS+CAL	6,3	171-177	161-165

### **3.1.1 Materiales utilizados en los diseños de MAC**

El asfalto utilizado es un AC-30 obtenido de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). El asfalto es equivalente a un PG: 70 (28) - 22 en la clasificación por grado de desempeño. Al modificarse con un 2% de SBS el grado de desempeño cambia a PG: 76 (25) - 22. No hay una variación significativa en el grado de desempeño al modificar el asfalto 2% de SBS y 0,5 % de MB, con respecto al obtenido al modificarlo únicamente con 2% de SBS.

El agregado fue obtenido de Barranca, Puntarenas y dividido en 3 apilamientos separados de acuerdo al tamaño del material. El apilamiento de material grueso (TMN 12,5 mm) presenta predominancia de tamaños retenidos entre el tamiz de 12,5 mm (aproximadamente 41 %) y el de 9,5 mm (aproximadamente un 52 %). El apilamiento de material intermedio (TMN 9,5 mm) posee principalmente material de tamaños retenidos entre el tamiz de 4,75 mm (aproximadamente 66%) y el de 9,5 mm (aproximadamente 31%). El apilamiento de material fino (TMN 4,75 mm) posee una distribución relativamente uniforme de tamaños retenidos entre el tamiz de 4,75 mm y la charola (material pasando la malla #200).

Los agregados fueron tamizados malla por malla con el fin de controlar adecuadamente las granulometrías utilizadas para la realización de especímenes. Se utilizó una curva granulométrica para todas las mezclas de 9,5 mm TMN y otra para las de 12,5 mm TMN, ambas son graduaciones densas (gruesas) con predominancia de material retenido en el tamiz de

abertura de 2,36 mm o superior. El Cuadro 3-2 y el Cuadro 3-3 muestran las características de las granulometrías usadas junto con las especificaciones del CR-2010 (ver Figura 3-1 y Figura 3-2).

Cuadro 3-2. Granulometría utilizada en las mezclas de 9,5 mm TMN

Malla	Abertura (mm)	% Pasando	Especificación CR-2010		
			Min	Max	Tolerancia
3/4"	19	100			
1/2"	12,5	100	100	100	±5
3/8"	9,5	95,0	90	100	±5
Nº 4	4,75	60,0	55	75	±4
Nº 8	2,36	40,0	32	47	±4
Nº 16	1,18	25,0	19	31	±4
Nº 30	0,6	17,0	11	23	±4
Nº 50	0,3	10,0	7	19	±4
Nº 100	0,15	7,0			
Nº 200	0,08	5,0	2	10	±2

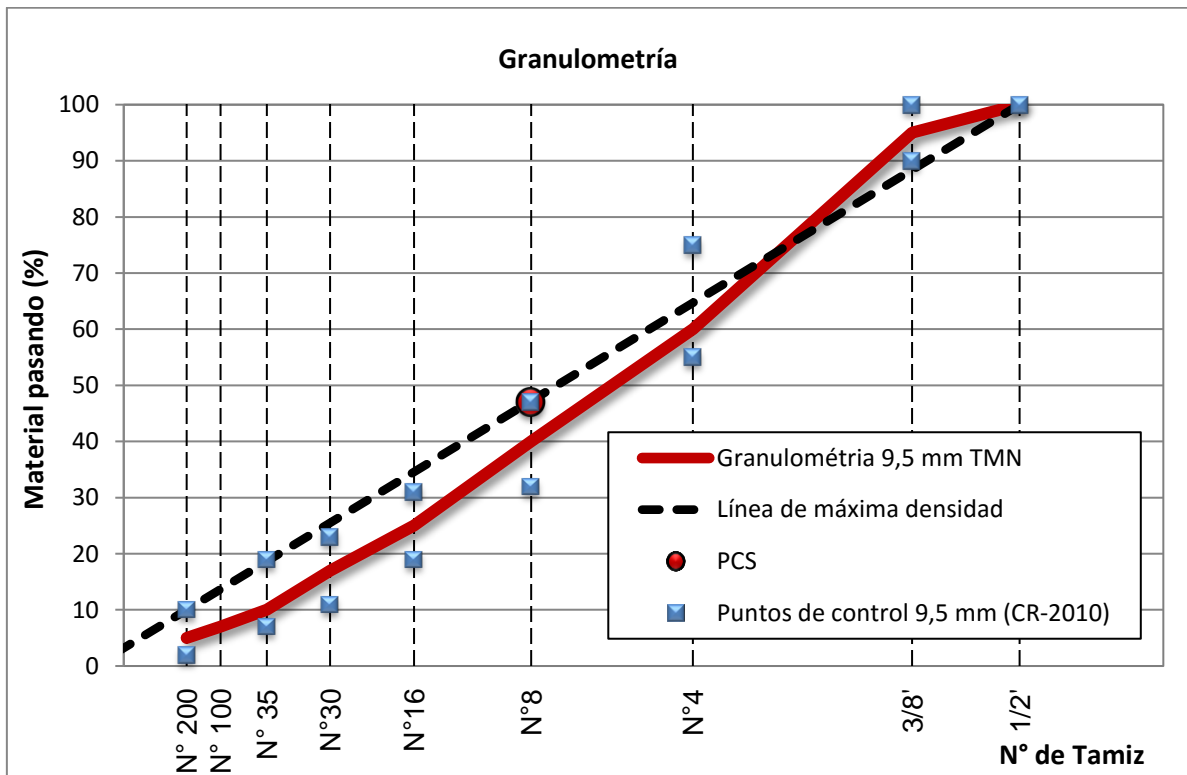


Figura 3-1. Curva granulométrica usada en la mezclas de 9,5 mm TMN

Cuadro 3-3. Granulometría utilizada en las mezclas de 12,5 mm TMN

Malla	Abertura (mm)	% Pasando	Especificación CR-2010		
			Min	Max	Tolerancia
3/4"	19	100	100	100	±5
1/2"	12,5	95,4	90	100	±5
3/8"	9,5	78,3	70	90	±5
N° 4	4,75	43,3	45	65	±4
N° 8	2,36	28,9	28	39	±4
N° 16	1,18	20,0	16	26	±4
N° 30	0,6	14,8	9	19	±4
N° 50	0,3	10,9	5	16	±4
N° 100	0,15	8,0			
N° 200	0,08	5,8	2	8	±2

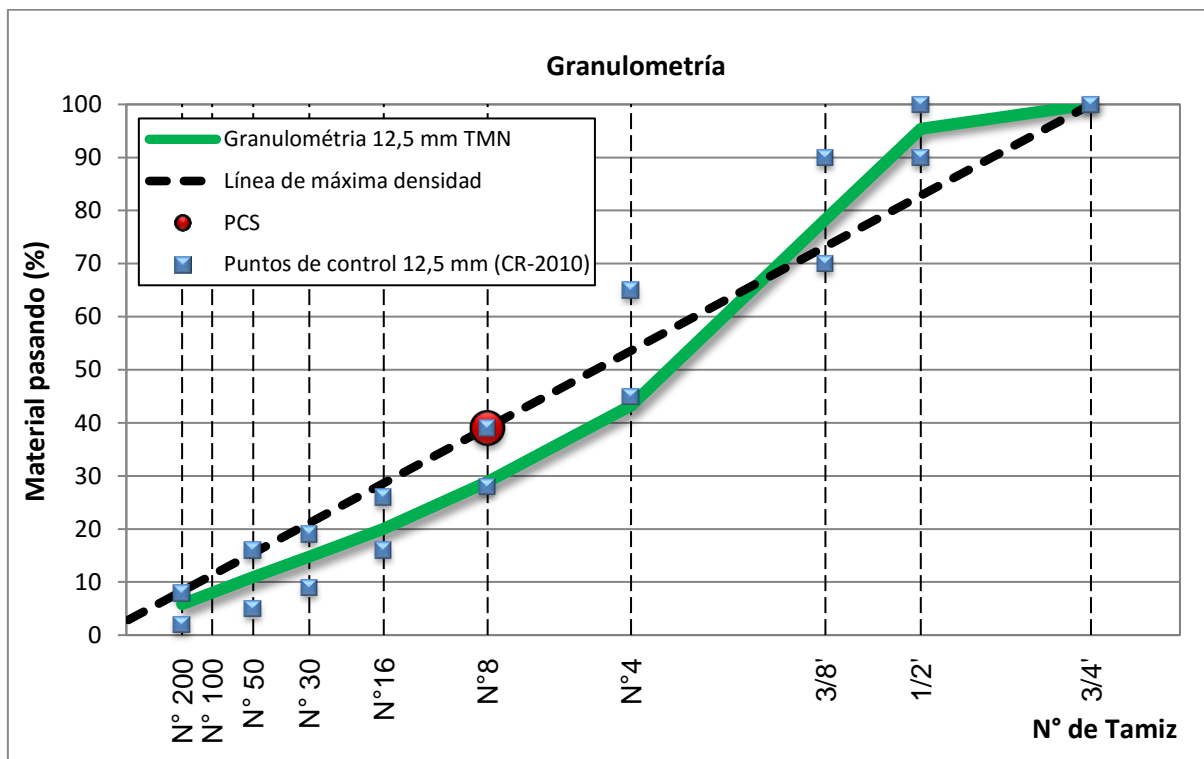


Figura 3-2. Curva granulométrica usada en las mezclas de 12,5 mm TMN

### 3.2 Elección de ensayos evaluados

Se realizó una investigación bibliográfica de diferentes ensayos de fatiga y fractura existentes, para poder elegir algunos que se puedan evaluar y comparar con el ensayo de vigas a flexión en 4 puntos.

Entre los criterios de elección se encuentran la facilidad de aplicación del ensayo, tamaño de especímenes, aplicabilidad en campo, información de los parámetros de ensayo encontrados en documentos de referencia y disponibilidad del equipo de laboratorio para la implementación del ensayo.

La mayoría de procedimientos de ensayo encontrados no cuentan con una norma explícita donde se detallen adecuadamente los parámetros de ensayo, no obstante, es posible encontrar valores recomendados en diferentes documentos que permiten la definición de un método de ensayo. Algunos ensayos como el ensayo a flexión semicircular con carga repetida, no cuentan con una investigación extensa que valide su uso, sin embargo, se plantea como una prueba con gran potencial de evaluación.

Para facilitar la comparación de datos y utilizar parámetros de evaluación de fatiga similares se decide no utilizar ensayos de fractura (con aplicación de carga a una tasa de deformación constante). Los ensayos con carga repetitiva son más fáciles de analizar entre sí, pues el principal parámetro de evaluación de los mismos es el número de ciclos a la falla.

El ensayo *Overlay* posee un protocolo de procedimiento detallado que facilita la implementación del mismo. Además, de acuerdo con la investigación realizada, la consistencia entre los resultados de campo y laboratorio es adecuada en esta prueba. Los especímenes de ensayo son relativamente fáciles de realizar y el laboratorio cuenta con equipo para la realización del ensayo (AMPT).

El ensayo a tensión directa repetida es difícil de aplicar en campo, principalmente por las dimensiones de los especímenes, por lo que se excluye del análisis.

Con respecto al ensayo de tensión indirecta repetida, como se mencionó en el marco teórico, presenta un estado biaxial de esfuerzo cuando los especímenes son cargados, lo que puede afectar los resultados. Por otra parte, la medición de las deformaciones en el ensayo puede ser difícil y verse afectada por el tamaño de los agregados. El tamaño de los especímenes facilita la realización con especímenes obtenidos en campo. En el laboratorio hay equipos donde se puede llevar a cabo la falla a tensión indirecta y por lo tanto es posible la adaptación del método de ensayo. La principal dificultad de la prueba es la adaptación de medidores de deformación horizontal.

El RSCB no ha sido investigado e implementado en suficientes investigaciones, por lo que únicamente se presenta como un ensayo con potencial de aplicabilidad. Las dimensiones de



los especímenes y la fácil aplicabilidad de ensayo son ventajas que se presentan en comparación con las demás pruebas. Existe equipo en el laboratorio adaptable para la realización del ensayo. Como la única medición adicional al número de ciclos es la deformación o desplazamiento vertical, no hay mayor complicación en la realización de prueba. Los actuadores de aplicación de carga normalmente son capaces de medir el desplazamiento vertical.

Se seleccionaron el ensayo Overlay y el ensayo RSCB para la comparación de ensayos de fatiga, pues cumplen con los criterios de elección mencionados anteriormente.

### **3.3 Preparación de especímenes de ensayo**

La preparación de especímenes involucró la realización de las graduaciones de agregado para cada espécimen, el proceso de mezclado, el envejecimiento en horno a corto plazo, la compactación, la verificación de vacíos de los especímenes base (opcional), el proceso de corte, el análisis volumétrico para determinar el porcentaje de vacíos de cada espécimen y el envejecimiento de especímenes en horno a largo plazo.

#### ***3.3.1 Graduaciones de los agregados***

Los agregados fueron obtenidos de los diferentes apilamientos y colocados al menos 14 horas en hornos a una temperatura de 110 °C para secarlos. Posteriormente fueron tamizados malla por malla y almacenados en barriles de plástico para evitar la absorción de humedad.

Las graduaciones se realizaron de acuerdo al peso de los especímenes a mezclar y se utilizaron las granulometrías presentadas anteriormente para determinar el peso por tamiz a usar, según el TMN de la mezcla.

#### ***3.3.2 Mezclado, envejecimiento en horno a corto plazo y compactación de especímenes***

Antes del proceso de mezclado, el agregado fue calentado a la temperatura de mezclado al menos 4 horas para remover el contenido de humedad que pudo haber ganado durante el almacenamiento y la realización de las granulometrías. El asfalto fue calentando por un período similar de tiempo para asegurarse que estuviera a la temperatura de mezclado. El mezclado se realizó manualmente.

El envejecimiento en horno a corto plazo fue llevado a cabo a la temperatura de compactación durante las siguientes dos horas luego del proceso de mezclado. Este proceso simula el envejecimiento de la MAC ocurrido durante el transporte, puesta en sitio y compactación en campo.

En el proceso de compactación se obtienen los especímenes base, a partir de los cuales se obtienen los ejemplares finales de ensayo. La utilización de especímenes base permite la obtención de especímenes de prueba con una distribución más uniforme de vacíos.

Los especímenes base del ensayo de fatiga a flexión en 4 puntos son compactados utilizando el compactador de rodillo con hoja de acero. Se utilizan aproximadamente 21 kg de MAC para fabricar especímenes rectangulares de aproximadamente 430 mm de largo, 300 mm de ancho y altura variable (entre 50 mm y 95 mm). El porcentaje de vacíos de aire recomendable de dicho bloque es de  $8 \pm 1 \%$ , pues cuando los especímenes de prueba son cortados hay una reducción en el porcentaje de vacíos de aire de  $1 \pm 0,5 \%$ .

Se propone una metodología de preparación de especímenes para los ensayos *Overlay* y RSCB, basada en procedimientos seguidos anteriormente en el laboratorio (LanammeUCR) y siguiendo recomendaciones de técnicos experimentados. La metodología busca facilitar el procedimiento de corte, disminuir la cantidad de especímenes base a realizar y reducir el desperdicio de material.

El proceso consiste en la extracción de todos los especímenes requeridos en cada prueba (*Overlay* y RSCB) a partir de un espécimen base cilíndrico compactado en el Compactador Giratorio Superpave (CGS). El cilindro base posee una altura de 172 mm y un diámetro de 150 mm. El porcentaje de vacíos de dicho cilindro es de  $8 \pm 1 \%$  y se espera una reducción de aproximadamente  $1 \pm 0,5 \%$  luego de la extracción de las muestras de ensayo. Se requirió entre 6550 gramos y 6660 gramos de mezcla para la obtención de dichos especímenes.

El análisis volumétrico de los especímenes base fue realizado utilizando la norma AASHTO T269 (Método estándar de prueba para determinar el porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas abiertas y densas). La gravedad específica máxima fue obtenida de ensayos realizados en el proceso de diseño de las mezclas y por lo tanto los datos fueron brindados por el LanammeUCR.

### 3.3.3 Procedimiento de corte de especímenes

Los especímenes utilizados en el ensayo de viga a flexión en 4 puntos son obtenidos a partir de los bloques compactados en el compactador de rodillo. Es posible obtener 3 especímenes de ensayo a partir de un bloque.

En la Figura 3-3 se ejemplifica el proceso de corte de bloques de fatiga. En la Figura 3-3 (a) se presenta el bloque con sus dimensiones iniciales, además de líneas punteadas que representan las líneas guías de corte. Los cortes se realizan primeramente a lo largo del bloque, quedando 3 especímenes como el mostrado en la Figura 3-3 (b) y los 2 extremos laterales que son desechados. Posteriormente se corta la superficie superior para obtener un espécimen como el mostrado en la Figura 3-3 (c). Los últimos dos cortes se realizan en las caras, quedando el espécimen final de ensayo (Figura 3-3 (d)).

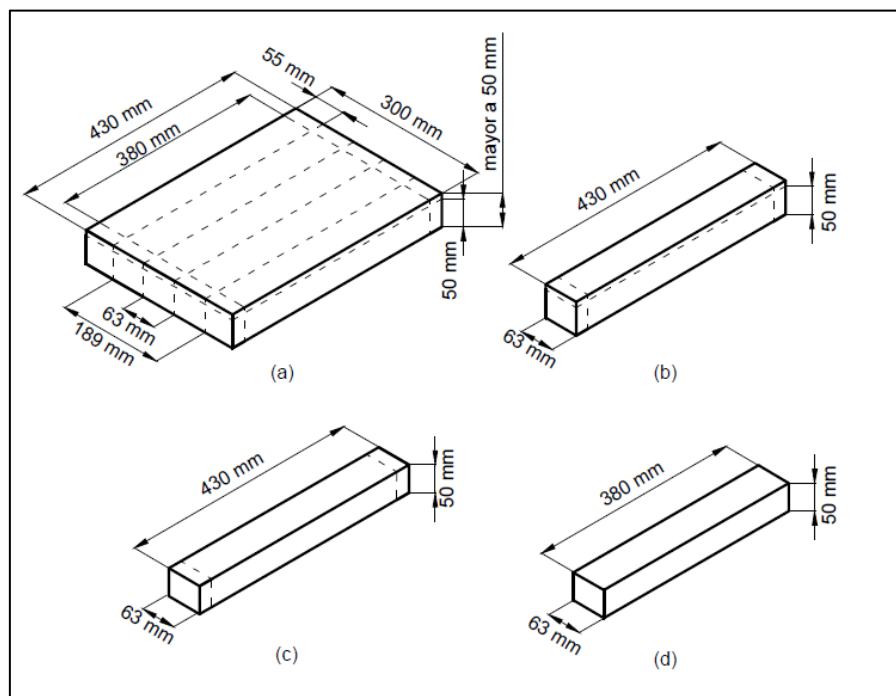
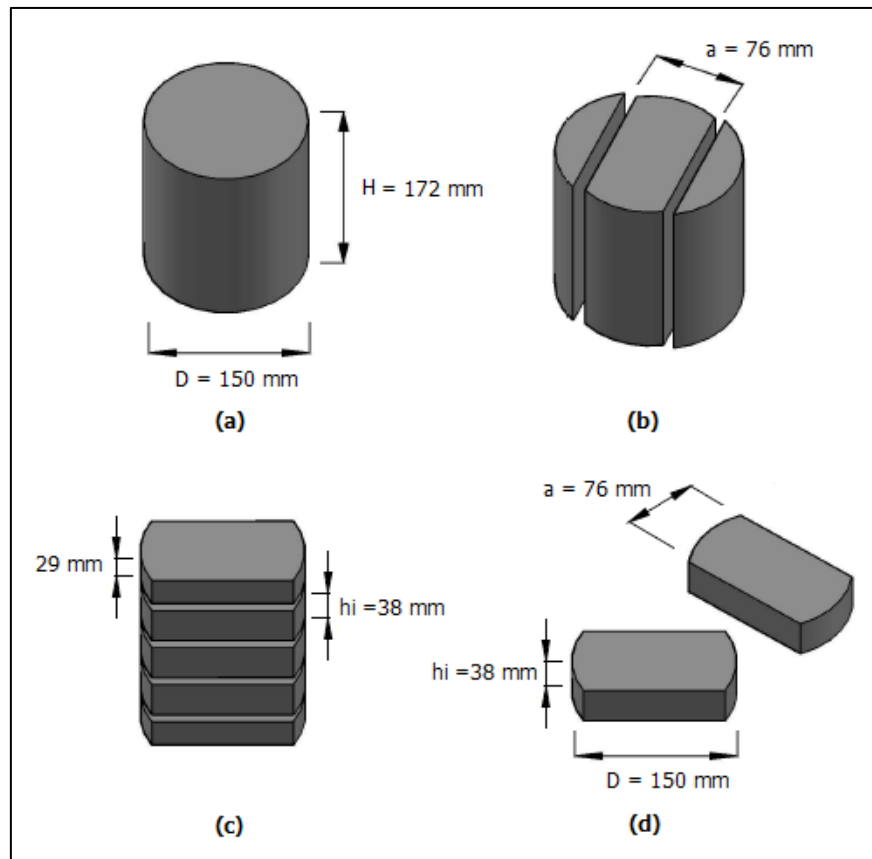


Figura 3-3. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo de vigas a flexión

Los especímenes utilizados en el ensayo Overlay son obtenidos a partir de un cilindro de 172 mm de altura y 150 mm de diámetro. Tres muestras de ensayo son extraídas de la parte central del espécimen base, la parte superior e inferior fueron cortadas y descartadas. Es importante mencionar que el procedimiento del ensayo Overlay (Tex-248-F) propone la realización de especímenes base de 115 mm de altura y 150 mm de diámetro, a partir de los cuales se obtiene

un único espécimen de ensayo. Con la metodología propuesta la variabilidad en el contenido de vacíos puede ser mayor.

En la Figura 3-4 se ilustra el proceso de corte de especímenes del ensayo Overlay. La Figura 3-4 (a) muestra el cilindro base con las dimensiones iniciales. La Figura 3-4 (b) presenta los cortes realizados para obtener el núcleo con el ancho requerido de las muestras finales. En la Figura 3-4 (c) se presentan los cortes realizados a lo largo de la altura del núcleo para la obtención de los especímenes de ensayo (Figura 3-4 (d)). Las secciones superior e inferior de la Figura 3-4 (c) son desechadas.



*Figura 3-4. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo Overlay*

Para el ensayo RCSB se cortaron 3 discos de 40 mm de altura de la parte central de un cilindro de 172 mm de altura y 150 mm de diámetro. A partir de cada disco es posible obtener 2 especímenes de ensayo.

En la Figura 3-5 se ilustra el proceso de corte de especímenes del ensayo RCSB. La Figura 3-5 (a) presenta el cilindro base con las dimensiones iniciales. En la Figura 3-5 (b) se muestran los

cortes realizados a lo largo de la altura del cilindro inicial para la obtención de especímenes con forma de disco y con el espesor requerido. Las secciones superior e inferior de la Figura 3-5 (b) son desechadas. A partir de cada disco es posible obtener 2 especímenes para el ensayo RSCB (Figura 3-5 (c)). Finalmente, se realizan los cortes de la ranura a la mitad de la parte inferior de la base, quedando los especímenes de ensayo terminados (Figura 3-5 (d)).

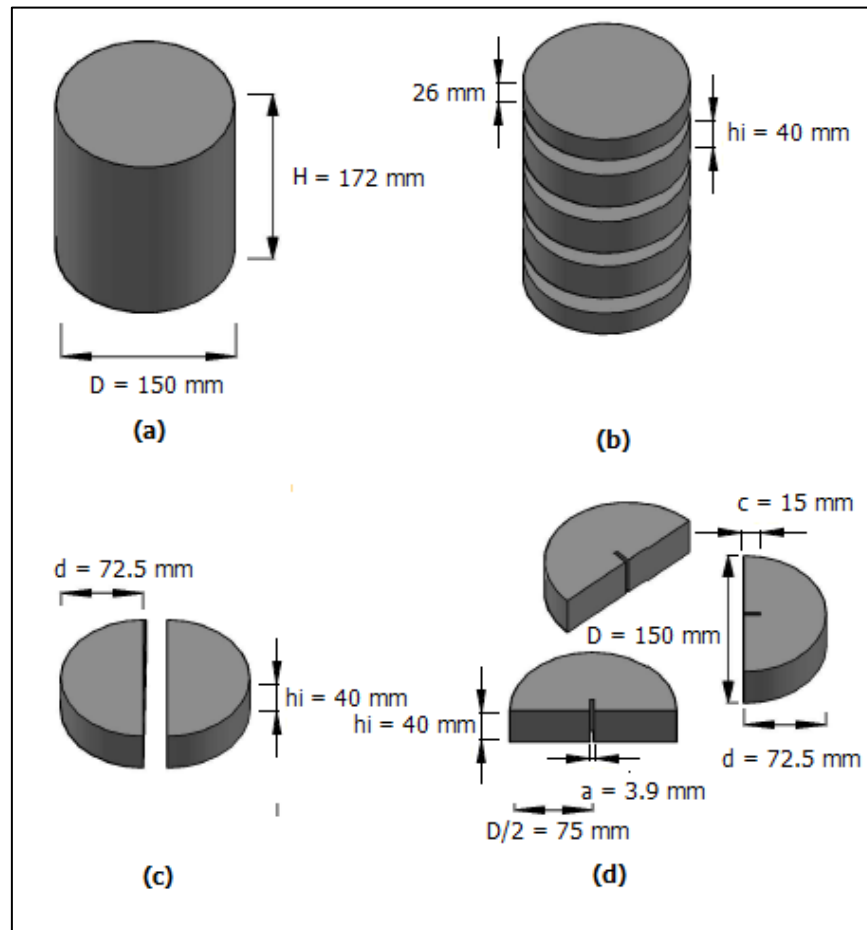
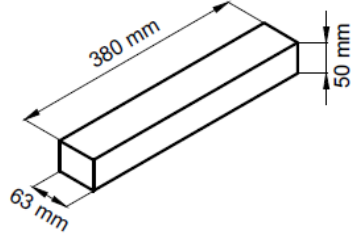
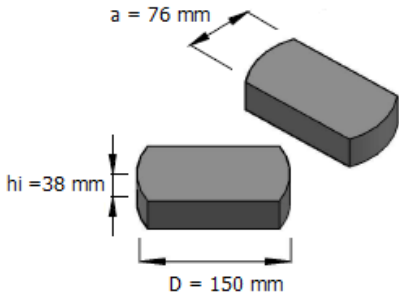
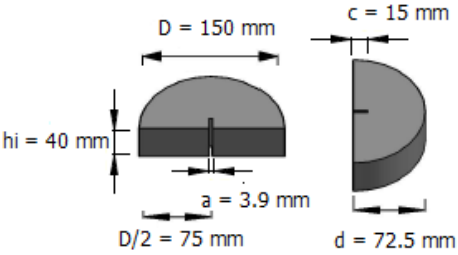


Figura 3-5. Procedimiento de corte de especímenes del ensayo RSCB

Las figuras que ilustran los procedimientos de corte de especímenes son esquemáticas principalmente, para dar una idea del proceso de cortado de especímenes. Cuando se realizan los cortes y mediciones se debe tomar en cuenta el ancho de la hoja de corte de la sierra para evitar afectar las dimensiones deseadas. En todos los casos se utilizó una sierra manual y una sierra especial para cortar bloques compactados en el compactador de rodillo, dependiendo de los cortes que se requirieran.

En el Cuadro 3-4 se muestra un resumen de las dimensiones de los especímenes de ensayo con las respectivas tolerancias utilizadas.

*Cuadro 3-4. Dimensiones y tolerancias de los especímenes de ensayo*

Ensayo	Geometría	Representación física
Viga a flexión en 4 puntos	380 ± 6 mm de largo, 63 ± 6 mm de ancho y 50 ± 6 mm	
Overlay	150 ± 2 mm de largo (equivalente al diámetro del espécimen base), 38 ± 0,5 mm de altura y 76 ± 0,5 mm de ancho.	
RSCB	150 ± 2 mm de largo de base (equivalente al diámetro del espécimen base), 40 ± 0,5 mm de espesor (hi), 72,5 ± 1 mm de altura (d), 15 ± 1 mm de profundidad de corte (c) y 3,9 ± 1 mm de espesor de corte (a).	

### **3.3.4 Análisis volumétrico de especímenes**

Todos los especímenes utilizados para las pruebas de laboratorio fueron fabricados procurando obtener un porcentaje de vacíos de  $7 \pm 1$  %. Dicho porcentaje es usado para simular la condición de la carpeta asfáltica justo después de su compactación en sitio. Además, ese es el porcentaje de vacíos solicitado en los procedimientos de ensayo de la norma AASHTO T321 y

la Tex-248-F. Al igual que con los especímenes base, el análisis volumétrico fue realizado utilizando la norma AASHTO T269.

Para la obtención del peso seco de los especímenes del ensayo de vigas a flexión se utilizó el secado al aire (en frente de un ventilador) al menos durante 24 horas, cambiando de posición las vigas frecuentemente para que las zonas de exposición al aire variaran e inducir un secado más uniforme. Los especímenes del ensayo *Overlay* y RSCB fueron secados en una cámara de temperatura con ventiladores a una temperatura entre 30 °C y 35 °C durante al menos 14 horas.

### ***3.3.5 Envejecimiento de especímenes en horno a largo plazo***

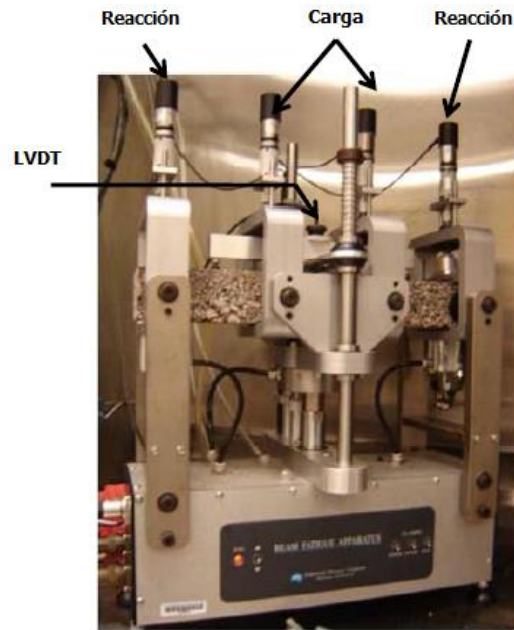
El procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo fue tomado de la norma AASHTO R 30-02 (Procedimiento estándar para el acondicionamiento de Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC)). Este proceso simula el envejecimiento que ocurre a lo largo de la vida de servicio del pavimento. El procedimiento consiste en acondicionar los especímenes en un horno a  $85 \pm 3$  °C durante  $120 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$ .

El envejecimiento a largo plazo fue llevado a cabo para disminuir la vida a fatiga de los especímenes y reducir el tiempo de los ensayos. El ensayo *Overlay* se realizó sin dicho envejecimiento para 6 de las 8 mezclas de análisis y con el envejecimiento para las 8 mezclas evaluadas.

## **3.4 Procedimientos de ensayo**

### ***3.4.1 Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos***

El ensayo de vigas a flexión en 4 puntos se realizó en un equipo que consta de un aparato de carga (Aparato de flexión en cuatro puntos) donde se falla el espécimen, una cámara de acondicionamiento para regular la temperatura del ensayo, un compresor para regular la presión en el aparato de carga y un sistema de control y adquisición de datos. El dispositivo de carga posee una rosca para colocar y atornillar el LVDT con el que se mide la deformación del espécimen (ver Figura 3-6).



*Figura 3-6. Aparato de flexión en 4 puntos*

Fuente: Montarezi, 2009

El ensayo se realiza a una temperatura de  $20 \pm 0,5$  °C, por lo que los especímenes fueron colocados en la cámara de acondicionamiento al menos 14 h antes de la realización de los ensayos. Se recomienda que el acondicionamiento deba ser al menos de 2 h. Todos los especímenes fueron envejecidos con el procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo, pues es una práctica común en el laboratorio (LanammeUCR) para reducir el tiempo de ensayo. Se realizaron 3 especímenes por deformación controlada de cada mezcla evaluada.

Luego del acondicionamiento, el espécimen es montado sobre el dispositivo de carga. Se debe centrar el espécimen y utilizar las abrazaderas de la máquina de carga para sujetarlo. Posteriormente se procede a colocar el LVDT sobre el espécimen y a realizar el ensayo.

El ensayo se realizó aplicando carga a deformación constante. Se evaluaron dos niveles de deformación para cada tipo de mezcla (600  $\mu$ s y 400  $\mu$ s). La carga utilizada fue de tipo sinusoidal a una frecuencia de 10 Hz. El ensayo se efectuó hasta alcanzar una reducción del 70 % del valor de la rigidez inicial (medida en el ciclo 50 de carga), es decir un 30 % del valor inicial.

Se utilizó un programa específico para la obtención de datos y definición de parámetros de ensayo, cuya designación es "UTS015 *Beam Fatigue Test*".

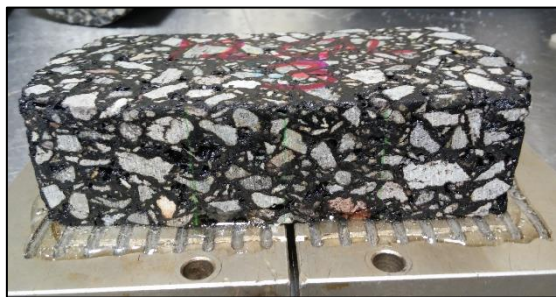


Los parámetros de medición tomados en cuenta son el número de ciclos, la rigidez y la deformación, aunque se obtienen otros parámetros como la energía disipada. Se utilizó el criterio de Rowe y Boulding para determinar la falla de los especímenes y se comparó con el criterio de falla de la norma AASHTO T321.

### ***3.4.2 Ensayo Overlay***

Antes de la realización del ensayo, es necesario pegar los especímenes a placas metálicas usadas para montar el espécimen en la máquina de ensayo. Se utilizaron aproximadamente 9 gramos de pegamento (epóxico de dos partes) en cada una de las placas de la base para adherir el espécimen. El pegamento fue esparcido a lo largo de cada placa, procurando llenar las muescas presentes (ver Figura 3-7).

Se deben remover los excesos en las inmediaciones de la ranura, para evitar que al adherir el espécimen el epóxico entre en la misma. Los excesos de pegamento deben quedar a los costados del espécimen para promover una mejor adherencia. El espécimen fue centrado y alineado paralelamente a los ejes de las placas. Un peso de aproximadamente 4,5 kg es colocado sobre el espécimen hasta que el pegamento se seque. En la Figura 3-7 se muestra la forma en que queda pegado el espécimen, nótese que hay exceso de pegamento en los costados del espécimen, pero cerca de la ranura no.

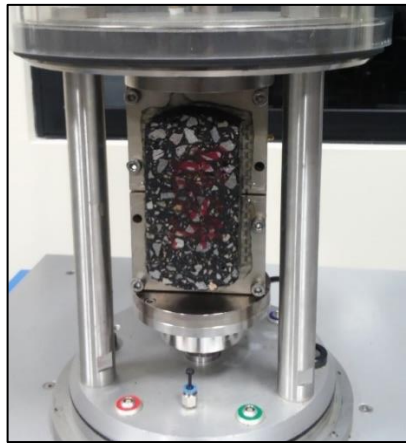


*Figura 3-7. Especimen pegado a las placas metálicas de montaje del ensayo*

Dos grupos de ensayos *Overlay* fueron realizados. Los especímenes del grupo 1 no fueron envejecidos a largo plazo (fase final del proceso de preparación de especímenes) y se ensayaron a una temperatura de  $25 \pm 0,5$  °C (acorde a lo especificado en el procedimiento de ensayo Tex-248-F). Los especímenes del grupo 2 fueron preparados con el envejecimiento a largo plazo y ensayados a una temperatura de  $20$  °C  $\pm 0,5$  °C. Todas las mezclas fueron

evaluadas en el grupo 2 de ensayos, en el grupo 1 de pruebas no se evaluaron las mezclas que contienen antidesnudente líquido. Para cada ensayo se realizaron 3 especímenes por MAC. Luego del proceso de pegado, los especímenes fueron acondicionados a la temperatura de ensayo al menos durante 14 h. Luego de dicho período el peso (4,5 kg) fue removido y se procedió a realizar las pruebas. Como las temperaturas de ensayo son cercanas a la temperatura ambiente, el período de preparación puede ser menor (2 h). Se recomienda realizar el ensayo al menos 8 h después de la aplicación del pegamento, para asegurar que el epóxico alcance suficiente resistencia.

El ensayo *Overlay* fue realizado en la máquina de procedimientos de ensayo de mezclas asfálticas (AMPT por sus siglas en inglés). La cámara de temperatura de la AMPT fue encendida al menos 1 h antes de la realización de las pruebas. El espécimen es montado en la AMPT atornillándolo las placas a una base especial para el ensayo, luego se coloca un LVDT en la parte posterior de la base para medir los desplazamientos y se procede a realizar el ensayo. En la Figura 3-8 se muestra la colocación del espécimen en la AMPT.



*Figura 3-8. Montaje del ensayo Overlay en la AMPT*

La AMPT aplica una carga triangular cíclica a tensión (sobre una de las placas sobre la que se pega el espécimen) hasta un desplazamiento máximo de 0,635 mm y vuelve a su posición original. La frecuencia del ensayo elegida fue de 1 Hz. Los parámetros de medición son la carga aplicada, el desplazamiento de la base, número de ciclos y la temperatura de ensayo.

Se utilizó un programa específico para la obtención de datos y definición de parámetros de ensayo, cuya designación es "UTS036 *Overlay Test*".

Para el grupo 1 de pruebas, los ensayos fueron realizados inicialmente hasta que alcanzaran 1200 ciclos de carga, no obstante, en ningún caso se alcanzó un 93% de reducción de la carga inicial. Posteriormente se aumentó el número de ciclos inclusive hasta 1800 ciclos, sin embargo, no se logró producir la reducción de carga del 93 % en ningún ensayo. En este grupo de ensayos, dado que no se alcanzó la falla en ningún espécimen, el criterio de comparación de fatiga utilizado fue el porcentaje de reducción de carga presentado a los 1200 ciclos. Dicho criterio no está asociado a ninguna interpretación física.

Inicialmente, únicamente se iba a realizar el grupo 1 de ensayos, no obstante, como no se logró alcanzar la falla en los especímenes, se cambió la metodología. Los resultados del grupo 1 de pruebas se toman únicamente como una referencia, pues no se tienen datos para todas las mezclas.

Cuando se realizó el ensayo en los especímenes envejecidos a largo plazo y a una temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  se intentó continuar todas las pruebas hasta obtener una reducción de 93 % de la carga inicial. Dicha reducción de carga se presentó en la mayoría de casos antes de la aplicación de 1200 ciclos. Para las mezclas que no fallaron a los 1200 ciclos de carga se aumentó el número de ciclos de aplicación para tratar de inducir la falla. Como la mayoría de especímenes del grupo 2 de ensayo alcanzaron la reducción del 93 % de la carga inicial, es posible analizar el criterio de falla del procedimiento Tex-248-F y el del método NLC.

Es importante mencionar que el procedimiento de se realiza para inducir la falla. Por su parte, el cambio en la temperatura se realiza para tener parámetros de ensayo iguales a los del ensayo de vigas a flexión en 4 puntos.

### ***3.4.3 Ensayo de flexión semicircular repetida (RSCB)***

El ensayo a flexión semicircular repetida fue realizado en la maquina universal de ensayos con capacidad de 25 kN (UTM-25, por sus siglas en inglés, *Universal Testing Machine*). La UTM-25 cuenta con una cámara de acondicionamiento, un sistema de adquisición de datos y un sistema de presión hidráulico. La base de apoyo del espécimen fue fabricada en el LanammeUCR y presenta un espaciamiento entre apoyos de 120 mm (0,8 veces el diámetro de los especímenes de ensayo).

Los ensayos se realizaron a una temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para evaluar la misma condición de los ensayos adicionales (vigas y *Overlay*). La cámara de acondicionamiento de la

UTM-25 fue encendida a la temperatura del ensayo al menos 2 h antes de la realización de las pruebas. Los especímenes fueron colocados al menos 14 h en una cámara a la temperatura del ensayo, no obstante, se pueden acondicionar un período de tiempo menor.

Todos los especímenes fueron envejecidos con el procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo. Dicho procedimiento se realizó para igualar las condiciones aplicadas en las otras dos pruebas. No necesariamente se requiere este tipo de acondicionamiento para inducir la falla, pues el tiempo de ensayo no es extenso.

El ensayo se lleva a cabo en dos etapas. En la primera etapa (etapa de definición de carga) se lleva a cabo el ensayo SCB para obtener la carga máxima de fractura y definir la carga de aplicación en el ensayo RSCB como un porcentaje de la misma. En la segunda etapa (etapa de determinación del número de ciclos de fatiga) se lleva a cabo el ensayo RSCB.

De acuerdo con la metodología de corte de especímenes, se obtienen 6 especímenes semicirculares por mezcla. Se define la utilización de 2 especímenes para el ensayo de fractura, 3 para el ensayo de fatiga y se dejó una muestra de reemplazo por cualquier percance.

En ambos modos de ensayo (SCB y RSCB), los especímenes son colocados sobre la base de apoyo de tal manera que el corte en la base inferior este alineado directamente con el punto de aplicación de carga. La Figura 3-9 muestra el acomodo del espécimen antes de realizar el ensayo.



*Figura 3-9. Configuración de los ensayos RSCB y SCB*

El ensayo SCB fue realizado aplicando una carga en compresión en el espécimen a una tasa de desplazamiento vertical de 5 mm/min. La prueba continúa hasta que la grieta se propaga totalmente en el espécimen. Se utilizó el programa de ensayo "UTS002 *Stress Strain Test*" para

la realización de la prueba, pues los resultados y la forma aplicación de carga de dicho programa son los requeridos. En la plantilla del programa se define una precarga inicial de 1 kN durante 10 segundos, antes de iniciar el ensayo. Dicha precarga podría ser muy elevada si la capacidad máxima de los especímenes es baja.

Cuando se realizaron los 2 ensayos dispuestos para el ensayo de fractura (SCB) dicha precarga no se modificó y por lo tanto puede haber cierto error en los resultados obtenidos. El error podría generarse si la precarga es muy elevada, pues se puede inducir un deterioro acelerado del espécimen en comparación con el deterioro que sufriría si la precarga es menor. No necesariamente el valor de la carga máxima es afectado, pero si podría haber una disminución en la energía de fractura. Como todos los ensayos se realizaron bajo las mismas condiciones se mantienen y utilizan los resultados obtenidos.

Luego de la aplicación de la precarga, se aplica una carga incremental a la tasa de desplazamiento establecida hasta provocar la falla del espécimen (punto de carga máxima). A partir del punto de falla se da una disminución paulatina de la carga hasta agrietar completamente el espécimen. La carga y la deformación o desplazamiento vertical son los parámetros de medición.

En el ensayo de fatiga se utilizó, como carga de aplicación, un 50 % de la carga máxima obtenida en el ensayo de fractura SCB. La carga constante se aplica en el espécimen a una frecuencia de 1 Hz. La carga utilizada es de tipo haversiana sin período de descanso. El 50 % de la carga máxima obtenida en el ensayo de fractura se dividió de la siguiente manera en los ensayos, 10 N de precarga, 40 N de carga de contacto y la sobrante carga es la carga aplicada cada ciclo. La precarga es aplicada durante 10 segundos y la carga de contacto es una carga constante actuante en el espécimen para evitar el desacomodo del mismo. El ensayo se realiza hasta que la grieta se propague por todo el espécimen.

El programa usado para la realización del ensayo con carga cíclica fue el "UTS014 *Asphalt Permanent Deformation Tests*", pues utiliza los mismos parámetros que se requieren en el ensayo RSCB y brinda los resultados necesarios de evaluación. Los parámetros medidos en el ensayo son el número de ciclos hasta la falla y el desplazamiento o deformación en el espécimen. A partir de los resultados se puede establecer la falla como el número de ciclos hasta la propagación total de la grieta o según la metodología adicional explicada en el Capítulo 2 (Marco teórico).

El Cuadro 3-5 presenta un resumen de los principales parámetros de los ensayos realizados. Los ensayos estudiados son Overlay (OT), flexión semicircular (SCB), flexión semicircular repetida (RSCB) y vigas a flexión en 4 puntos (VF).

*Cuadro 3-5. Parámetros de ensayo*

<b>Ensayo</b>	<b>OT</b>	<b>SCB</b>	<b>RSCB</b>	<b>VF</b>
<b>Propósito</b>	Potencial de reflexión de grietas y fatiga en MAC.	Esfuerzo a tensión y potencial de resistencia a la fractura de MAC.	Potencial de resistencia a la fatiga.	Potencial de resistencia a la fatiga y evaluación de parámetros de energía disipada.
<b>Preparación luego del proceso de corte del espécimen</b>	Se requiere pegar los especímenes a placas metálicas de ensayo. Al menos 8 horas de curado se requiere para el pegamento.	No requiere preparación adicional.	No requiere preparación adicional.	No requiere preparación adicional.
<b>Parámetros de aplicación</b>	Carga triangular cíclica. Carga aplicada con desplazamiento controlado (0,635 mm). Frecuencia de 0,1 Hz. Temperatura de ensayo $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .	Configuración de carga en 3 puntos. Carga monotónica aplicada a compresión a una tasa de 5 mm/min. Temperatura de ensayo $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .	Carga haversiana (sin período de descanso). La magnitud de la carga es del 50% de la resistencia del ensayo SCB. Frecuencia de 1 Hz. Temperatura de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .	Carga sinusoidal aplicada a deformación controlada. Deformaciones controladas de 400 $\mu\text{s}$ y 600 $\mu\text{s}$ . Frecuencia de 10 Hz. Temperatura de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .
<b>Datos de salida de interés</b>	Carga, desplazamiento de abertura, número de ciclos	Carga axial, tiempo, carga máxima y deformación axial	Carga y número de ciclos.	Rigidez, número de ciclos, ángulo de fase, energía disipada
<b>Evaluación de fatiga</b>	Número de ciclos	Energía de fractura	Número de ciclos	Número de ciclos

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos. Inicialmente se realiza un análisis breve de los porcentajes de vacíos obtenidos, orientado a determinar si las metodologías de obtención de especímenes son adecuadas.

Luego del análisis anterior, se presentan los resultados obtenidos en cada ensayo, realizando análisis estadísticos que permitan determinar factores de importancia para los distintos resultados y comparando los promedios individuales de las mezclas para cada parámetro de análisis. Posteriormente se realiza una comparación de los resultados entre ensayos y se obtienen modelos de predicción entre ensayos. Finalmente se comentan las ventajas y desventajas de los métodos de ensayo y criterios de análisis de la vida de fatiga.

Los análisis estadísticos realizados en todos los casos son basados en el Análisis de Varianza (ANOVA, Analysis of Variance, por sus siglas en inglés) utilizando un modelo lineal general (GLM, General Lineal Model, por sus siglas en inglés).

El análisis ANOVA permite determinar si hay diferencias significativas entre diferentes tratamientos, realizando un análisis en el cual la varianza está asociada a diferentes variables predictoras. El modelo GLM es un procedimiento estadístico donde los cálculos se realizan utilizando un enfoque de regresión de mínimos cuadrados para describir la relación estadística entre las variables predictoras y la variable respuesta. La ecuación se deriva minimizando la suma de los residuos al cuadrado. En el análisis únicamente se toman en cuenta los resultados de la probabilidad (valor-p).

Para un nivel de confianza de 95 %, cuando la probabilidad sea menor a 0,05 hay diferencias significativas en al menos una de las medias de las poblaciones. En caso de que la probabilidad sea mayor a 0,05 no habrá diferencias significativas entre las medias de las poblaciones.

Para los análisis estadísticos se utilizan los siguientes factores o variables predictoras:

- TMN (9,5 mm y 12,5 mm)
- Tipo de mezcla (CT, SBS, SBS+MB y SBS+CAL)
- Deformación (400  $\mu$ s y 600  $\mu$ s)

Se realizan análisis estadísticos a todas las posibles combinaciones de los factores expuestos. Se puede realizar un análisis menos detallado al utilizar un único factor (Tipo de Mezcla (TMN))

donde se tome en cuenta tanto el tamaño máximo nominal del agregado como el tipo de mezcla y en el que únicamente se analizan las medias de las MAC individualmente.

Es posible identificar las mezclas que poseen diferencias significativas en sus medias al realizar un análisis con el método de Tukey posterior al análisis ANOVA. El método de Tukey se usa para crear intervalos de confianza para cada una de las medias de las poblaciones estudiadas, mientras se controla la tasa de error global a un nivel de confianza especificado. Cuando los intervalos de confianza dos o más poblaciones se traslapan no hay diferencias significativas entre las medias dichas poblaciones.

Considerar la tasa de error global en comparaciones múltiples es de gran importancia, ya que en dichas comparaciones la probabilidad de cometer un error tipo I (se rechaza la hipótesis nula de que las medias son iguales, cuando en realidad lo son) es mayor que las tasas de error para las comparaciones individuales.

#### **4.1 Análisis general de los porcentajes de vacíos de aire**

La variabilidad en el porcentaje de vacíos de aire de especímenes realizados en laboratorio puede ser un factor importante que afecta la variabilidad de los resultados de los ensayos de fatiga. Se espera que los coeficientes de variación (C.V.) de los resultados disminuyan si se utilizan especímenes con porcentajes de vacíos de aire dentro de un rango pequeño, como  $7 \pm 0.5 \%$ . Dicho rango es difícil de obtener en el laboratorio por razones prácticas. Normalmente se utiliza un rango permisible del contenido de aire de  $7 \pm 1 \%$ .

Los especímenes base no poseen una distribución uniforme del contenido de vacíos de aire, pues en los bordes externos el contenido suele ser mayor. Por dicho motivo, los especímenes de ensayo son extraídos de la parte central de los especímenes base, buscando disminuir la variabilidad en los resultados.

En los ensayos *Overlay* y RSCB, como se propone una metodología nueva de extracción de especímenes de ensayo, se permite una variación mayor en el porcentaje de vacíos de aire, siempre y cuando los resultados se consideren adecuados. El principal objetivo del presente apartado es verificar si las metodologías de realización de especímenes propuestas para los ensayos *Overlay* y RSCB son adecuadas.

Otro enfoque del presente apartado es mencionar, de manera general, cualquier afectación del porcentaje de vacíos de aire en los resultados. Se tiene en cuenta que el contenido de aire es



un parámetro difícil de controlar en ensayos de laboratorio y por lo tanto una fuente de variación inevitable.

Únicamente se mencionan tendencias obtenidas al revisar y notar si las variaciones en el contenido de aire generaban incrementos o disminuciones en los resultados de los diferentes ensayos para una misma MAC. Si todas las mezclas poseen un mismo comportamiento se concluye que hay afectación, de lo contrario no la hay.

Es posible realizar un análisis de covarianza (ANCOVA) para determinar si el porcentaje de vacíos de aire de los especímenes de ensayo tiene influencia en los resultados obtenidos. El (ANCOVA) es un modelo de análisis de varianza (ANOVA) en el que a la variable dependiente se le elimina el efecto predicho por una o más covariables por medio de una regresión lineal múltiple. Con el ANCOVA es posible ajustar las medias de tratamiento con el fin de estimar mejor el efecto de la variable independiente (tratamiento) sobre la variable dependiente. Básicamente, dicho procedimiento estadístico se utiliza para eliminar la heterogeneidad causada en la variable dependiente por la influencia de las covariables.

En un análisis ANCOVA intervienen tres grupos de variables. Un grupo de variables independientes que representan las condiciones experimentales (grupos de tratamiento), un segundo grupo de variables independientes que no se pueden controlar (covariables) y la variable dependiente sobre la que actúan las variables independientes para producir un efecto.

Se utiliza el ANCOVA para determinar si la covariable (Porcentaje de vacíos de aire) influye en las diferentes variables respuestas (resultados de los ensayos). El análisis se realiza por medio de la probabilidad (valor-p), donde valores menores a 0,05 indican que la covariable influye en la variable dependiente. Valores de probabilidad mayores a 0,05 se obtienen cuando no hay relación entre la variable dependiente y la covariable. Aunque la probabilidad obtenida para algún parámetro sea menor a 0,05 no se ajustan los promedios de los tratamientos (se excluye del alcance), pues únicamente interesa determinar si hay o no afectación.

El signo (positivo o negativo) del coeficiente obtenido en el ANCOVA está relacionado con el tipo de relación entre las variables. Un signo negativo indica que al aumentar los valores de la covariable disminuyen los de la variable dependiente. Cuando el signo es positivo, al aumentar los valores de la covariable aumentan los de la variable dependiente.

Para efectos de los análisis se utiliza el promedio de los resultados de los especímenes fallados por MAC para generar los resultados finales, independientemente de si la variación en los vacíos es grande, pero tratando de respetar el rango de  $7 \pm 1 \%$ .

Aunque en el presente apartado se hace referencia a coeficientes de variación obtenidos para los resultados de cada ensayo, los mismos se presentan hasta el apartado de resultados de cada prueba de laboratorio.

#### **4.1.1 Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos**

Con respecto al ensayo de vigas se obtienen, en la mayoría de casos, porcentajes de vacíos de aire de  $7 \pm 1 \%$  para cada una de las vigas de todas las MAC. Únicamente un espécimen, de todos los utilizados en todas las mezclas, presentó un contenido de vacíos fuera del rango (8,2 %). Los coeficientes de variación (C.V.) de los porcentajes promedio de vacíos obtenidos para los especímenes de ensayo obtenidos de cada bloque son menores a 8 % en todos los casos. La máxima diferencia entre el contenido de aire de las vigas de un mismo bloque es de 1.2 %.

El Cuadro 4-1 muestra el promedio del porcentaje de vacíos de aire obtenido de los 3 especímenes cortados a partir de cada espécimen base. Se utiliza un bloque por deformación unitaria aplicada en el ensayo.

*Cuadro 4-1. Porcentaje de vacíos de aire promedio de las vigas de un mismo bloque de fatiga*

<b>Mezcla</b>	<b>Deformación unitaria (µs)</b>	<b>Porcentaje de vacíos (%)</b>	<b>Coefficiente de variación (%)</b>
9,5 CT	600	6,70	2,44
	400	6,60	0,00
9,5 SBS	600	7,17	6,27
	400	6,53	3,15
9,5 SBS+MB	600	7,40	4,81
	400	7,47	7,03
9,5 SBS+CAL	600	7,87	3,17
	400	6,30	3,43
12,5 CT	600	7,55	5,34
	400	7,20	3,40
12,5 SBS	600	7,33	3,40
	400	7,33	5,71
12,5 SBS+MB	600	7,23	0,65
	400	7,50	3,27
12,5 SBS+CAL	600	7,17	0,66
	400	7,53	3,81

La variabilidad en el porcentaje de vacíos se debe principalmente al proceso de compactación, pues el compactador de rodillo con hoja de acero no compacta de manera uniforme el espécimen base. Normalmente queda un sector más compacto en el bloque y por lo tanto con menor contenido aire. Pese a lo anterior, se logra obtener valores dentro del rango establecido para cada mezcla ( $7 \pm 1 \%$ ).

Una problemática de la utilización del compactador de rodillo es que inclusive aplicando la misma cantidad de ciclos de compactación con las mismas presiones, los bloques pueden presentar diferencias considerables en el porcentaje de vacíos de aire promedio para el mismo tipo de mezcla.

En el caso de la mezcla 9,5 SBS se obtiene una diferencia de 0,64 % en el porcentaje de vacíos promedio de las vigas de ambos bloques, utilizando la misma energía de compactación en los 2 especímenes bases. La energía de compactación se refiere a la cantidad de ciclos de compactación utilizados a la misma presión o a diferentes presiones en un mismo bloque.

Por otra parte, en ocasiones es difícil encontrar la energía de compactación que genere un contenido de aire promedio de las vigas cercano a 7 %. En el caso de la mezcla 9,5 SBS+CAL se utilizó un ciclo de compactación menos entre el bloque utilizado para la deformación controlada de 600  $\mu$ s y el de 400  $\mu$ s. En dicho caso, no fue posible encontrar un promedio cercano a 7 %, no obstante, el porcentaje individual de vacíos de cada espécimen está dentro del rango de  $7 \pm 1 \%$ .

El bloque de la mezcla 9,5 SBS+CAL utilizado para los ensayos a una deformación controlada de 600  $\mu$ s presenta un porcentaje promedio de vacíos de aire de 7,87 % y el de 400  $\mu$ s un porcentaje promedio de 6,3 %, ambos con bajos C.V. La diferencia es considerable (1,57 %) y podría afectar los resultados.

Se encuentran diferencias entre el promedio del contenido de vacíos de aire de las vigas de los 2 bloques de una misma MAC de 0,65 % o menores, excepto en el caso ya mencionado de la MAC 9,5 SBS+CAL. En muchos casos no se esperan grandes diferencias entre los resultados.

La vida a fatiga y la rigidez de los especímenes de laboratorio debería disminuir al aumentar el porcentaje de vacíos. Para efectos del análisis de los resultados, como ya se mencionó, no se toman en cuenta dicha afectación.

Realizando una comparación general, fue posible notar una reducción en la rigidez inicial de cada MAC (diferenciando entre los resultados de cada deformación aplicada) al aumentar el número de vacíos de cada espécimen. Las diferencias encontradas para la rigidez inicial de los especímenes de un mismo bloque con respecto al porcentaje de vacíos fueron bajas, aunque se presentara la tendencia mencionada. Los C.V. obtenidos para la rigidez inicial fueron menores a 12 % en todos los casos.

Con respecto a la vida de fatiga no hay una tendencia clara, pues al tomar en cuenta los especímenes de una misma mezcla, el número de ciclos obtenido aumentó con el porcentaje de vacíos de aire en algunos casos, en otros disminuyó y en otros no se encontró ninguna tendencia.

Es importante mencionar que no hay una relación directa entre el coeficiente de variación del porcentaje de vacíos de aire y el de cualquiera de los resultados del ensayo, es decir, un mayor C.V. del porcentaje de vacíos de aire no necesariamente genera un mayor C.V. de los resultados de laboratorio (Rigidez inicial, número de ciclos).

El análisis ANCOVA realizado se presenta en el Cuadro 4-2. Como se mencionó anteriormente, únicamente hay afectación de la covariable para la Rigidez (probabilidad menor a 0,05) y en ambos casos se relacionan con pendientes o coeficientes negativos.

*Cuadro 4-2. Resultados del análisis ANCOVA del ensayo de vigas a flexión*

Ensayo	Variable Dependiente	Variable Tratamiento	Covariable	Coefficiente	Probabilidad
<b>Vigas (600 µs)</b>	N(50% RI)	Tipo de Mezcla	Porcentaje de vacíos de aire	13127,7	0,169
	N(Rowe y Bouldin)			32482,7	0,3545
	Rigidez			-428,112	0,0305
<b>Vigas (400 µs)</b>	N(50% RI)			47515,9	0,7122
	N(Rowe y Bouldin)			106433	0,5278
	Rigidez			-650,852	0,0011

#### **4.1.2 Ensayo Overlay**

Los especímenes del ensayo *Overlay* (OT) presentan porcentajes de vacíos de aire de  $7 \pm 1$  % en la mayoría de especímenes, con unas pocas excepciones donde se no se cumple con el rango mencionado.

Para los ensayos realizados sin el proceso de envejecimiento (Grupo 1), de las 6 MAC ensayadas, únicamente en 2 MAC se obtuvo un espécimen fuera del rango  $7 \pm 1$  %. En la

mezcla 9,5 CT se obtiene un espécimen con un porcentaje de vacíos de aire de 5,6 % y en la mezcla 12,5 CT se obtuvo un espécimen con 5,9 % de vacíos de aire.

Al comparar los resultados de los especímenes fuera del rango de vacíos con los de los especímenes adicionales de ensayo de cada mezcla no se encontró una afectación o desviación considerable en los resultados. En el Cuadro 4-3 se muestra un resumen de los porcentajes de vacíos aire promedio de los especímenes de ensayo utilizados en el grupo 1 del ensayo *Overlay*. Se utilizan 3 especímenes por mezcla.

*Cuadro 4-3. Porcentaje de vacíos de aire promedio por tipo de MAC (Grupo 1 – OT)*

<b>Mezcla</b>	<b>Porcentaje de vacíos promedio</b>	<b>C.V.</b>
9,5 CT	6,57	14,47
9,5 SBS	7,07	12,76
9,5 SBS+CAL	6,90	12,63
12,5 CT	6,53	8,43
12,5 SBS	6,77	11,85
12,5 SBS+CAL	6,60	2,14

Con respecto a la afectación de los resultados para el grupo 1 de ensayos, la carga máxima no se ve considerablemente afectada por la variación en el contenido de vacíos de aire, pues los C.V. son bajos (C.V. con respecto a la carga máxima menores a 2,5 % en 4 mezclas y menores a 14% en dos mezclas). Al tener coeficientes de variación tan bajos es difícil encontrar tendencias en los resultados.

Al analizar el porcentaje de reducción de carga a los 1200 ciclos, los C.V. aumentan considerablemente, pero no hay una relación directa con los C.V. del porcentaje de vacíos de aire. En la mayoría de casos, para una misma mezcla, un mayor contenido de vacíos del espécimen estuvo relacionado con un porcentaje de reducción de carga mayor.

En los especímenes de ensayo realizados con el proceso de envejecimiento (grupo 2) se obtienen porcentajes de vacíos de  $7 \pm 1,1$  %. Únicamente 3 especímenes de 3 de las 8 MAC evaluadas (un espécimen por mezcla) se salieron del rango de  $7 \pm 1$  %. Se utilizan todos los datos obtenidos al notar que no hay una variación considerable en los resultados de los especímenes de las mismas mezclas.

Para el grupo 2 de ensayos la carga máxima tiende a disminuir muy levemente con el contenido de vacíos, pero no en todos los casos. Con respecto al número de ciclos no hay tendencia

alguna. En el Cuadro 4-4 se muestran el porcentaje de vacíos promedio por mezcla para el grupo 2 de ensayos *Overlay*.

*Cuadro 4-4. Porcentaje de vacíos de aire promedio por tipo de MAC (Grupo 2 - OT)*

Mezcla	Porcentaje de vacíos promedio	C.V.
9,5 CT	6,83	13,65
9,5 SBS	7,49	7,85
9,5 SBS+MB	6,61	9,85
9,5 SBS+CAL	6,87	8,55
12,5 CT	6,62	9,76
12,5 SBS	6,77	12,22
12,5 SBS+MB	7,37	7,38
12,5 SBS+CAL	6,95	12,45

Las diferencias entre los especímenes con menor y mayor porcentaje de vacíos por tipo de MAC son superiores a 1% en la mayoría de casos, de ahí la obtención de C.V. mayores a 10%. Los C.V. de la carga máxima por mezcla son bajos (menores a 9 % en todos los casos). Los C.V. del número de ciclos aumenta considerablemente hasta valores cercanos a 50 %, no obstante, no hay una relación con el coeficiente de variación del porcentaje de vacíos de aire obtenido en cada mezcla.

El análisis ANCOVA realizado se presenta en el Cuadro 4-5. Únicamente hay afectación de la covariable para la carga máxima del grupo 2 de ensayos *Overlay*. El coeficiente encontrado es negativo, por lo que a mayor contenido de vacíos menor carga fue obtenida.

*Cuadro 4-5. Resultados del análisis ANCOVA del ensayo Overlay*

Ensayo	Variable Dependiente	Variable Tratamiento	Covariable	Coefficiente	Probabilidad
<b>Overlay - Grupo 1</b>	Carga Máxima	Tipo de Mezcla	Porcentaje de vacíos de aire	0,91648	0,8362
	Red. de carga (1200 ciclos)			-0,02409	0,5864
<b>Overlay - Grupo 2</b>	Nmax			98,062	0,4127
	N(NLC)			-11,9603	0,8725
	Carga Máxima			-0,14232	0,001

El C.V. del porcentaje de vacíos de aire podría disminuirse si se utiliza otro proceso de obtención de especímenes de ensayo. El método propuesto permite disminuir el desperdicio de mezcla y facilita el trabajo de confección de especímenes manteniendo un porcentaje de vacíos de  $7 \pm 1$  % en la mayoría de casos.

### 4.1.3 Ensayo RSCB

La metodología aplicada para la obtención de especímenes de ensayo RSCB genera una alta variabilidad en los porcentajes de vacíos de los 6 especímenes obtenidos por tipo de MAC. Se pretendía obtener especímenes con porcentajes de vacíos en el rango de  $7 \pm 1$  %, sin embargo, en todas las mezclas hay al menos un espécimen por fuera del rango.

En general se obtuvieron porcentajes de vacíos en el rango de  $7 \pm 1,5$  %, excepto en las mezclas 9,5 SBS y 12,5 CT, donde se obtiene un espécimen con un contenido de aire fuera de dicho rango. El contenido de aire promedio de los 6 especímenes semicirculares obtenidos por mezcla se muestra en el Cuadro 4-6.

*Cuadro 4-6. Porcentaje de vacíos de aire promedio por tipo de MAC*

<b>Mezcla</b>	<b>Porcentaje de vacíos promedio</b>	<b>C.V.</b>
9,5 CT	7,10	12,21
9,5 SBS	7,94	10,45
9,5 SBS+MB	7,29	9,94
9,5 SBS+CAL	7,09	14,69
12,5 CT	6,44	16,90
12,5 SBS	7,41	12,29
12,5 SBS+MB	7,41	12,29
12,5 SBS+CAL	7,19	10,15

Como al menos un espécimen por MAC presentó un contenido de vacíos superior a 8 %, se utilizaron únicamente 2 especímenes para la obtención de la carga de aplicación del ensayo RSCB. Para cada MAC se identificaron los 3 especímenes con el porcentaje de vacíos más cercano a  $7 \pm 1$  %, de los cuales se eligieron 2 para el ensayo RSCB y uno para el ensayo SCB. De los 3 especímenes restantes por MAC un espécimen fue tomado para cada ensayo (SCB y RSCB) y el sobrante fue el espécimen con el porcentaje de vacíos más lejano al rango de  $7 \pm 1$  % y por lo tanto no se usó para generar resultados.

El ensayo SCB se realiza principalmente para la obtención de la carga de aplicación del ensayo RSCB. No se encuentra una relación directa entre el porcentaje de vacíos de los especímenes y la carga máxima (resistencia del ensayo SCB) para los especímenes del mismo tipo de MAC, pues en algunas mezclas la resistencia aumenta con el contenido de aire, en otras disminuye.

El porcentaje de vacíos de aire de los especímenes usados en el ensayo SCB fue de  $7 \pm 1,5$  %. Como no se encontró una misma tendencia para todas las MAC entre la carga máxima y el porcentaje de vacíos, se utilizaron los datos teniendo en cuenta que la variabilidad en la

resistencia (C.V menores a 12% en todos los casos) probablemente se deba al porcentaje de vacíos. Las MAC con mayor con C.V. para el contenido de vacíos tienden a presentar mayor C.V. de la carga máxima.

Para el ensayo RSCB se utilizaron especímenes (3 por MAC) con un porcentaje de vacíos en el rango de  $7 \pm 1$  %. La diferencia promedio entre los especímenes con mayor y menor porcentaje de vacíos de todas las mezclas fue de 1,17 %, lo que explica los valores de C.V. obtenidos. En el Cuadro 4-7 se muestra el promedio del porcentaje de vacíos de los especímenes utilizados por tipo de MAC en el ensayo RSCB.

*Cuadro 4-7. Porcentaje promedio de vacíos de aire obtenidos para los especímenes del ensayo RSCB*

<b>Mezcla</b>	<b>Porcentaje de vacíos promedio</b>	<b>C.V.</b>
9,5 CT	7,09	10,84
9,5 SBS	7,29	8,55
9,5 SBS+MB	7,31	7,11
9,5 SBS+CAL	6,51	3,88
12,5 CT	6,89	12,62
12,5 SBS	6,96	11,62
12,5 SBS+MB	6,89	11,71
12,5 SBS+CAL	6,71	3,35

En este caso tampoco se logró obtener una relación de tendencia entre el porcentaje de vacíos y el número de ciclos, no obstante, se pudo notar que las mezclas con mayor C.V. para el porcentaje de vacíos tienden a presentar mayores C.V. para el número de ciclos. Los C.V. para el porcentaje de vacíos de las distintas MAC pueden disminuirse al modificar la metodología de obtención de especímenes.

El análisis ANCOVA realizado se presenta en el Cuadro 4-8. En todos los casos de obtienen probabilidades mayores a 0,05.

*Cuadro 4-8. Resultados del análisis ANCOVA de los ensayos SCB y RSCB*

<b>Ensayo</b>	<b>Variable Dependiente</b>	<b>Variable Tratamiento</b>	<b>Covariable</b>	<b>Coficiente</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>SCB</b>	Carga Máxima	Tipo de Mezcla	Porcentaje de vacíos de aire	0,03963	0,6744
	Energía de fractura			0,15292	0,5658
<b>RSCB</b>	Nmax			-28,3799	0,612
	N(adicional)			-31,5561	0,4866



## 4.2 Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos

Se cuenta con los resultados del ensayo de vigas a flexión en 4 puntos para las deformaciones controladas de 400  $\mu\text{s}$  y 600  $\mu\text{s}$ . Al realizar análisis estadísticos (ANOVA) utilizando la deformación como variable predictora y el número de ciclos como variable respuesta se obtienen probabilidades iguales a 0,000. Un valor de probabilidad menor a 0,05 indica que hay diferencias significativas entre las medias de las poblaciones.

Como la deformación aplicada genera resultados diferentes en el número de ciclos, se decide realizar y presentar los análisis de los resultados por separado para cada deformación.

Los resultados del análisis estadístico son esperables, debido a que una mayor deformación aplicada genera un deterioro mayor en un tiempo más corto y por lo tanto, se obtiene una reducción en la vida de fatiga. El Cuadro 4-9 muestra los resultados del número de ciclos para el criterio de falla de la norma AAHSTO T321 y el método de Rowe y Bouldin.

Los C.V. no presentan relación con la deformación, es decir, los resultados no tienden a ser más variables al aplicar una u otra deformación. Con respecto al criterio de falla utilizado, los C.V. tienen a incrementar en la mayoría de casos al utilizar el método de Rowe y Bouldin, dicho incremento es variable según el tipo de MAC.

Cuadro 4-9. Número de ciclos obtenidos para las MAC aplicando deformaciones de 600  $\mu\text{s}$  y 400  $\mu\text{s}$

Tipo de Mezcla (TMN)	Deformación ( $\mu\text{s}$ )	N (50% RI)			N (Rowe y Bouldin)			
		Promedio	C.V. (%)	$\frac{N(400\mu\text{s})}{N(600\mu\text{s})}$	Promedio	C.V. (%)	$\frac{N(400\mu\text{s})}{N(600\mu\text{s})}$	
9,5 CT	600	43237	7,15	7,44	71036	49,56	4,58	
	400	321843	51,16		325566	48,01		
9,5 SBS	600	32953	15,94	12,66	47551	35,39	9,07	
	400	417257	65,61		431288	66,18		
9,5 SBS+MB	600	49970	46,91	17,51	93919	76,84	10,66	
	400	874737	27,91		1001388	39,90		
9,5 SBS+CAL	600	34720	54,85	11,94	70925	41,66	6,18	
	400	414597	39,32		438157	44,72		
12,5 CT	600	46273	43,47	11,02	80871	47,54	6,78	
	400	509780	30,78		548053	46,99		
12,5 SBS	600	37397	29,56	13,67	95796	95,52	5,70	
	400	511340	15,46		546091	14,11		
12,5 SBS+MB	600	25687	9,36	9,24	50076	29,58	5,75	
	400	237387	41,86		287898	55,12		
12,5 SBS+CAL	600	24603	24,20	10,95	37025	28,32	8,29	
	400	269287	51,44		306758	54,26		
			Promedio	11,80			Promedio	7,13
			C.V.	25,55			C.V.	28,59

Hay una relación promedio de 11,8 veces el número de ciclos obtenido en un ensayo a deformación controlada de 600  $\mu\text{s}$  con respecto a uno fallado a 400  $\mu\text{s}$ , para la misma MAC según el criterio de la norma AASTHO T321. Con respecto al criterio de falla del método de Rowe y Bouldin la relación promedio es de 7.13 veces. En todos los casos, la relación del número de ciclos del criterio de falla del método de la norma AASHTO T321 es mayor. Las relaciones mencionadas justifican el análisis estadístico anteriormente mencionado. Existe una diferencia significativa al realizar ensayos a diferentes deformaciones controladas.

El número de ciclos obtenido con el método de Rowe y Bouldin fue mayor al del criterio AASHTO T321, lo que quiere decir que la falla real para las MAC evaluadas ocurre luego de la reducción del 50 % del valor de la Rigidez Inicial.

La disminución de la relación del número de ciclos a ambas deformaciones para el criterio de Rowe y Bouldin es indicativo de que para las MAC analizadas, el porcentaje de la Rigidez Inicial necesario para producir la falla real, en una misma mezcla, es mayor al utilizar una deformación de 400  $\mu\text{s}$  (47,3 % en promedio) con respecto a una deformación de 600  $\mu\text{s}$  (39,1 % en promedio). El Cuadro 4-10 muestra el porcentaje de la Rigidez Inicial necesario en cada tipo de mezcla para generar la falla de acuerdo con el criterio de Rowe y Bouldin.

*Cuadro 4-10. Porcentaje de la Rigidez Inicial encontrado para el criterio de falla de Rowe y Bouldin*

Tipo de Mezcla (TMN)	Deformación 400 $\mu\text{s}$		Deformación 600 $\mu\text{s}$	
	% RI (Rowe y Bouldin)		% RI (Rowe y Bouldin)	
	Promedio	C.V. (%)	Promedio	C.V. (%)
9,5 CT	48,64	3,41	42,11	14,91
9,5 SBS	48,94	0,48	41,16	3,89
9,5 SBS+MB	47,82	3,39	35,55	29,86
9,5 SBS+CAL	48,60	8,47	40,31	9,41
12,5 CT	49,96	10,23	38,00	8,21
12,5 SBS	46,37	0,76	38,36	15,50
12,5 SBS+MB	42,09	1,28	38,53	1,69
12,5 SBS+CAL	45,94	4,03	38,74	7,30
Promedio	47,30	Promedio	39,10	
C.V.	5,27	C.V.	5,26	

La variabilidad entre el porcentaje de la Rigidez Inicial necesario para producir la falla real a un mismo nivel de deformación es muy similar, como lo demuestran los bajos C.V. obtenidos para el promedio de todas las MAC. Los C.V. obtenidos para cada mezcla son relativamente bajos en muchos casos. El porcentaje de la Rigidez Inicial es menor cuando se utiliza una

mayor deformación para las mezclas analizadas, aproximadamente un 8,2 % menor en promedio para las deformaciones aplicadas.

La Rigidez Inicial de cada mezcla es independientemente de la deformación aplicada. El Cuadro 4-11 muestra los resultados obtenidos para la Rigidez Inicial. El valor de la rigidez es susceptible a cambios en el porcentaje de vacíos, por lo que se esperan pequeñas variaciones en los valores obtenidos.

En el caso de la mezcla 9,5 SBS+CAL hay una diferencia considerable entre los ensayos realizados a ambas deformaciones. La rigidez medida a 600  $\mu$ s es menor con respecto a la medida a 400  $\mu$ s, la diferencia es de 1021 MPa. Dicha diferencia es debida a las variaciones en los vacíos de los especímenes utilizados para cada deformación.

Los C.V. para el promedio de la Rigidez Inicial son relativamente bajos en la mayoría de casos, por lo que individualmente no hay diferencias grandes entre los especímenes de una misma mezcla a una determinada deformación.

*Cuadro 4-11. Rigidez Inicial de las MAC analizadas*

Tipo de Mezcla (TMN)	Deformación ( $\mu$ s)	Rigidez Inicial	
		Promedio (MPa)	C.V. (%)
9,5 CT	600	4920,41	11,81
9,5 CT	400	5048,12	9,07
9,5 SBS	600	5516,04	3,47
9,5 SBS	400	5718,77	5,30
9,5 SBS+MB	600	5286,03	4,81
9,5 SBS+MB	400	5600,61	10,47
9,5 SBS+CAL	600	4389,53	11,89
9,5 SBS+CAL	400	5411,06	2,26
12,5 CT	600	3632,71	6,16
12,5 CT	400	3938,31	3,15
12,5 SBS	600	4532,50	2,07
12,5 SBS	400	4624,61	7,07
12,5 SBS+MB	600	4538,19	4,68
12,5 SBS+MB	400	4759,76	6,42
12,5 SBS+CAL	600	4822,55	5,83
12,5 SBS+CAL	400	4663,85	6,18

Al realizar un análisis estadístico de tipo ANOVA para la Rigidez Inicial como variable respuesta y utilizando los factores TMN, Tipo de mezcla y Deformación se obtienen los resultados

mostrados en el Cuadro 4-12. En todos los casos hay diferencias significativas entre la medias de la poblaciones. Como se mencionó anteriormente, se espera que las Rigideces Iniciales de las mezclas con la misma granulometría no fueran diferentes significativamente al variar la deformación aplicada.

*Cuadro 4-12. Resultados del análisis estadístico usando la Rigidez Inicial como variable respuesta*

<b>Origen de la Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Probabilidad</b>
TMN	1	0
Tipo de mezcla	3	0
Deformación	1	0,008

En general, las mezclas con un TMN de 9,5 mm poseen una Rigidez Inicial mayor. El análisis con el método de Tukey determina que la Rigidez Inicial promedio de las mezclas de control (CT) presentan diferencias significativas con respecto a las demás mezclas (ver Cuadro 4-13). Los grupos mostrados con la misma letra no poseen diferencias significativas entre sus medias.

*Cuadro 4-13. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Rigidez Inicial*

<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Rigidez Inicial Promedio (MPa)</b>	<b>Grupo</b>	
SBS	5098	A	
SBS+MB	5046,1	A	
SBS+CAL	4821,7	A	
CT	4384,9		B

La diferencia en la rigidez de las mezclas de control probablemente sea influenciada por la mezcla 12,5 CT cuya Rigidez Inicial promedio es considerablemente menor a las demás. Dicha MAC posee un elevado contenido de asfalto (7 %). Las otras mezclas no presentan diferencias estadísticas significativas entre sí.

Como la diferencia más significativa con respecto a la deformación la presenta la mezcla 9,5 SBS+CAL se procede a hacer un análisis estadístico sin el Tipo de mezcla SBS+CAL. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 4-14.

*Cuadro 4-14. Análisis estadístico usando la Rigidez Inicial como variable respuesta y excluyendo el Tipo de mezcla SBS+CAL*

<b>Origen de la Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Probabilidad</b>
TMN	1	0
Tipo de mezcla	2	0
Deformación	1	0,063

Se logra obtener una probabilidad superior a 0,05 para el factor deformación, por lo que se determina que el Tipo de mezcla SBS+CAL es el que presenta diferencias significativas con respecto a la variable predictora analizada. Finalmente se realiza un análisis estadístico individual para las mezclas 9,5 SBS+CAL y 12,5 SBS+CAL (ver Cuadro 4-15)

*Cuadro 4-15. Análisis estadístico usando la Rigidez Inicial como variable respuesta para las mezclas 9,5 SBS+CAL y 12,5 SBS+CAL*

<b>Tipo de Mezcla (TMN)</b>	<b>Origen de la Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Probabilidad</b>
9,5 SBS+CAL	Deformación	1	0,03
12,5 SBS+CAL	Deformación	1	0,532

Se verifica que la mezcla de 9,5 SBS+CAL es la única que presenta diferencias significativas en la Rigidez Inicial al realizar los ensayos con diferente deformación controlada, lo que es un factor importante a tomar en cuenta al analizar los demás resultados.

La diferencia comentada en el porcentaje de vacíos promedio (1,57 % de diferencia) de los especímenes de los bloques de la mezcla 9,5 SBS+CAL afectó los resultados obtenidos. Los especímenes de la mezcla 9,5 SBS+CAL fallados a una deformación controlada de 600  $\mu$ s poseen un contenido de vacíos promedio de 7,87 %, considerablemente mayor al contenido de aire de los especímenes fallados a una deformación de 400  $\mu$ s (6,3 %). Un mayor porcentaje de vacíos genera rigideces menores.

Para las demás mezclas, las diferencias entre los porcentajes de vacíos promedio de los especímenes para ambas deformaciones es menor a 0,65 % y no se afectaron los resultados considerablemente.

A continuación se realiza un análisis de los resultados de vigas diferenciando los ensayos según la deformación aplicada. De esta manera es posible realizar análisis más puntuales y específicos.

#### **4.2.1 Deformación controlada de 600 $\mu$ s**

El Cuadro 4-16 muestra un resumen de los resultados obtenidos para el ensayo de vigas a flexión en 4 puntos, utilizando una deformación controlada de 600  $\mu$ s.

Cuadro 4-16. Resultados del ensayo de vigas a flexión usando una deformación de 600  $\mu$ s

Tipo de Mezcla (TMN)	Rigidez Inicial		N (50% RI)		% RI (Rowe y Bouldin)		N (Rowe y Bouldin)	
	Promedio (MPa)	C.V. (%)	Promedio	C.V. (%)	Promedio	C.V. (%)	Promedio	C.V. (%)
9,5 CT	4920,41	11,8	43237	7,1	42,1	14,9	71036	49,6
9,5 SBS	5516,04	3,5	32953	15,9	41,2	3,9	47551	35,4
9,5 SBS+MB	5286,03	4,8	49970	46,9	35,6	29,9	93919	76,8
9,5 SBS+CAL	4389,53	11,9	34720	54,8	40,3	9,4	70925	41,7
12,5 CT	3632,71	6,2	46273	43,5	38	8,2	80871	47,5
12,5 SBS	4532,5	2,1	37397	29,6	38,4	15,5	95796	95,5
12,5 SBS+MB	4538,19	4,7	25687	9,4	38,5	1,7	50076	29,6
12,5 SBS+CAL	4822,55	5,8	24603	24,2	38,7	7,3	37025	28,3

Los C.V. de la Rigidez Inicial son relativamente bajos (menores a 7 %), excepto en las mezclas 9,5 CT y 9,5 SBS+CAL que presentan valores cercanos al 12 %.

Al evaluar el número de ciclos obtenido al 50 % de la reducción de la Rigidez Inicial la variabilidad obtenida es elevada. Coeficientes de variación en un rango de valores entre 7 % y 55 % son encontrados.

Los C.V. del criterio de falla del método de Rowe y Bouldin tienden a incrementar en la mayoría de casos con respecto al criterio de la norma AASHTO. Para el método de Rowe y Bouldin se obtienen C.V. entre 28 % y 96 %, la mezcla 12,5 SBS fue la más variable. Se presentan incrementos en el C.V. entre los criterios de falla hasta de 66% (mezcla 12,5 SBS) y superiores a 15 % en la mayoría de casos.

El porcentaje de la Rigidez Inicial presentada al momento de la falla según el criterio de Rowe y Bouldin es muy similar para todas las MAC. En promedio se requiere alcanzar un 39,1 % de la Rigidez Inicial para provocar la falla cuando se aplica una deformación de 600  $\mu$ s y por lo tanto, la vida de fatiga estimada para el criterio de Rowe y Bouldin es mayor. Al realizar un análisis ANOVA no se encuentran diferencias estadísticas entre las MAC respecto al porcentaje de Rigidez Inicial.

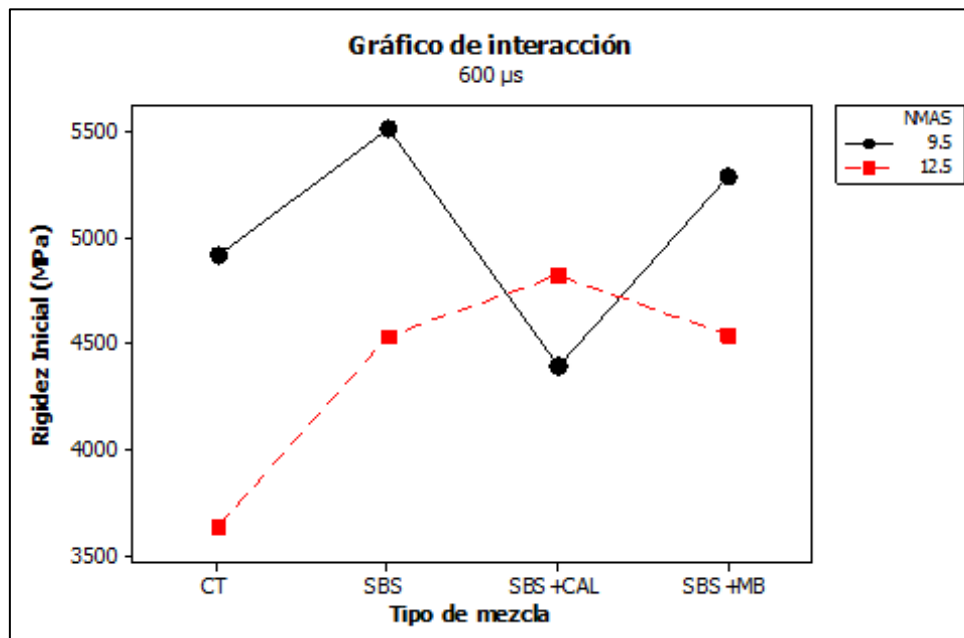
El Cuadro 4-17 muestra los resultados del análisis estadístico utilizando la Rigidez Inicial de las vigas falladas a una deformación controlada de 600  $\mu$ s como variable respuesta. En la Figura 4-1 se muestra un gráfico de interacción para los factores y resultados de la Rigidez Inicial. Se

presentan diferencias estadísticas en las medias para cada factor individual y para la combinación de los factores.

*Cuadro 4-17. Análisis estadístico utilizando la Rigidez Inicial como variable respuesta (600  $\mu$ s)*

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0
Tipo de mezcla	3	0,003
TMN*Tipo de mezcla	3	0,001

El TMN tiene una afectación significativa en la Rigidez Inicial, las mezclas de 12,5 mm TMN tienen menor Rigidez Inicial en la mayoría de casos. Únicamente la mezcla SBS+CAL posee un comportamiento inverso. Como ya se mencionó, los especímenes de la mezcla 9,5 SBS+CAL poseen un porcentaje de vacíos elevado que genera una disminución en la rigidez.



*Figura 4-1. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Rigidez Inicial (600  $\mu$ s)*

El análisis de Tukey para el Tipo de mezcla genera la clasificación mostrada en el Cuadro 4-18. La mezcla menos rígida es la de control (CT). La mezcla más rígida es la modificada con SBS, no obstante, no hay diferencias significativas estadísticamente entre dicha mezcla, la mezcla SBS+MB y la mezcla SBS+CAL. Las medias de las mezclas SBS y SBS+MB son muy similares.

Cuadro 4-18. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Rigidez Inicial (600  $\mu$ s)

Tipo de mezcla	Rigidez Inicial Promedio (MPa)	Grupo	
SBS	5024,3	A	
SBS+MB	4912,1	A	
SBS+CAL	4606	A	B
CT	4276,6		B

La combinación de factores genera diferencias significativas entre las medias de las poblaciones. La mezcla 12,5 CT es la menos rígida y presenta diferencias significativas en su media, con respecto a la mayoría de MAC (ver Cuadro 4-19). Las demás mezclas son semejantes entre sí, pues con el método de Tukey se generan agrupaciones de varios elementos (A y B). Las mezclas en el Cuadro 4-19. Cuadro 4-19 se ordenan de la más rígida a la menos rígida.

Cuadro 4-19. Clasificación de mezclas según la Rigidez Inicial (600  $\mu$ s)

TMN	Tipo de mezcla	Rigidez Inicial Promedio (Mpa)	Grupo		
9,5	SBS	5516	A		
9,5	SBS+MB	5286	A	B	
9,5	CT	4920,4	A	B	
12,5	SBS+CAL	4822,6	A	B	
12,5	SBS+MB	4538,2		B	
12,5	SBS	4532,5		B	
9,5	SBS+CAL	4389,5		B	C
12,5	CT	3632,7			C

La obtención de pocas diferencias significativas entre las MAC analizadas con respecto a su Rigidez Inicial puede ser un indicativo de que el comportamiento a la fatiga es similar. Hay promedios muy semejantes en las diferentes MAC.

El análisis estadístico utilizando como variable respuesta la cantidad de ciclos obtenidos con el criterio de falla de la norma AASHTO T321 (N(50%)) no presenta diferencias significativas en las medias de las poblaciones para ningún factor, ni la combinación de los mismos (ver Cuadro 4-20).

Cuadro 4-20. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(50% RI) (600  $\mu$ s)

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0,255
Tipo de mezcla	3	0,322
TMN*Tipo de mezcla	3	0,287



Es posible ordenar las mezclas de acuerdo con su resistencia a la fatiga (ver Cuadro 4-21). Se puede notar que las mezclas de control son de las menos susceptibles al daño por fatiga, la mezcla con mayor número de ciclos al 50 % de la Rigidez Inicial fue la 9,5 SBS+MB.

*Cuadro 4-21. Clasificación de mezclas según el parámetro N (50% RI)*

<b>Tipo de Mezcla (TMN)</b>	<b>N (50% RI)</b>
9,5 SBS+MB	49970
12,5 CT	46273
9,5 CT	43237
12,5 SBS	37397
9,5 SBS+CAL	34720
9,5 SBS	32953
12,5 SBS+MB	25687
12,5 SBS+CAL	24603

El criterio de falla del método de Rowe y Bouldin presenta un comportamiento estadístico igual que el criterio de falla de la norma AASHTO T321, pues el análisis ANOVA proporciona valores de probabilidad mayores a 0,05 en todos los casos (ver Cuadro 4-22).

*Cuadro 4-22. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(Rowe y Bouldin) (600  $\mu$ s)*

<b>Origen de la Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Probabilidad</b>
TMN	1	0,817
Tipo de mezcla	3	0,889
TMN*Tipo de mezcla	3	0,411

Ordenando las MAC de acuerdo con la resistencia a la fatiga obtenida con el método de Rowe y Bouldin se encuentran algunas diferencias con respecto a los resultados del criterio de la norma AASHTO T321. Con el criterio de falla del método de Rowe y Bouldin la mezcla más resistente a la fatiga es la 12,5 SBS (ver Cuadro 4-23), las demás mezclas poseen una clasificación muy similar para ambos métodos de análisis.

*Cuadro 4-23. Clasificación de mezclas según el parámetro N (Rowe y Bouldin) (600  $\mu$ s)*

<b>Tipo de Mezcla (TMN)</b>	<b>N (Rowe y Bouldin)</b>
12,5 SBS	95796
9,5 SBS+MB	93919
12,5 CT	80871
9,5 CT	71036
9,5 SBS+CAL	70925
12,5 SBS+MB	50076
9,5 SBS	47551
12,5 SBS+CAL	37025

En ambos criterios de falla es posible notar diferencias considerables entre los promedios de las MAC, no obstante, los coeficientes de variación son tan elevados que ocasionan que estadísticamente no se encuentren diferencias. Por otra parte, para un mismo parámetro (Rigidez Inicial y número de ciclos) es posible encontrar mezclas con promedios muy similares.

La Figura 4-2 muestra un gráfico de los resultados de fatiga del ensayo. Para la deformación controlada de 600  $\mu$ s se requiere una cantidad relativamente mayor de ciclos para la falla del criterio de Rowe y Bouldin, con respecto al número de ciclos del criterio de la norma AASHTO T321. Los intervalos de las barras de error son calculados con la variación individual presentada por tipo de mezcla.

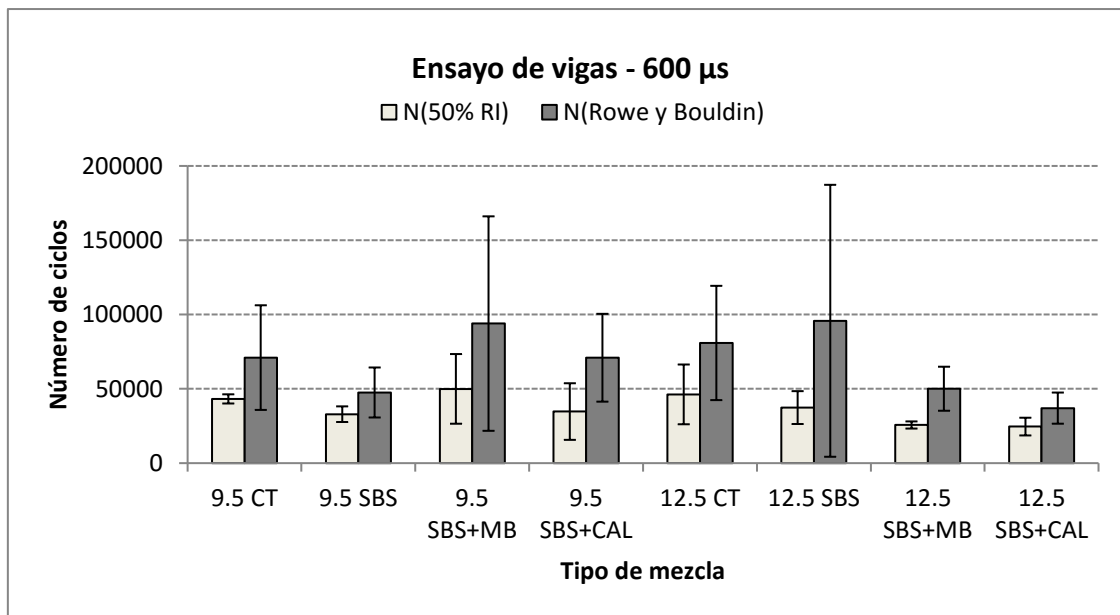


Figura 4-2. Resultados de fatiga del ensayo de vigas a flexión (600  $\mu$ s)

La comparación de resultados se realiza al asignar un orden a cada mezcla de acuerdo con el número de ciclos obtenido hasta la falla, donde el orden 1 corresponde a la mezcla más resistente a la fatiga. Como ya se mencionó, para ambos criterios de falla el orden es muy similar, exceptuando la mezcla de 12,5 SBS. Para las demás mezclas hay variaciones, pero en la mayoría de casos de una unidad en el *ranking*, lo cual es poco tomando en cuenta la alta variabilidad en los datos y la similitud del comportamiento de algunas mezclas.

El Cuadro 4-24 y la Figura 4-3 muestran el orden obtenido para los resultados del ensayo. En el Cuadro 4-24 se asigna un orden a la Rigidez Inicial para comparar los datos con los obtenidos

con el número de ciclos y verificar si existe alguna relación. En el orden de la Rigidez Inicial el número 1 corresponde al menor valor de Rigidez Inicial, es decir, la mezcla más flexible.

El Cuadro 4-25 presenta una comparación del orden de cada parámetro de análisis. Se muestra la diferencia de *ranking* entre los resultados para cada mezcla.

Normalmente, mezclas menos rígidas poseen una mayor vida a la fatiga, sin embargo, no se encontró relación entre la Rigidez Inicial y el número de ciclos a la falla de ninguno de los métodos. La diferencia de *rankings* entre la Rigidez Inicial y el número de ciclos es variable y amplia.

Cuadro 4-24. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (600  $\mu$ s)

Tipo de Mezcla (TMN)	Rigidez Inicial		N (50% RI)		N (Rowe y Bouldin)	
	Promedio (MPa)	Orden	Promedio	Orden	Promedio	Orden
9.5 SBS+MB	5286,03	7	49970	1	93919	2
12.5 CT	3632,71	1	46273	2	80871	3
9.5 CT	4920,41	6	43237	3	71036	4
12.5 SBS	4532,50	3	37397	4	95796	1
9.5 SBS+CAL	4389,53	2	34720	5	70925	5
9.5 SBS	5516,04	8	32953	6	47551	7
12.5 SBS+MB	4538,19	4	25687	7	50076	6
12.5 SBS+CAL	4822,55	5	24603	8	37025	8

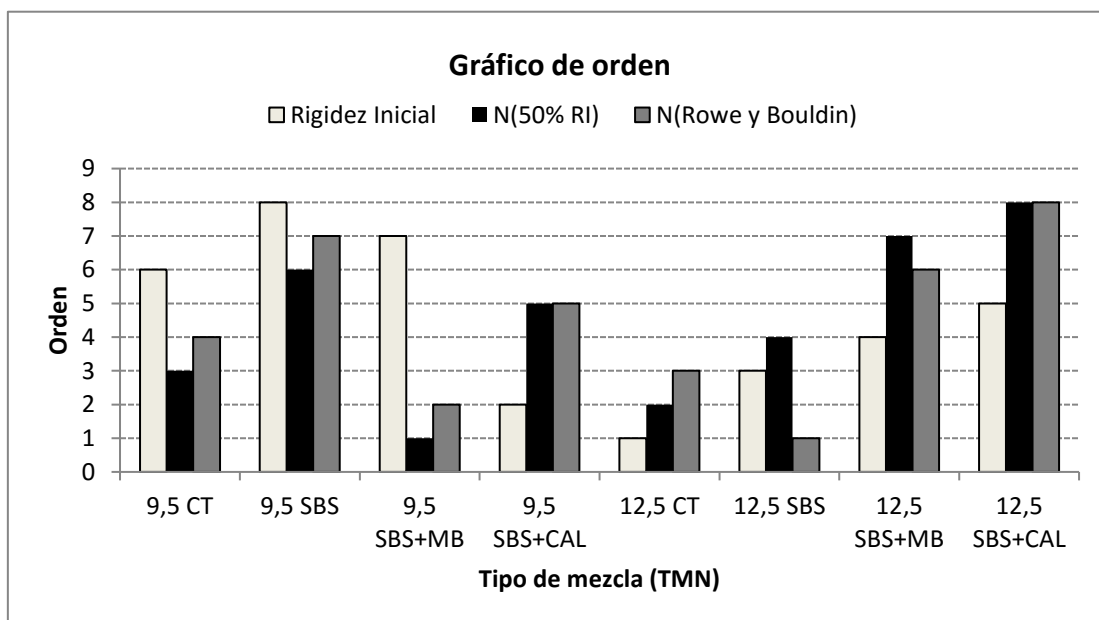


Figura 4-3. Gráfico del ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (600  $\mu$ s)

Cuadro 4-25. Diferencias de orden obtenidas para los resultados de ensayo (600  $\mu$ s)

Mezcla	Rigidez Inicial - N(50% RI)	Rigidez Inicial - N(Rowe y Bouldin)	N(50% RI) - N(Rowe y Bouldin)
9,5 SBS+MB	6	5	1
12,5 CT	1	2	1
9,5 CT	3	2	1
12,5 SBS	1	2	3
9,5 SBS+CAL	3	3	0
9,5 SBS	2	1	1
12,5 SBS+MB	3	2	1
12,5 SBS+CAL	3	3	0

El CR-2010 establece la designación "418 (4)" para mezclas asfálticas Superpave diseñadas para resistir agrietamiento por fatiga. Para este tipo de mezclas las repeticiones de carga mínimas para una deformación de 600  $\mu$ s son 40 000. Las condiciones de ensayo y de los especímenes utilizados en el presente proyecto son las mismas que las especificadas en el CR-2010. Únicamente las mezclas 9,5 SBS+MB, 12,5 CT y 9,5 CT cumplen con los requisitos para mezclas diseñadas para resistir el agrietamiento por fatiga.

#### 4.2.2 Deformación controlada de 400 $\mu$ s

El Cuadro 4-26 muestra un resumen de los resultados obtenidos para el ensayo de vigas a flexión en 4 puntos a una deformación controlada de 400  $\mu$ s.

Cuadro 4-26. Resultados del ensayo de vigas a flexión usando una deformación de 400  $\mu$ s

Tipo de Mezcla (TMN)	Rigidez Inicial		N (50% RI)		% RI (Rowe y Bouldin)		N (Rowe y Bouldin)	
	Promedio (MPa)	C.V. (%)	Promedio	C.V. (%)	Promedio	C.V. (%)	Promedio	C.V. (%)
9,5 CT	5048,1	9,1	321843	51,2	48,64	3,4	325566	48,0
9,5 SBS	5718,8	5,3	417257	65,6	48,94	0,5	431288	66,2
9,5 SBS+MB	5600,6	10,5	874737	27,9	47,82	3,4	1001388	39,9
9,5 SBS+CAL	5411,1	2,3	414597	39,3	48,60	8,5	438157	44,7
12,5 CT	3938,3	3,2	509780	30,8	49,96	10,2	548053	47,0
12,5 SBS	4624,6	7,1	511340	15,5	46,37	0,8	546091	14,1
12,5 SBS+MB	4759,8	6,4	237387	41,9	42,09	1,3	287898	55,1
12,5 SBS+CAL	4663,9	6,2	269287	51,4	45,94	4,0	306758	54,3

Se presenta el mismo comportamiento que para los ensayos a una deformación controlada de 600  $\mu$ s. Los coeficientes de variación son relativamente bajos para la Rigidez Inicial (menores a 11 %) y el porcentaje de la Rigidez al momento de la falla de Rowe y Bouldin.

La variabilidad de los resultados al evaluar el número de ciclos al 50 % de la reducción de la Rigidez Inicial incrementa considerablemente con respecto a la obtenida para la Rigidez Inicial. El rango de los C.V. en este caso es entre 15 % y 66%.

Para el criterio de falla del método de Rowe y Bouldin los C.V tienden a incrementar en la mayoría de casos con respecto al criterio de la norma AASHTO, no obstante, el incremento no es tan grande como el presentado en el ensayo a deformación controlada de 600  $\mu$ s. Los C.V. del criterio de falla de Rowe y Bouldin se encuentran en un rango entre 14 % y 67 %, que es prácticamente el mismo obtenido para el criterio de la norma AASHTO T321. El mayor incremento fue de 16 % y todos los demás fueron menores a 15 %.

El análisis estadístico para el porcentaje de Rigidez Inicial obtenido con el método de Rowe y Bouldin presenta probabilidades mayores a 0,05 en todos los casos. En promedio se requiere un porcentaje de la Rigidez Inicial de 47,3 % para generar la falla y por lo tanto el número de ciclos predicho con este método es mayor que el de la norma AASHTO T321.

Al realizar un análisis estadístico para el valor de la Rigidez Inicial se obtienen los resultados mostrados en el Cuadro 4-27. Hay diferencia significativa en la medias de las poblaciones al evaluar los factores TMN y Tipo de mezcla, no obstante, para la combinación de las variables predictoras no se presentan divergencias. Las mezclas de 9,5 mm TMN poseen mayores rigideces, como en todos los casos de análisis anteriores.

*Cuadro 4-27. Análisis estadístico utilizando la Rigidez Inicial como variable respuesta (400  $\mu$ s)*

<b>Origen de la Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Probabilidad</b>
TMN	1	0
Tipo de mezcla	3	0,005
TMN*Tipo de mezcla	3	0,719

Realizando un análisis de Tukey con respecto al Tipo de mezcla se obtienen los resultados mostrados en el Cuadro 4-28. La mezcla menos rígida es la de control y posee diferencias significativas con respecto a las demás. La mezcla más rígida es la de SBS+MB, en contraste con la mezcla más rígida obtenida en el ensayo a una deformación permanente de 600  $\mu$ s (SBS). En ambos casos las mezclas SBS+MB, SBS y SBS+CAL no presentan diferencias estadísticas entre sus medias y los valores de la rigidez son muy similares entre sí.

Cuadro 4-28. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Rigidez Inicial (400  $\mu$ s)

Tipo de mezcla	Rigidez Inicial Promedio (MPa)	Grupo	
SBS+MB	5180,2	A	
SBS	5171,7	A	
SBS+CAL	5037,5	A	
CT	4493,2		B

Si se realiza un análisis de Tukey para la combinación de factores (Tipo de mezcla y TMN) es posible clasificar las mezclas en grupos, no obstante, las diferencias presentadas se deben a los factores TMN y Tipo de mezcla individualmente y no a la combinación de ambos. La Figura 4-4 muestra un gráfico de interacción donde se identifican las variaciones debidas a las variables explicativas.

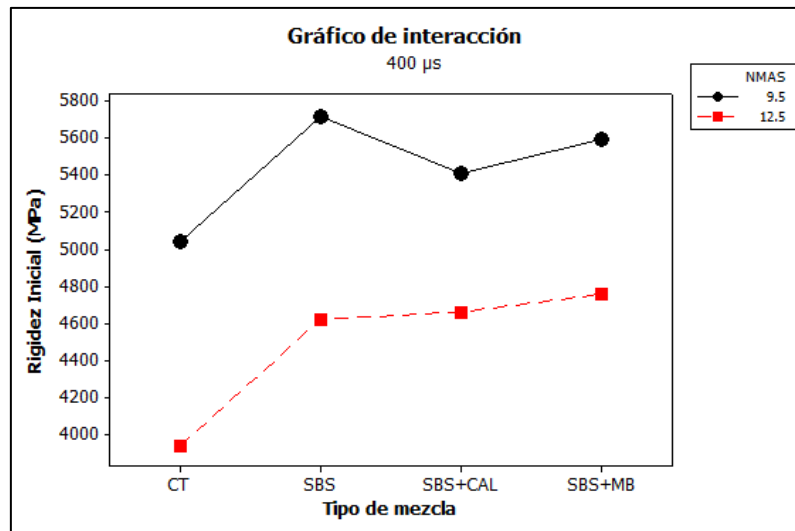


Figura 4-4. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Rigidez Inicial (400  $\mu$ s)

El Cuadro 4-29 presenta la agrupación realizada con el método de Tukey según las medias de las mezclas. Nuevamente la mezcla menos rígida es la de 12,5 CT debido a su alto contenido de asfalto, sin embargo, no posee diferencias significativas estadísticamente con las medias de otras 3 MAC.

En un análisis estadístico de un solo factor (Tipo de mezcla (TMN)) los grados de libertad en el análisis se incrementan a 7 (debido a que hay 8 tipos de mezclas de dos granulometrías diferentes). Como se deben explicar las diferencias entre las medias de las mezclas la probabilidad encontrada es 0,000. Dicho análisis es válido, pero no permite diferenciar la fuente de la variación, es decir, el TMN, Tipo de mezcla o la combinación de ambos variables. Cuando

el análisis se realiza con dos factores los grados de libertad se obtienen como la multiplicación de los grados de libertad de ambos factores.

*Cuadro 4-29. Clasificación para la combinación de factores según la Rigidez Inicial (400  $\mu$ s)*

TMN (mm)	Tipo de mezcla	Rigidez Inicial Promedio (MPa)	Grupo			
9,5	SBS	5718,8	A			
9,5	SBS+MB	5600,6	A	B		
9,5	SBS+CAL	5411,1	A	B	C	
9,5	CT	5048,1	A	B	C	
12,5	SBS+MB	4759,8		B	C	D
12,5	SBS+CAL	4663,9		B	C	D
12,5	SBS	4624,6			C	D
12,5	CT	3938,3				D

Se obtienen grupos de mezclas sin diferencias significativas entre sí y con medias similares, por lo que nuevamente se deduce que hay mezclas con un comportamiento semejante a la fatiga.

El análisis estadístico para la cantidad de ciclos obtenidos con el criterio de falla de la norma AASHTO T321 (N(50%)) no presenta diferencias significativas en las medias de las poblaciones para ningún factor individualmente, pero para la combinación de los mismos si (ver Cuadro 4-30).

*Cuadro 4-30. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(50% RI) (400  $\mu$ s)*

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0,093
Tipo de mezcla	3	0,23
TMN*Tipo de mezcla	3	0,003

En la Figura 4-5 se muestra la gráfica de interacción de los factores. Normalmente, cuando las líneas de un factor (en este caso para el factor TMN) no presentan una misma tendencia con respecto al otro factor, no se presentan diferencias significativas entre los factores individualmente.

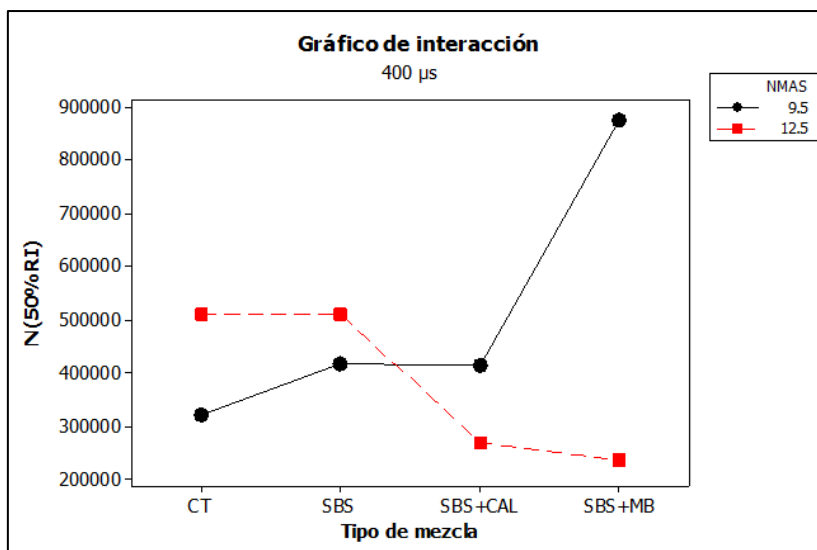


Figura 4-5. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto al parámetro N(50% RI) (400  $\mu$ s)

En el Cuadro 4-31 se presenta la clasificación por grupos realizada con el método de Tukey para el parámetro N(50% RI), al mismo tiempo que se muestran las mezclas ordenadas por su resistencia a la fatiga. La mezcla de 9,5 SBS+MB es nuevamente la más resistente a la fatiga mediante el criterio de la norma AASHTO T321. Aunque hay variaciones entre algunas mezclas, las agrupaciones continúan siendo de varios tipos de mezclas, es decir hay muchas mezclas muy similares estadísticamente.

Cuadro 4-31. Clasificación de mezclas según el parámetro N (50% RI) (400  $\mu$ s)

TMN (mm)	Tipo de mezcla	N (50% RI)	Grupo	
9,5	SBS+MB	874737	A	
12,5	SBS	511340	A	B
12,5	CT	509780	A	B
9,5	SBS	417257	A	B
9,5	SBS+CAL	414597	A	B
9,5	CT	321843		B
12,5	SBS+CAL	269287		B
12,5	SBS+MB	237387		B

El análisis estadístico del criterio de falla del método de Rowe y Bouldin proporciona valores de probabilidad mayores a 0,05 excepto en el caso de evaluación de la combinación de los factores TMN y Tipo de mezcla (ver Cuadro 4-32).



Cuadro 4-32. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(Rowe y Bouldin) (400  $\mu$ s)

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0,215
Tipo de mezcla	3	0,322
TMN*Tipo de mezcla	3	0,024

El Cuadro 4-33 presenta la clasificación por grupos realizada con el método de Tukey para el número de ciclos del criterio de Rowe y Bouldin. La mezcla de 9,5 SBS+MB es la más resistente a la fatiga. Hay pequeñas variaciones en la clasificación de varias MAC al comparar los criterios de falla.

Cuadro 4-33. Clasificación de mezclas según el parámetro N (Rowe y Bouldin) (400  $\mu$ s)

TMN (mm)	Tipo de mezcla	N (Rowe y Bouldin)	Grupo	
9,5	SBS+MB	1001388	A	
12,5	CT	548053	A	B
12,5	SBS	546091	A	B
9,5	SBS+CAL	438157	A	B
9,5	SBS	431288	A	B
9,5	CT	325566		B
12,5	SBS+CAL	306758		B
12,5	SBS+MB	287898	A	B

Es posible encontrar contrastes considerables entre los promedios de las mezclas al ordenar los datos de acuerdo con la resistencia a la fatiga, no obstante, los coeficientes de variación son tan elevados que ocasionan que estadísticamente no se encuentren diferencias significativas. Para un mismo parámetro (Rigidez Inicial y número de ciclos) se pueden encontrar mezclas con promedios muy semejantes.

La Figura 4-6 muestra un gráfico de los resultados de fatiga del ensayo. Para la deformación controlada de 400  $\mu$ s la cantidad de ciclos obtenida para la falla del criterio de Rowe y Bouldin es mayor a la del criterio de la norma AASHTO T321. La diferencia de la vida de fatiga de los criterios es poca. Los intervalos de las barras de error son calculados con la variación individual presentada por tipo de mezcla.

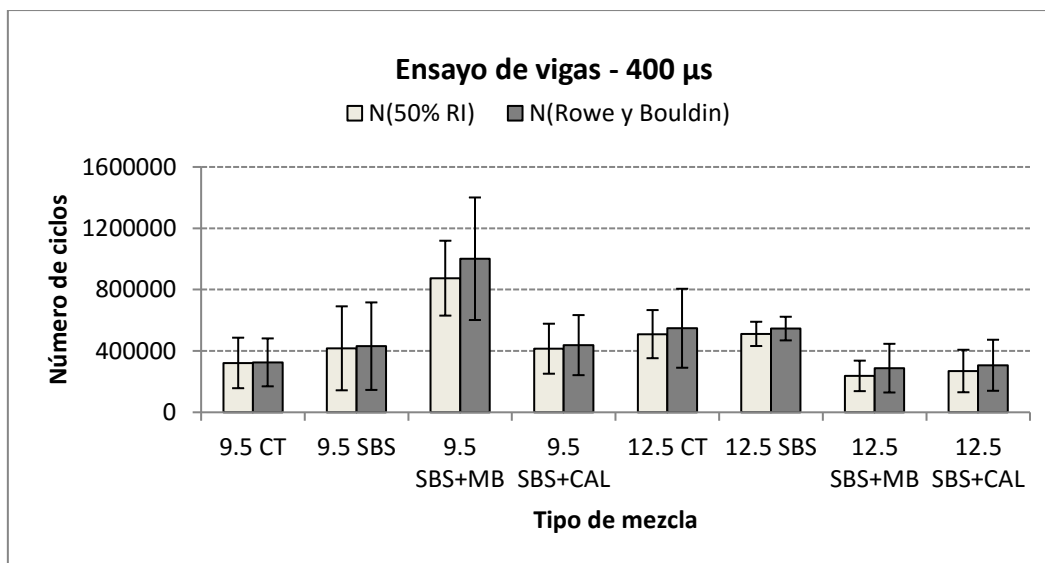


Figura 4-6. Resultados de fatiga del ensayo de vigas a flexión (400 μs)

Si se ordenan las mezclas y se asigna un *ranking* a cada una es posible notar que en ambos criterios de falla la clasificación es muy similar. Las variaciones de orden no son mayores a la unidad (ver Cuadro 4-34).

Cuadro 4-34. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (400 μs)

Tipo de Mezcla (TMN)	Rigidez Inicial		N (50% RI)		N (Rowe y Bouldin)	
	Promedio (MPa)	Orden	Promedio	Orden	Promedio	Orden
9,5 SBS+MB	5600,61	7	874737	1	1001388	1
12,5 SBS	4624,61	2	511340	2	546091	3
12,5 CT	3938,31	1	509780	3	548053	2
9,5 SBS	5718,77	8	417257	4	431288	5
9,5 SBS+CAL	5411,06	6	414597	5	438157	4
9,5 CT	5048,12	5	321843	6	325566	6
12,5 SBS+CAL	4663,85	3	269287	7	306758	7
12,5 SBS+MB	4759,76	4	237387	8	287898	8

Cualquier criterio de falla es factible para la clasificación de mezclas, pero cuando se requiera obtener el número de ciclos para la falla real se debe utilizar el criterio de Rowe y Bouldin. Lo anterior, independientemente de la deformación aplicada, pues para las dos deformaciones analizadas (deformación controlada de 600 μs y 400 μs) las diferencias entre la clasificación

obtenida con los dos criterios de falla son pocas y justificables. La Figura 4-7 muestra el orden obtenido para los resultados del ensayo a una deformación de 400  $\mu$ s.

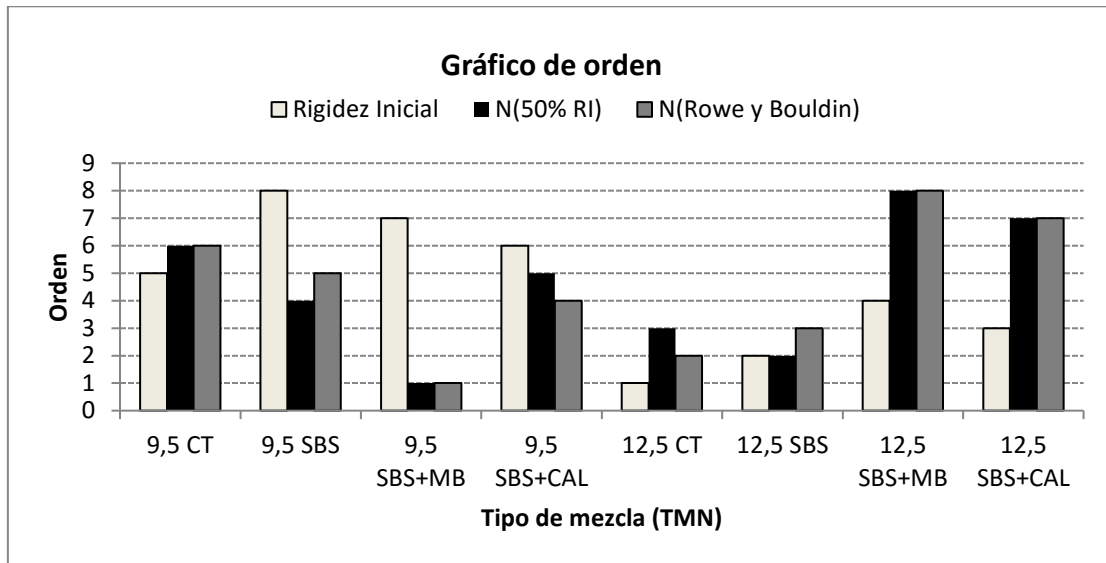


Figura 4-7. Gráfico del ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (400  $\mu$ s)

No se encontró relación entre la Rigidez Inicial y el número de ciclos a la falla de ninguno de los criterios. Las diferencias entre el *ranking* de la Rigidez Inicial y el de los criterios de falla son amplias (ver Cuadro 4-35). Aunque no se encontró relación en los *rankings*, las mezclas menos rígidas (12,5 CT y 12,5 SBS) generalmente sí estuvieron entre las que presentaban mayor vida de fatiga.

Cuadro 4-35. Diferencias de orden obtenidas para los resultados de ensayo (400  $\mu$ s)

Mezcla	Rigidez Inicial - N(50% RI)	Rigidez Inicial - N(Rowe y Bouldin)	N(50% RI) - N(Rowe y Bouldin)
9,5 SBS+MB	6	6	0
12,5 CT	0	1	1
9,5 CT	2	1	1
12,5 SBS	4	3	1
9,5 SBS+CAL	1	2	1
9,5 SBS	1	1	0
12,5 SBS+MB	4	4	0
12,5 SBS+CAL	4	4	0

Para mezclas tipo 418 (4), según el CR-2010, las repeticiones de carga mínimas para una deformación de 400  $\mu$ s son 200 000. Todas las mezclas cumplen con los requisitos para mezclas diseñadas para resistir el agrietamiento por fatiga.

La normativa nacional es hasta cierto punto ambigua, pues solo 3 mezclas cumplieron al aplicar una deformación controlada de 600  $\mu$ s y todas cumplieron a la deformación de 400  $\mu$ s (según los requisitos de las mezclas tipo 418 (4)).

### 4.3 Ensayo Overlay

Como se explicó en la metodología, se realizaron dos acondicionamientos diferentes para los especímenes del ensayo *Overlay*. Se analizan por separado los resultados de ambos grupos de ensayo y finalmente se realiza una comparación de los mismos.

#### 4.3.1 Grupo 1 - Especímenes sin envejecimiento en horno a largo plazo

El ensayo *Overlay* (OT) se llevó a cabo inicialmente en especímenes sin el proceso de envejecimiento en horno a largo plazo, respetando en la medida de lo posible el procedimiento estipulado en la norma Tex-248-F. Como no se logró inducir la falla en los especímenes, inclusive al aumentar el número de ciclos de carga por encima de los 1200 ciclos, se modificó la metodología.

En el Cuadro 4-36 se muestran los resultados del ensayo *Overlay* con especímenes sin envejecimiento en horno a largo plazo (grupo 1). Se analizan los resultados en base al porcentaje de reducción de carga obtenido a los 1200 ciclos, pues no se generaron datos suficientes para implementar otro criterio.

Cuadro 4-36. Resultados del grupo 1 de ensayos *Overlay*

Mezcla	Carga máxima (kN)		Porcentaje de reducción de carga al ciclo 1200	
	Promedio	C.V.	Promedio	C.V.
9,5 CT	1,72	8,12	74,17	11,97
9,5 SBS	2,31	1,02	86,08	9,27
9,5 SBS+CAL	2,16	1,33	73,55	24,65
12,5 CT	1,53	2,50	78,02	2,31
12,5 SBS	1,88	2,38	84,27	2,38
12,5 SBS+CAL	1,77	13,13	65,26	16,10

La variabilidad en los resultados de los especímenes de ensayo de una misma mezcla, para la carga máxima aplicada, es muy bajo en la mayoría de casos. Se obtienen C.V. menores a 2,5 % para todas las mezclas excepto en la mezcla 9,5 CT (C.V.= 8,12 %) y la mezcla 12,5

SBS+CAL (C.V.= 13,13 %). Al obtener C.V. bajos es posible diferenciar entre mezclas más fácilmente al realizar el análisis estadístico.

Los C.V. del porcentaje de reducción de carga al ciclo 1200 los C.V. son mayores que los de la carga máxima, no obstante, los valores obtenidos no son muy elevados tomando en cuenta la variabilidad normalmente encontrada en resultados de fatiga. Casi todos los C.V. son cercanos a 15 % o menores. Únicamente la mezcla 9,5 SBS+CAL presenta un coeficiente más alto (C.V.= 24,65 %).

No se encuentra ninguna relación entre la variabilidad encontrada para la carga máxima y la encontrada para el criterio de comparación de fatiga. No necesariamente las mezclas con mayor C.V. para la carga máxima presentan un mayor C.V. para el porcentaje de reducción de carga al ciclo 1200.

Aunque los coeficientes de variación aparentan ser bajos, como las medias son similares, podría no haber diferencias estadísticas significativas entre las mismas. Para los especímenes de la mezcla 9,5 CT el menor valor obtenido para el porcentaje de reducción de carga a los 1200 ciclos es de 68,76 % y el mayor valor de 84,1 %, el valor del espécimen faltante fue de 73.14 %. Dicha variabilidad equivale a un C.V. de 11,97 % que aparenta no ser tan elevado, sin embargo, el rango de valores promedio de las mezclas es similar al obtenido para la mezcla 9,5 CT (ver Cuadro 4-36).

El análisis estadístico realizado para los resultados de la carga máxima muestra que hay diferencias significativas en los promedios de las mezclas para los factores TMN y el Tipo de mezcla. Cuando se combinan los factores las medias de las mezclas son iguales estadísticamente a un nivel de confianza del 95 % (ver probabilidades del Cuadro 4-37).

*Cuadro 4-37. Análisis estadístico utilizando la carga máxima como variable respuesta (Grupo 1-OT)*

<b>Origen de la Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Probabilidad</b>
TMN	1	0
Tipo de mezcla	2	0
TMN*Tipo de mezcla	2	0,232

En la Figura 4-8 se presenta el gráfico de interacción para los resultados. Se muestra que al realizar una combinación de factores no hay variación con respecto al comportamiento individual.

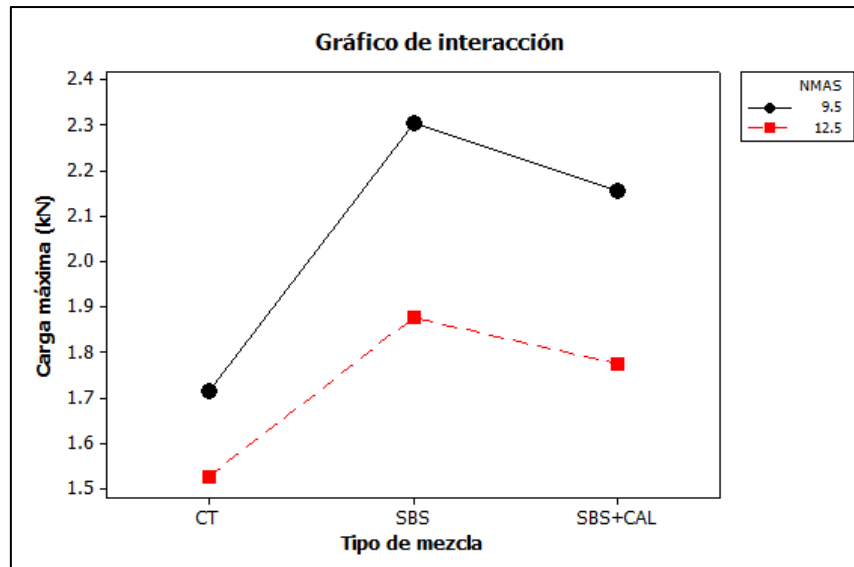


Figura 4-8. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Rigidez Inicial (Grupo 1-OT)

Las mezclas de 9,5 mm TMN generan mayores valores de carga máxima en todas las MAC analizadas. El factor Tipo de mezcla presenta diferencias significativas para la carga medida en la mezcla de control (CT), la cual posee la menor carga máxima promedio. Las demás mezclas analizadas poseen medias similares de carga máxima y no hay diferencias estadísticas entre ellas. El Cuadro 4-38 muestra los resultados obtenidos para el Tipo de mezcla utilizando el método de Tukey.

Cuadro 4-38. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Carga Máxima (Grupo 1-OT)

Tipo de mezcla	Carga máxima (kN)	Grupo	
SBS	2,1	A	
SBS+CAL	2	A	
CT	1,6		B

Un análisis estadístico de un solo factor (Tipo de mezcla (TMN)) para la variable respuesta Carga Máxima genera una probabilidad de 0,000, que da a entender que hay diferencias significativas entre las mezclas. Dicho análisis no permite identificar que las variaciones son debidas individualmente por los factores y no por la combinación de ambos. El Cuadro 4-39 muestra los grupos encontradas con el método de Tukey para la combinación de factores.

Cuadro 4-39. Clasificación de mezclas de acuerdo con el valor de la carga máxima (Grupo 1-OT)

TMN (mm)	Tipo de mezcla	Carga máxima (kN)	Grupo			
9,5	SBS	2,3	A			
9,5	SBS+CAL	2,2	A	B		
12,5	SBS	1,9		B	C	
12,5	SBS+CAL	1,8			C	D
9,5	CT	1,7			C	D
12,5	CT	1,5				D

La mezcla que presenta la mayor carga es la 9,5 SBS. La menor carga se obtuvo en la mezcla 12,5 CT. Las mezclas del mismo grupo poseen medias muy similares y la variabilidad de los resultados no afecta significativamente la categorización.

Una mayor carga de aplicación se interpreta como una mayor rigidez de la mezcla. Los resultados de la mezcla 12,5 CT, que posee el mayor contenido de asfalto y que se espera que sea muy poco rígida, son esperables.

El análisis estadístico para el porcentaje de reducción de carga a los 1200 ciclos brinda probabilidades superiores a 0,05 en todos los casos, por lo que no se encuentran diferencias significativas entre las medias de las poblaciones. Como ya se mencionó, aunque los C.V. aparentan ser bajos, las medias de las poblaciones son muy similares entre sí y por lo tanto no se encuentran discrepancias estadísticamente.

Es posible realizar un ordenamiento de las mezclas de acuerdo con los resultados obtenidos. Se asigna un orden (valores del 1 al 8) a las mezclas para facilitar la comparación de datos. Para la carga máxima entre menor sea el orden menor es la carga, pues se supone que entre más rígida sea la mezcla mayor carga de aplicación es requerida y la vida a la fatiga podría ser menor.

Con respecto al porcentaje de reducción de carga al ciclo 1200 se espera que entre mayor sea el porcentaje, mayor deterioro haya en la mezcla y por lo tanto es más susceptible al daño por fatiga. Entre menor sea el orden del porcentaje de reducción de carga a los 1200 ciclos menor será el porcentaje obtenido. Se recuerda que el criterio de comparación de fatiga no está relacionado con ninguna interpretación física y por lo tanto, no necesariamente es adecuado para la clasificación del comportamiento de las mezclas.

En el Cuadro 4-40 se muestran los valores del orden de cada mezcla para los dos parámetros estudiados. No se encuentra ninguna tendencia entre la carga máxima y el porcentaje de

reducción a los 1200 ciclos, pues los *rankings* obtenidos no son similares. Aparentemente los Tipos de mezcla SBS+CAL presentan el menor deterioro promedio a los 1200 ciclos y las mezclas modificadas con SBS presentan el mayor porcentaje de reducción de carga. Las mezclas con SBS presentan las cargas mayores.

Cuadro 4-40. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (Grupo 1-OT)

Tipo de Mezcla (TMN)	Carga máxima (kN)		Porcentaje de reducción de carga al ciclo 1200		Diferencias de orden
	Promedio	Orden	Promedio	Orden	
12,5 SBS+CAL	1,77	3	65,26	1	2
9,5 SBS+CAL	2,16	5	73,55	2	3
9,5 CT	1,72	2	74,17	3	1
12,5 CT	1,53	1	78,02	4	3
12,5 SBS	1,88	4	84,27	5	1
9,5 SBS	2,31	6	86,08	6	0

#### 4.3.2 Grupo 2 - Especímenes con envejecimiento en horno a largo plazo

Los resultados del ensayo *Overlay* con especímenes envejecidos en horno a largo plazo (grupo 2) generan suficientes datos para evaluar los dos criterios de falla analizados en el Marco Teórico. Se evalúa el número de ciclos necesario para producir una reducción del 93 % de la carga inicial aplicada ( $N_{max}$ ) y el número de ciclos del método NLC ( $N(NLC)$ ). En el Cuadro 4-41 se muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 4-41. Resultados del grupo 2 de ensayos *Overlay*

Mezcla	Carga máxima (kN)		$N_{max}$		$N(NLC)$		Porcentaje de reducción de carga (NLC)	
	Promedio	C.V.	Promedio	C.V.	Promedio	C.V.	Promedio	C.V.
9,5 CT	2,70	7,8	698	46,5	389	48,5	72,5	7,2
9,5 SBS	3,05	4,1	301	40,5	129	52,4	69,4	1,8
9,5 SBS+MB	3,04	5,5	244	35,0	133	61,5	72,9	6,6
9,5 SBS+CAL	2,71	2,3	366	59,7	260	66,9	73,4	8,5
12,5 CT	2,30	1,5	2012	24,6	1792	24,6	78,7	2,6
12,5 SBS	2,90	3,5	413	13,2	297	67,1	74,4	7,0
12,5 SBS+MB	2,63	8,6	534	93,8	152	49,7	70,7	6,4
12,5 SBS+CAL	2,70	2,5	719	21,7	544	23,3	79,6	9,2

Es importante mencionar que para la mezcla 12,5 CT ninguno de los especímenes alcanzó la reducción del 93 % de la carga inicial, por lo que el promedio se realizó con el número de ciclos



máximo aplicado a cada espécimen. El promedio obtenido se usa únicamente de referencia, para ver si hay diferencias con respecto a las demás mezclas. El número de ciclos aplicado a cada espécimen fue diferente, pues se incrementó luego de la realización de cada ensayo para intentar obtener la falla de las muestras. Se obtuvieron reducciones de carga de 77 % (1658 ciclos), 82 % (2578 ciclos) y 90% (1800 ciclos) para los tres especímenes de la mezcla 12,5 CT.

Para las mezclas 12,5 SBS, 12,5 SBS+MB y 12,5 SBS+CAL uno de los tres especímenes de ensayo no alcanzó la reducción de carga de 93 % con los ciclos aplicados, por lo que en dichos casos el promedio realizado para la obtención de  $N_{max}$  cuenta con un dato menos.

Los coeficientes de variación encontrados para la carga máxima son bajos, menores a 10 % en todos los casos. Las medias encontradas para la carga máxima son similares en algunos casos, para las mezclas 9,5 SBS y 9,5 SBS+MB la carga máxima es prácticamente la misma y son los mayores valores encontrados. A mayor carga máxima, mayor rigidez.

Los coeficientes de variación para los criterios de falla aumentan considerablemente. Para el parámetro  $N_{max}$  se encuentran C.V. entre 13 % y 94 %. El límite superior del rango mencionado está muy alejado del C.V. anterior (56,71 %). Coeficientes elevados propician que no se obtengan diferencias estadísticas en las mezclas. Los C.V. de  $N(NLC)$  son mayores en casi todos los casos con respecto a los de  $N_{max}$ , los C.V. varían entre 23 % y 68 %.

Únicamente la mezcla 12,5 SBS+MB presenta un C.V. mayor para  $N_{max}$  que para  $N(NLC)$  y corresponde a la mezcla más variable (C.V.= 93,75 % ) para el primero de los parámetros. Hay un comportamiento anómalo en esta mezcla, pues la falla según el criterio NLC se dio a una cantidad baja de ciclos. Los especímenes se agrietaron, pero no alcanzaron la reducción del 93 % de la carga rápidamente en todos los casos y por dicho motivo el coeficiente de variación es elevado.

El criterio de falla del 93 % no fue adecuado para la mezcla 12,5 SBS+MB, pues aunque el espécimen se agrietó a una cantidad baja de ciclos, la reducción de carga no ocurrió hasta la aplicación de muchos ciclos después (ver Cuadro 4-41).

Al observar los C.V. del porcentaje de reducción de carga obtenido con el método NLC se puede notar que los valores son relativamente bajos (C.V. menores a 10 % en todos los casos).

El análisis estadístico utilizando la carga máxima como variable respuesta muestra que hay diferencias significativas al analizar individualmente el TMN y el Tipo de mezcla, no obstante, para la combinación de ambas variables predictoras no se encuentran diferencias. La Figura 4-9 muestra un gráfico de interacción de los factores y el Cuadro 4-42 muestra los resultados del análisis estadístico realizado.

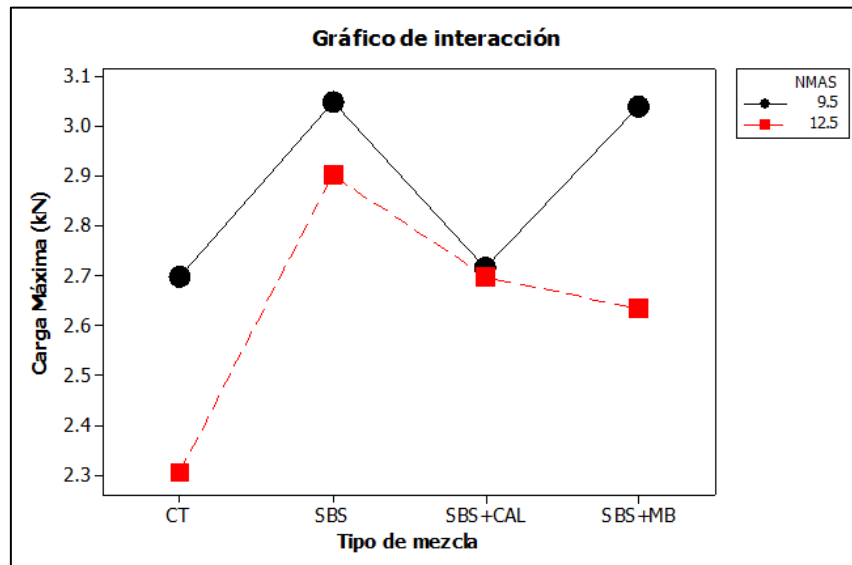


Figura 4-9. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Carga Máxima (Grupo 2-OT)

Cuadro 4-42. Análisis estadístico utilizando la carga máxima como variable respuesta (Grupo 2-OT)

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0,001
Tipo de mezcla	3	0
TMN*Tipo de mezcla	3	0,075

El tamaño máximo nominal de la mezcla influye directamente en el valor de la carga máxima, las mezclas de 9,5 mm TMN tienen mayores cargas en el ensayo Overlay. Para el grupo 1 de ensayos Overlay (especímenes sin envejecimiento) se obtuvo la misma analogía.

Con respecto al Tipo de mezcla, se obtienen 3 agrupaciones diferentes al realizar el análisis con el método de Tukey (ver Cuadro 4-43). Nótese que las medias de un mismo grupo de mezclas son muy similares entre sí. Como la variabilidad disminuyó con respecto a los especímenes del grupo 1 de ensayos *Overlay* es posible realizar una clasificación diferente de las mezclas.

Cuadro 4-43. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Carga Máxima (Grupo 2-OT)

Tipo de mezcla	Carga máxima (kN)	Grupo		
SBS	3	A		
SBS+MB	2,8	A	B	
SBS+CAL	2,7		B	C
CT	2,5			C

Un análisis estadístico de un solo factor (Tipo de mezcla (TMN)) genera una probabilidad de 0,000, por lo que es posible encontrar diferencias entre las medias de las mezclas, no obstante, dicho análisis no logra identificar el origen de las variaciones. Si se realiza un análisis de Tukey es posible clasificar las mezclas en los grupos mostrados en el Cuadro 4-44.

Cuadro 4-44. Clasificación de mezclas de acuerdo con el valor de la carga máxima (Grupo 2-OT)

Tipo de Mezcla (TMN)	Carga máxima (kN)	Grupo		
9,5 SBS	3,0	A		
9,5 SBS+MB	3,0	A		
12,5 SBS	2,9	A	B	
9,5 SBS+CAL	2,7	A	B	
9,5 CT	2,7	A	B	C
12,5 SBS+CAL	2,7	A	B	C
12,5 SBS+MB	2,6		B	C
12,5 CT	2,3			C

La mezcla 12,5 CT presenta la menor carga máxima, por lo que se puede deducir que es la mezcla más flexible. La mezcla 9,5 SBS posee la mayor rigidez. Como se puede notar, hay muchas mezclas similares estadísticamente entre sí, lo que es influenciado por la similitud de las medias de las mezclas y los coeficientes de variación que, aunque no son tan elevados, permiten el traslape de los intervalos de confianza de las diferentes mezclas.

El análisis estadístico para el parámetro  $N_{max}$  como variable respuesta genera probabilidades menores a 0,05 tanto para el análisis con los factores individuales (TMN y tipo de mezcla) como para la combinación de los mismos (ver Cuadro 4-45). La Figura 4-10 muestra un gráfico de interacción para las variables en cuestión.

Cuadro 4-45. Resultados del análisis estadístico para el parámetro  $N_{max}$  (Grupo 2-OT)

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0,002
Tipo de mezcla	3	0
TMN*Tipo de mezcla	3	0,019

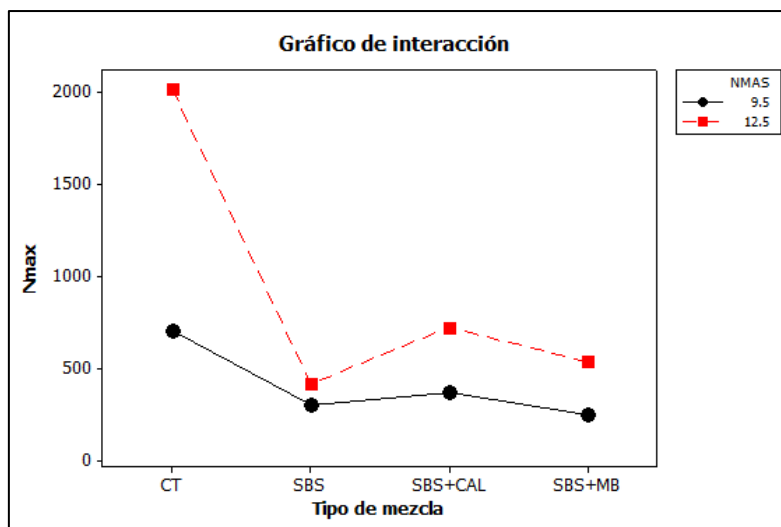


Figura 4-10. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto al parámetro Nmax (Grupo 2-OT)

El número de ciclos obtenido al 93 % de reducción de carga máxima es mayor para el tamaño máximo nominal del agregado de 12,5 mm. El análisis de Tukey para el tipo de mezcla muestra que las mezclas de control poseen diferencias significativas con respecto a las demás (ver Cuadro 4-46).

Cuadro 4-46. Clasificación para el Tipo de mezcla según el parámetro Nmax (Grupo 2-OT)

Tipo de mezcla	Nmax	Grupo	
CT	1355	A	
SBS+CAL	542		B
SBS+MB	389		B
SBS	357		B

La clasificación de las mezclas obtenida a partir del método de Tukey para la combinación de factores se presenta en el Cuadro 4-47. El promedio de ciclos encontrado para la mezcla 12,5 CT es muy diferente a los de las otras MAC y es la única mezcla que presenta diferencias significativas con respecto a las demás, aun cuando los especímenes de dicha mezcla no alcanzaron la reducción del 93 % de la carga máxima.

Cuadro 4-47. Clasificación de mezclas según el parámetro Nmax (Grupo 2-OT)

TMN	Tipo de mezcla	Nmax	Grupo	
12,5	CT	2012	A	
12,5	SBS+CAL	719		B
9,5	CT	698		B
12,5	SBS+MB	534		B
12,5	SBS	413		B
9,5	SBS+CAL	366		B
9,5	SBS	301		B
9,5	SBS+MB	244		B

Para el criterio de falla del método NLC se encuentran diferencias estadísticas para cada una de las variables predictoras analizadas y también para la combinación de ambas (ver Cuadro 4-48).

Cuadro 4-48. Resultados del análisis estadístico para el parámetro N(NLC) (Grupo 2-OT)

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0
Tipo de mezcla	3	0
TMN*Tipo de mezcla	3	0

Se encuentran las mismas tendencias que para el parámetro Nmax. El número de ciclos (N(NLC)) aumenta cuando se incrementa el tamaño máximo nominal de las mezclas. Por otra parte, únicamente las mezclas de control poseen diferencias significativas con respecto a las demás, al realizar la comparación por Tipo de mezcla (ver Cuadro 4-49).

Cuadro 4-49. Clasificación para el Tipo de mezcla según el parámetro N(NLC) (Grupo 2-OT)

Tipo de mezcla	Ciclos NLC	Grupo	
CT	1091	A	
SBS+CAL	402		B
SBS	213		B
SBS+MB	143		B

Cuando se realiza el método de Tukey para la combinación de las variables respuesta (TMN y tipo de mezcla) la única mezcla estadísticamente diferente a las demás es la mezcla 12,5 CT (ver Cuadro 4-50).

Cuadro 4-50. Clasificación de mezclas según el parámetro  $N(NLC)$  (Grupo 2-OT)

TMN	Tipo de mezcla	Ciclos NLC	Grupo	
12,5	CT	1792	A	
12,5	SBS+CAL	544		B
9,5	CT	389		B
12,5	SBS	297		B
9,5	SBS+CAL	260		B
12,5	SBS+MB	152		B
9,5	SBS+MB	133		B
9,5	SBS	129		B

Realizar análisis estadísticos cuando la variabilidad estadística es grande puede generar resultados donde no se encuentren diferencias estadísticas entre las medias de las poblaciones. Los intervalos de confianza son muy grandes cuando la variabilidad es alta y por lo tanto no se generan distinciones entre la mezclas.

Los resultados obtenidos para el porcentaje de reducción de carga al momento de la falla del método NLC son muy similares, por lo que el análisis estadístico brinda probabilidades superiores mayores a 0,05 en todos los casos de análisis (ver Cuadro 4-51).

En general, la falla se presenta antes de alcanzar el 80 % de reducción de carga. La mezcla que presentó el mayor porcentaje de reducción promedio fue la 12,5 SBS+CAL (79,6 %) y el menor porcentaje lo obtuvo la mezcla 9,5 SBS (69,4 %). En promedio se requiere una reducción de aproximadamente 74 % de la carga inicial para ocasionar la falla del método NLC.

Cuadro 4-51. Análisis estadístico para el porcentaje de reducción de carga NLC (Grupo 2-OT)

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0,078
Tipo de mezcla	3	0,256
TMN*Tipo de mezcla	3	0,416

La Figura 4-11 muestra un gráfico con los resultados de fatiga del ensayo *Overlay*. Se pueden notar las diferencias entre criterios de análisis. Los intervalos de las barras de error son calculados con la variación individual presentada por tipo de mezcla.

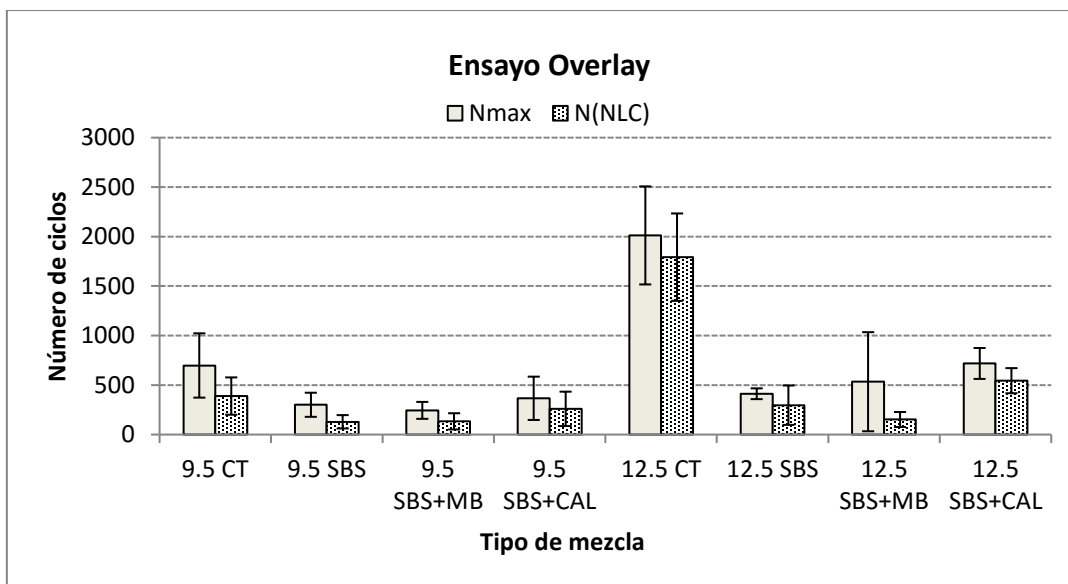


Figura 4-11. Resultados de fatiga del ensayo Overlay

Se asigna un orden (valores del 1 al 8) a cada mezcla según el valor de la respuesta obtenida (ver Cuadro 4-52 y Figura 4-12), para facilitar la comparación de resultados. Para la carga máxima, el menor número de orden corresponde a la menor carga y se relaciona con mezclas menos rígidas y que podrían tener un mejor comportamiento a la fatiga. Para los resultados de los parámetros Nmax y N(NLC) el menor número de orden está relacionado con la mayor cantidad de ciclos promedio de los especímenes, es decir con las mezclas con mayor vida de fatiga.

Cuadro 4-52. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (Grupo 2-OT)

Mezcla	Carga máxima (kN)		Nmax		N(NLC)	
	Promedio	Orden	Promedio	Orden	Promedio	Orden
12,5 CT	2,30	1	2012	1	1792	1
12,5 SBS+CAL	2,70	3	719	2	544	2
9,5 CT	2,70	4	698	3	389	3
12,5 SBS+MB	2,63	2	534	4	152	6
12,5 SBS	2,90	6	413	5	297	4
9,5 SBS+CAL	2,71	5	366	6	260	5
9,5 SBS	3,05	8	301	7	129	8
9,5 SBS+MB	3,04	7	244	8	133	7

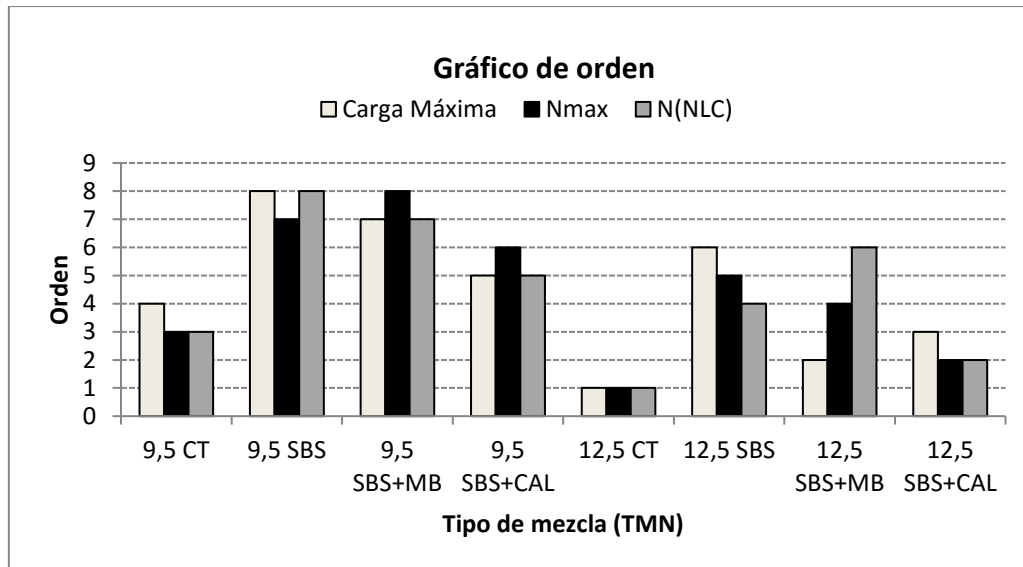


Figura 4-12. Gráfico del ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (400  $\mu$ s)

Al comparar los *rankings* obtenidos entre los resultados del ensayo es posible notar que son muy similares en casi todos los casos (ver Cuadro 4-53). Una diferencia de orden de una unidad no se considera muy significativa debido a la variabilidad obtenida entre los especímenes de cada mezcla y la similitud entre algunas medias.

Únicamente la mezcla 12,5 SBS+MB presenta mayor variabilidad todos los *ranking*. Dicha mezcla fue la que obtuvo los C.V. más elevados, además presentó un mal comportamiento para el criterio de falla de la norma Tex-248-F. Se determina que la aplicación de cualquiera de los dos criterios de falla analizados brinda resultados similares. Además, menores carga máximas están relacionadas con mayores vidas de fatiga de las mezclas.

Cuadro 4-53. Diferencias de orden obtenidas para los resultados del Grupo 2 del ensayo Overlay

Mezcla	Carga Máxima - Nmax	Carga Máxima - N(NLC)	Nmax - N(NLC)
12,5 CT	0	0	0
12,5 SBS+CAL	1	1	0
9,5 CT	1	1	0
12,5 SBS+MB	2	4	2
12,5 SBS	1	2	1
9,5 SBS+CAL	1	0	1
9,5 SBS	1	0	1
9,5 SBS+MB	1	0	1



### 4.3.3 Comparación de resultados de ensayos Overlay (Grupo 1 y Grupo 2)

Se realiza una comparación de los resultados obtenidos en los dos grupos de ensayos *Overlay*, con el fin de verificar si hay un comportamiento similar e intentar validar el criterio de comparación de fatiga implementado en el grupo 1 de ensayos.

Los especímenes envejecidos poseen una mayor rigidez, pues el proceso de envejecimiento causa la oxidación de las mezclas. Una mayor rigidez ocasiona que se requieran mayores fuerzas de aplicación para generar el mismo desplazamiento.

En el Cuadro 4-54 se muestra la comparación de resultados para la carga máxima en ambos grupos de ensayos. Al asignar un orden a las mezclas de acuerdo con la carga máxima obtenida por ensayo y comparar el *ranking* para ambos grupos de ensayo es posible notar que las diferencias son pocas. Se asume que los resultados obtenidos son semejantes.

Cuadro 4-54. Comparación de Cargas Máximas obtenidas en los ensayos Overlay

Mezcla	OT-Grupo 2		OT-Grupo 1		Relación de cargas	Diferencia de orden
	Carga máxima (kN)		Carga máxima (kN)			
	Promedio	Orden	Promedio	Orden		
12,5 CT	2,30	1	1,53	1	1,51	0
9,5 CT	2,70	3	1,72	2	1,57	1
12,5 SBS+CAL	2,70	2	1,77	3	1,52	1
12,5 SBS	2,90	5	1,88	4	1,55	1
9,5 SBS+CAL	2,71	4	2,16	5	1,26	1
9,5 SBS	3,05	6	2,31	6	1,32	0
Promedio					1,46	-
C.V.					8,98	-

Las desigualdades son presentadas en mezclas con pequeñas discrepancias entre las medias presentadas en un mismo grupo. En la Figura 4-13 se muestra un gráfico de orden para los resultados.

La relación de cargas es muy similar en la mayoría de casos. En las mezclas de 9,5 mm TMN las relaciones tienden a ser levemente menores. Una relación menor de relación de cargas puede ser producto de un menor efecto del proceso de envejecimiento en las mezclas, aunque también podría estar ligado al porcentaje de vacíos de aire u otro parámetro. En promedio la relación de cargas es de 1,46 con un C.V. relativamente bajo (8,98 %), por lo que se determina que el comportamiento se mantiene semejante en todas las mezclas al envejecer los especímenes.

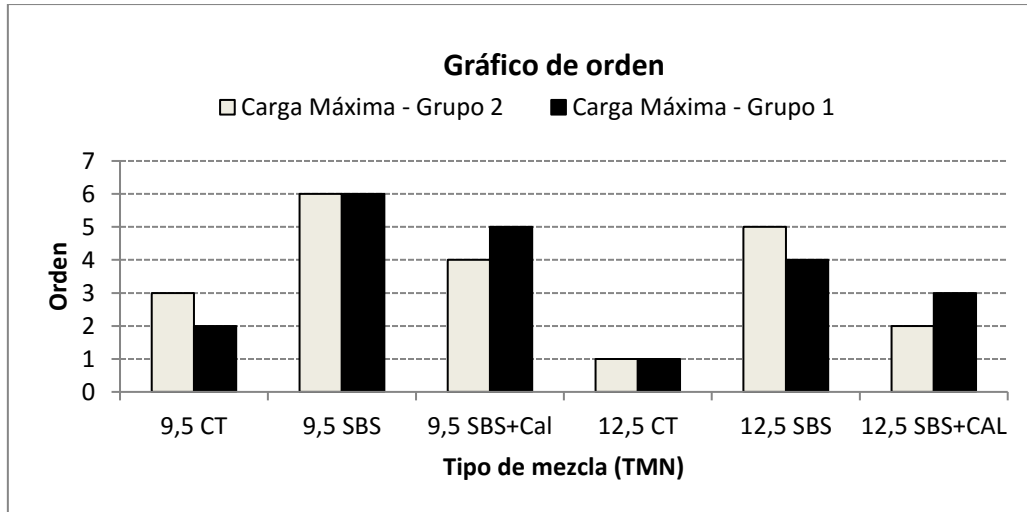


Figura 4-13. Gráfico del ranking de las Cargas Máximas obtenidas en los grupos de ensayos Overlay

No hay correspondencia entre las clasificaciones realizadas para ambos grupos de ensayos al comparar los criterios de análisis de fatiga. En ambos casos se asignó un orden a cada mezcla, donde el valor menor corresponde a la mezcla con mayor vida a la fatiga. En el Cuadro 4-55 se muestran las clasificaciones por orden para los criterios de análisis.

Cuadro 4-55. Comparación de criterios de análisis de fatiga usados en los grupos de ensayo Overlay

Tipo de Mezcla (TMN)	OT-Grupo 1		OT-Grupo 2				Diferencia de orden (G1-G2)
	Porcentaje de reducción de carga al ciclo 1200		Nmax		N(NLC)		
	Promedio	Orden	Promedio	Orden	Promedio	Orden	
12,5 CT	78,02	4	2012	1	1792	1	3
12,5 SBS+CAL	65,26	1	719	2	544	2	1
9,5 CT	74,17	3	698	3	389	3	0
12,5 SBS	84,27	5	413	4	297	4	1
9,5 SBS+CAL	73,55	2	366	5	260	5	3
9,5 SBS	86,08	6	301	6	129	6	0

La clasificación para ambos criterios de falla del grupo 2 de ensayos fue igual y se coloca la mezcla 12,5 CT como la menos susceptible a la fatiga. El *ranking* de ambos grupos de ensayo varía significativamente, tal y como lo demuestran las diferencias de orden (ver Figura 4-14).

La mezcla 12,5 CT posee un contenido de asfalto mayor al de las demás, por lo que se espera que su comportamiento a la fatiga sea bueno, además es la que presenta menores cargas máximas. En el *ranking* obtenido para el grupo 1 dicha mezcla posee una clasificación de 4.

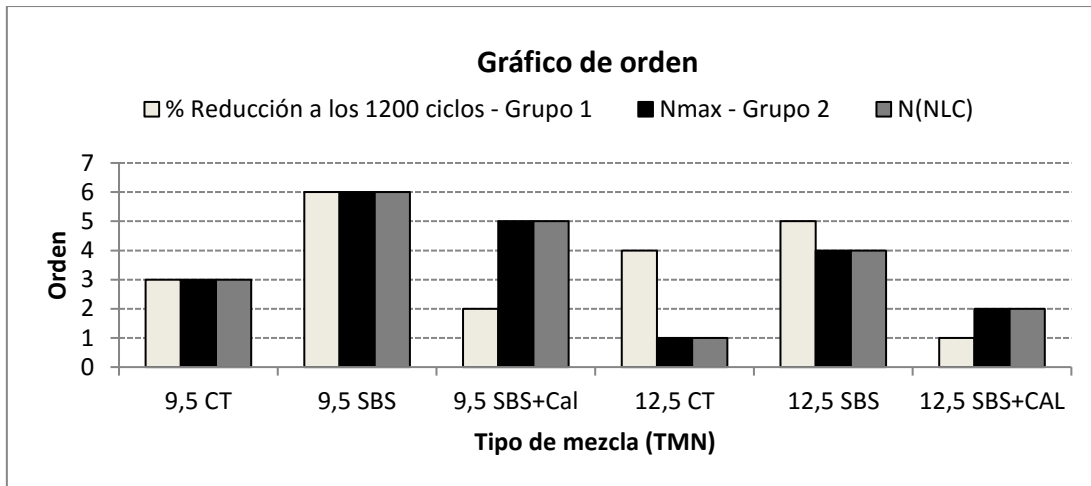


Figura 4-14. Gráfico del ranking de los criterios de análisis de fatiga usados en los grupos de ensayos Overlay

Debido a las diferencias obtenidas para el criterio de comparación de fatiga usado en el grupo 1 de ensayos, con respecto a los criterios analizados para el grupo 2, se determina que utilizar el porcentaje de reducción de carga obtenido a los 1200 ciclos no es un buen parámetro de comparación del comportamiento a la fatiga.

#### 4.4 Ensayo a flexión semicircular repetida (RSCB)

El ensayo RSCB se llevó a cabo en dos etapas, tal y como se explicó en la metodología experimental. En la primera etapa se realiza el ensayo SCB y se define la carga de aplicación en el ensayo de fatiga. En la segunda etapa se realiza el ensayo RSCB propiamente y se evalúa la resistencia a la fatiga con el número de ciclos de aplicación.

##### 4.4.1 Etapa I - Definición de carga, ensayo SCB

Los resultados del ensayo SCB incluyen la carga máxima y el área bajo la curva esfuerzo deformación (energía de fractura). De acuerdo con la metodología de ensayo, el área de fractura determinada probablemente sea menor a la real, no obstante, se realiza un análisis comparativo con los resultados obtenidos para buscar diferencias entre las mezclas.

Se cuenta con los resultados de la resistencia a la tensión diametral de las mezclas. Dichos datos fueron brindados por el LanammeUCR, de otro proyecto de investigación. Se utilizan los

resultados de la resistencia a la tensión diametral para compararlos de manera general con los del ensayo SCB. El análisis no está relacionado con los parámetros de fatiga.

Los resultados obtenidos en el ensayo SCB y en el ensayo de tensión diametral se muestran en el Cuadro 4-56. Se muestra la resistencia a la tensión diametral (R(TD)), la resistencia o carga máxima obtenida en el ensayo SCB (R(SCB)), la relación de cargas de los ensayos y la energía de fractura (Gc).

*Cuadro 4-56. Resultados obtenidos en el ensayo SCB*

Mezcla	R(TD) (kN)		R(SCB) (kN)		Relación de cargas $\frac{R(TD)}{R(SCB)}$	Carga RSCB 50% de carga SCB (kN)	Gc (kN*mm)	
	Promedio	C.V.	Promedio	C.V.			Promedio	C.V.
9,5 CT	18,15	1,57	2,66	5,72	6,83	1,328	4,79	9,39
9,5 SBS	20,56	4,35	3,09	10,29	6,66	1,543	4,43	4,17
9,5 SBS + MB	22,36	1,96	3,05	7,04	7,33	1,526	3,91	31,90
9,5 SBS+CAL	21,65	2,93	3,05	-	7,09	1,526	4,69	-
12,5 CT	16,13	2,24	1,73	9,49	9,31	0,866	5,00	9,77
12,5 SBS	17,28	4,06	2,34	11,40	7,38	1,170	4,70	2,18
12,5 SBS +MB	18,77	1,22	2,58	2,29	7,27	1,291	3,97	4,45
12,5 SBS+CAL	22,07	3,36	2,49	0,75	8,86	1,246	3,26	10,84

En la mezcla 9,5 SBS+CAL únicamente se utilizó el valor de uno de los especímenes para la determinación de la carga. El espécimen adicional de ensayo no tenía una base de apoyo plana y a la hora de realizar la prueba se generó una inestabilidad que provocó picos en la curva.

Los C.V. del ensayo de resistencia a la tensión diametral son muy bajos, menores a 5 % en todos los casos. Para la carga máxima obtenida en el ensayo SCB los C.V. aumentan, sin embargo, son menores a 12 % en todos los casos. Los especímenes del ensayo SCB presentan un proceso de corte que no poseen los especímenes del ensayo a tensión diametral, dicho proceso puede ocasionar el aumento en la variabilidad. Por otra parte, como se analizó anteriormente, los especímenes del ensayo SCB presentaron más variabilidad en el contenido de aire de la esperada, debido al método de obtención de muestras utilizado.

La relación de cargas entre ensayos (SCB y TD) es muy similar en la mayoría de casos, excepto para la mezclas 12,5 CT y 12,5 SBS+CAL que poseen valores elevados con respecto a los demás mezclas. El promedio general de la relación de cargas es de 7,6 (C.V.= 12,7 %). Si se

eliminan las dos mezclas mencionadas anteriormente (12,5 CT y 12,5 SBS+CAL), el promedio es de 7,01 (C.V. = 4,1 %). La carga no es un buen parámetro de evaluación de fatiga. La comparación de cargas se realiza únicamente para verificar si hay un comportamiento similar en las mezclas al comparar ambos ensayos.

Los C.V. obtenidos para la energía de fractura son relativamente bajos, menores a 11 %, en todas las mezclas, excepto en la mezcla 9,5 SBS+MB (C.V.=31,9 %). A mayor variabilidad, menos diferencias estadísticas tendrán las mezclas.

El análisis estadístico para la carga máxima obtenida en el ensayo SCB determina que hay diferencias significativas entre las medias de las mezclas al utilizar como variables predictoras el TMN y el Tipo de mezcla. Para la combinación de factores no se encuentran diferencias. El Cuadro 4-57 muestra los resultados del análisis estadístico y la Figura 4-15 muestra un gráfico de interacción de las variables predictoras.

Cuadro 4-57. Análisis estadístico utilizando la carga máxima como variable respuesta (SCB)

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0
Tipo de mezcla	3	0,01
TMN*Tipo de mezcla	3	0,442

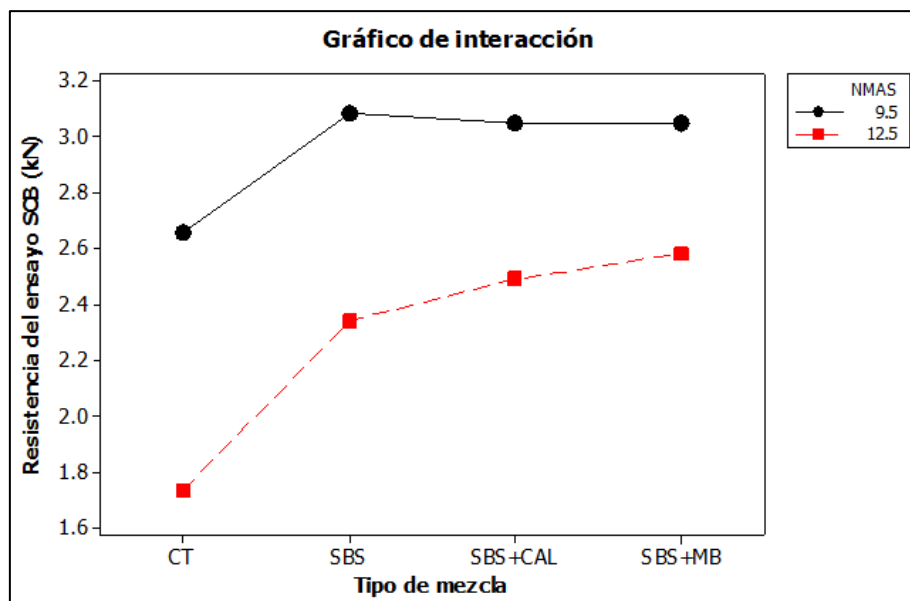


Figura 4-15. Gráfico de interacción del TMN y Tipo de mezcla con respecto a la Carga Máxima (SCB)

La resistencia del ensayo SCB es mayor para las mezclas de 9,5 mm TMN. Dichos resultados concuerdan con los obtenidos para la carga máxima del ensayo *Overlay* y la Rigidez Inicial del ensayo de vigas a flexión en 4 puntos. Para el Tipo de mezcla, como en la mayoría de análisis realizados para los demás ensayos, las mezclas de control (CT) son las que presentan diferencias significativas con respecto a las demás mezclas (ver Cuadro 4-58).

*Cuadro 4-58. Clasificación para el Tipo de mezcla según la Carga Máxima (SCB)*

<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Resistencia SCB</b>	<b>Grupo</b>	
SBS+MB	2,8	A	
SBS+CAL	2,8	A	
SBS	2,7	A	
CT	2,2		B

Es posible realizar una clasificación de las mezclas con el método de Tukey al combinar los factores o variables predictoras, no obstante, se debe tener en cuenta que cualquier variación es debida al comportamiento de los factores individualmente. En el Cuadro 4-59 se muestran las agrupaciones obtenidas para la mezclas.

El valor menor de carga fue obtenido para la mezcla 12,5 CT, la cual es la mezcla que se espera que sea la menos rígida. La mezcla que presentó la mayor carga máxima fue la 9,5 SBS. Las medias de las primeras 3 mezclas presentadas en el Cuadro 4-59 son iguales, posteriormente se tienen otras 3 mezclas que poseen promedios de carga semejantes.

La única mezcla que presenta una mayor variación en el promedio de carga es la 12,5 CT, no obstante, estadísticamente es igual a las medias de las mezclas 12,5 SBS y 12,5 SBS+CAL. Probablemente los C.V. de las mezclas son los que no permiten realizar una distinción estadística más marcada entre las mezclas.

*Cuadro 4-59. Clasificación de mezclas de acuerdo con el valor de la carga máxima (SCB)*

<b>TMN</b>	<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Resistencia SCB</b>	<b>Grupo</b>	
9,5	SBS	3,1	A	
9,5	SBS+CAL	3,1	A	
9,5	SBS+MB	3,1	A	
9,5	CT	2,7	A	
12,5	SBS+MB	2,6	A	
12,5	SBS+CAL	2,5	A	B
12,5	SBS	2,3	A	B
12,5	CT	1,7		B

La energía de fractura no presentó diferencias estadísticas entre las medias de las mezclas para ningún factor (ver Cuadro 4-60). La similitud de las medias y los C.V. ocasionan que las probabilidades del análisis ANOVA sean mayores a 0,05.

*Cuadro 4-60. Resultados del análisis estadístico para la energía de fractura (SCB)*

<b>Origen de la Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Probabilidad</b>
TMN	1	0,473
Tipo de mezcla	3	0,141
TMN*Tipo de mezcla	3	0,29

Teóricamente las mezclas menos propensas al daño por fatiga poseen mayores energías de fractura. De acuerdo con los valores promedio de la energía, la mezcla 12,5 CT es la menos susceptible al deterioro por fatiga, mientras que la mezcla 12,5 SBS+CAL es la que posee mayor susceptibilidad a dicho daño (ver Cuadro 4-61).

*Cuadro 4-61. Clasificación de mezclas de acuerdo con el valor de la energía de fractura (SCB)*

<b>TMN</b>	<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Energía de fractura</b>
12,5	CT	5
9,5	CT	4,8
12,5	SBS	4,7
9,5	SBS+CAL	4,7
9,5	SBS	4,4
12,5	SBS+MB	4
9,5	SBS+MB	3,9
12,5	SBS+CAL	3,3

#### **4.4.2 Etapa II- Ensayo RSCB**

La carga del ensayo RSCB se definió como un 50 % de la carga máxima obtenida en el ensayo SCB. Se aplican 10 N de precarga y por lo tanto la carga aplicada por ciclo en el espécimen (incluyendo carga de contacto y carga de aplicación) es ligeramente menor al valor determinado para cada mezcla. En promedio se aplicó un 49,5 % de la resistencia del ensayo SCB.

En el Cuadro 4-62 se muestran los resultados del ensayo RSCB. Se muestra el número de ciclos máximo (Nmax) obtenido en cada mezcla y el número de ciclos del criterio de falla adicional propuesto (N(adicional)).

Cuadro 4-62. Resultados del ensayo RSCB

Mezcla	Carga RSCB - 50% de carga SCB	Carga promedio aplicada (N)	Porcentaje de la resistencia SCB aplicada	Nmax		N(adicional)	
				Promedio	C.V.	Promedio	C.V.
9,5 CT	1328,37	1312,50	49,40	544	30,20	389	32,54
9,5 SBS	1543,21	1527,67	49,50	354	12,71	268	11,85
9,5 SBS+MB	1525,60	1512,54	49,57	422	23,98	314	25,66
9,5 SBS+CAL	1526,14	1512,57	49,56	496	17,81	350	19,81
12,5 CT	866,27	852,64	49,21	615	40,77	453	48,94
12,5 SBS	1170,38	1157,64	49,46	664	36,13	488	33,22
12,5 SBS+MB	1291,43	1277,43	49,46	510	16,01	374	17,60
12,5 SBS+CAL	1245,76	1232,89	49,48	748	3,14	578	7,37

Los C.V. del número de ciclos máximo se encuentran en un rango de valores entre 3% y 41%. Los C.V. del número de ciclos del criterio de análisis adicional se encuentran en un rango entre 7 % y 49% y tienden a ser mayores a los del parámetro Nmax en la mayoría de mezclas, no obstante, las diferencias son pequeñas.

El análisis estadístico del número de ciclos máximo (Nmax) muestra probabilidades menores a 0,05 únicamente al utilizar el tamaño máximo nominal del agregado como variable respuesta (ver Cuadro 4-63). La cantidad de ciclos necesarios para ocasionar la falla es menor para mezclas de 9,5 mm TMN.

Cuadro 4-63. Análisis estadístico utilizando el parámetro Nmax como variable respuesta (RSCB)

Origen de la Variación	Grados de libertad	Probabilidad
TMN	1	0,008
Tipo de mezcla	3	0,261
TMN*Tipo de mezcla	3	0,422

La mezcla 12,5 SBS+CAL fue la que resistió mayor cantidad de ciclos (ver Cuadro 4-64). La mezcla 9,5 SBS fue la menos resistente a la fatiga de acuerdo con los resultados del ensayo RSCB. La mezcla 12,5 CT se encuentra entre las menos susceptibles al daño por fatiga.



*Cuadro 4-64. Clasificación de mezclas de acuerdo con el parámetro Nmax (RSCB)*

<b>TMN</b>	<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Nmax</b>
12,5	SBS+CAL	748
12,5	SBS	664
12,5	CT	615
9,5	CT	544
12,5	SBS+MB	510
9,5	SBS+CAL	496
9,5	SBS+MB	422
9,5	SBS	354

El análisis estadístico para el número de ciclos del criterio de falla adicional propuesto es muy similar al realizado para el parámetro Nmax. Únicamente se encuentran diferencias significativas entre las medias de las mezclas al variar el tamaño máximo nominal del agregado (ver Cuadro 4-65). El número de ciclos aumenta para las MAC de 12,5 mm de tamaño máximo nominal del agregado.

*Cuadro 4-65. Análisis estadístico utilizando el parámetro N(adicional) como variable respuesta (RSCB)*

<b>Origen de la Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Probabilidad</b>
TMN	1	0,009
Tipo de mezcla	3	0,327
TMN*Tipo de mezcla	3	0,433

En el Cuadro 4-66 se muestran los resultados para el parámetro N(adicional) ordenados de mayor a menor resistencia a la fatiga. El acomodo encontrado es igual al encontrado para el número de ciclos máximo del ensayo RSCB.

*Cuadro 4-66. Clasificación de mezclas de acuerdo con el parámetro N(adicional) (RSCB)*

<b>TMN</b>	<b>Tipo de mezcla</b>	<b>N(adicional)</b>
12,5	SBS+CAL	578
12,5	SBS	488
12,5	CT	453
9,5	CT	389
12,5	SBS+MB	374
9,5	SBS+CAL	350
9,5	SBS+MB	314
9,5	SBS	268

La Figura 4-16 muestra un gráfico con los resultados de fatiga del ensayo RSCB. Se pueden notar las diferencias entre criterios de análisis. Los intervalos de las barras de error son calculados con la variación individual presentada por tipo de mezcla.

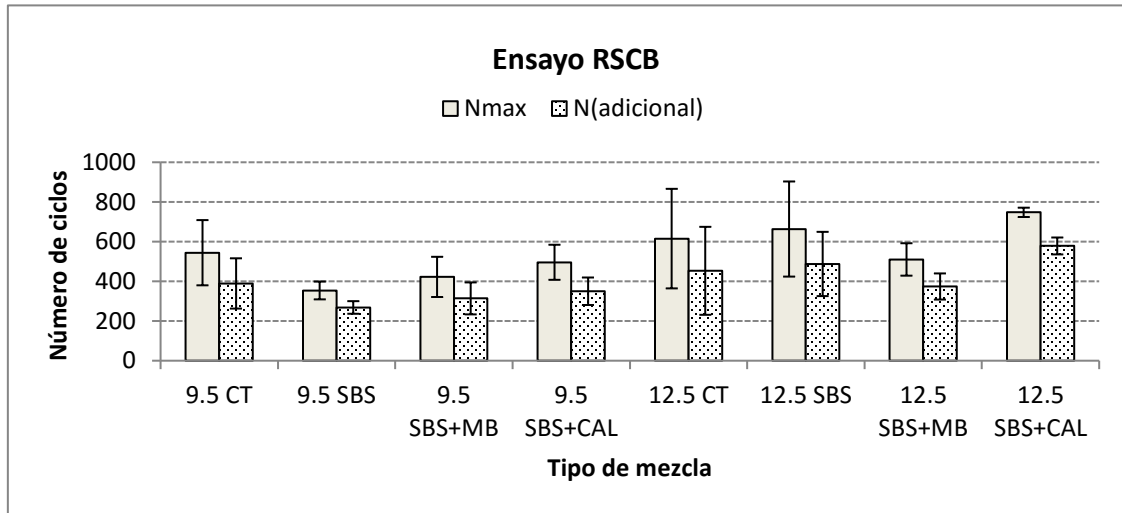


Figura 4-16. Resultados de fatiga del ensayo RSCB

En el Cuadro 4-67 y Figura 4-17 se muestra la categorización realizada para cada parámetro de los ensayos. Para los resultados de carga máxima el menor orden es asignado a la menor carga, pues menores cargas representan mezclas menos rígidas. A mayor energía de fractura mejor es el comportamiento a fatiga, por lo tanto, el orden menor es asignado a la mayor energía de fractura encontrada. Para el número de ciclos, el menor orden corresponde a la mayor vida a fatiga.

Cuadro 4-67. Ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (RSCB y SCB)

Mezcla	Ensayo SCB				Ensayo RSCB			
	R(SCB)		Gc		Nmax		N(adicional)	
	Promedio	Orden	Promedio	Orden	Promedio	Orden	Promedio	Orden
12,5 SBS+CAL	2,492	3	3,261	8	748	1	578	1
12,5 SBS	2,341	2	4,697	3	664	2	488	2
12,5 CT	1,733	1	4,996	1	615	3	453	3
9,5 CT	2,657	5	4,786	2	544	4	389	4
12,5 SBS+MB	2,583	4	3,968	6	510	5	374	5
9,5 SBS+CAL	3,052	7	4,694	4	496	6	350	6
9,5 SBS+MB	3,051	6	3,915	7	422	7	314	7
9,5 SBS	3,086	8	4,430	5	354	8	268	8

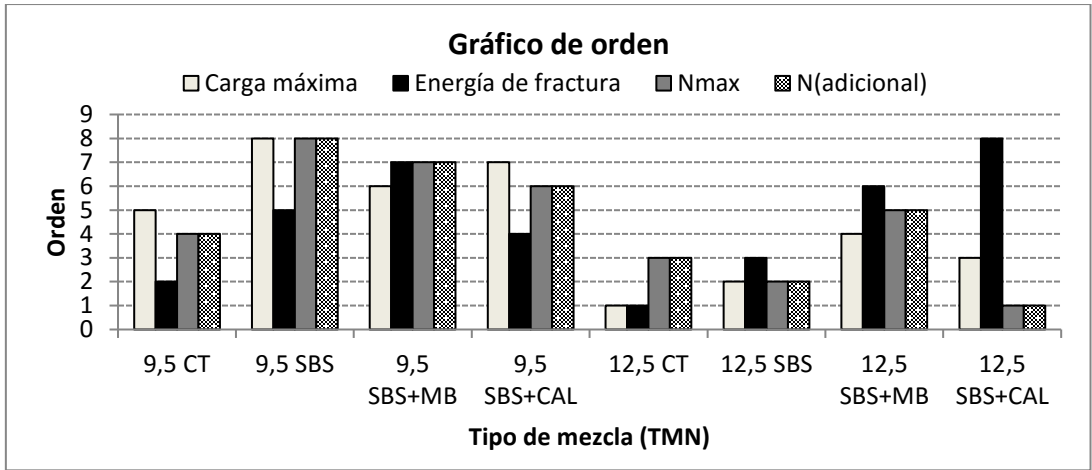


Figura 4-17. Gráfico del ranking de los resultados de ensayo según su resistencia a la fatiga (RSCB y SCB)

Es importante recordar que la carga máxima es insuficiente para evaluar la resistencia a la fractura de mezclas asfálticas.

Como se mencionó anteriormente el número de ciclos Nmax y N(adicional) presentan el mismo *ranking*, por lo que independientemente del criterio de falla utilizado la predicción del comportamiento a fatiga es igual.

El Cuadro 4-68 muestra las diferencias entre el orden de los distintos resultados. Entre menores sean las diferencias más correlación hay entre los resultados, pues más similares son los *rankings*. Se aceptan diferencias pequeñas de una o dos unidades debido a la similitud entre las medias de las mezclas y la variabilidad de los ensayos.

Cuadro 4-68. Diferencias de orden obtenidas para los resultados de ensayo (RSCB y SCB)

Mezcla	Resistencia SCB - Energía de fractura	Resistencia SBS - Nmax	Energía de fractura - Nmax	Nmax - N(adicional)
12,5 SBS+CAL	5	2	7	0
12,5 SBS	1	0	1	0
12,5 CT	0	2	2	0
9,5 CT	3	1	2	0
12,5 SBS+MB	2	1	1	0
9,5 SBS+CAL	3	1	2	0
9,5 SBS+MB	1	1	0	0
9,5 SBS	3	0	3	0

No se encuentra ninguna tendencia o relación entre la resistencia del ensayo SCB y la energía de fractura. Con respecto a la resistencia del ensayo SCB y el número de ciclos, se puede notar que las diferencias en las clasificaciones son bajas. Se determina que entre menores sean las

cargas máximas obtenidas en el ensayo SCB mayor cantidad de ciclos de carga deben aplicarse para producir la falla.

Una mayor energía de fractura genera una mayor vida de fatiga en la mayoría de casos. Los *rankings* entre la energía y el número de ciclos no son iguales casi en ningún caso, pero se presentan diferencias relativamente bajas en 6 de las 8 MAC. Únicamente las mezclas 12,5 SBS+CAL y 9,5 SBS presentan diferencias amplias en el comportamiento, pues las diferencias de orden son mayores a 2 unidades.

#### **4.5 Comparación de resultados entre ensayos**

En todos los ensayos se tiene un parámetro que se puede relacionar con la rigidez de la mezcla (carga o rigidez) y parámetros de fatiga (número de ciclos) que varían de acuerdo con el criterio de análisis de cada prueba. Los resultados para los ensayos de vigas a flexión en 4 puntos para las diferentes deformaciones se analizan por separado. Únicamente se presentan los resultados del grupo 2 de ensayos *Overlay*.

No se sabe con certeza cuál es la mezcla más o menos susceptible al deterioro por fatiga antes del análisis de resultados. En base a los contenidos de asfalto es posible esperar que la mezcla 12,5 CT sea una de las más flexibles y por lo tanto poco susceptible a la fatiga. Se puede esperar que la mezcla 12,5 SBS+MB sea una de las más rígidas y con menos vida de fatiga. No necesariamente dichas mezclas son las que presentan mejor o peor comportamiento.

Se tienen asfaltos y mezclas modificadas, por lo que no necesariamente el contenido de asfalto es el único parámetro de influencia en la resistencia a la fatiga. Los aditivos se utilizan para mejorar el comportamiento de una MAC ante una determinada característica. En el caso de análisis no se sabe a cabalidad si los aditivos y modificantes en las proporciones usadas afectan positiva o negativamente el comportamiento a la fatiga.

Para la comparación de los resultados de los ensayos se utilizan los *rankings* obtenidos según la resistencia a la fatiga en cada ensayo. Cuando el orden obtenido para dos o más ensayos es el mismo, ambos ensayos predicen el comportamiento para la variable de igual manera.

En general, se asume que diferencias de una unidad e inclusive dos unidades en los *rankings* no son tan significativas, debido a la similitud de las medias de los resultados entre algunas de las mezclas y a los coeficientes de variación. En ocasiones una diferencia de 3 unidades podría no ser significativa (en los análisis estadísticos hay grupos hasta de 7 elementos y en ocasiones

no hay diferencias estadísticas entre las medias de las mezclas). Para efectos de comparación se asume que una diferencia superior a 2 unidades en varias mezclas es indicativo de diferencias entre los resultados de los ensayos.

#### **4.5.1 Comparación de resultados de carga y rigidez**

Una mayor carga obtenida en los ensayos SCB y *Overlay* es relacionada con una mayor rigidez. Los resultados obtenidos para todos los ensayos se muestran en el Cuadro 4-69.

*Cuadro 4-69. Resultados de carga máxima y rigidez de los ensayos*

Mezcla	Ensayo <i>Overlay</i>	Ensayo SCB	Ensayo de vigas (400 $\mu$ s)	Ensayo de vigas (600 $\mu$ s)
	Carga máxima (kN)		Rigidez Inicial (MPa)	
9,5 CT	2,70	2,66	5048,12	4920,41
9,5 SBS	3,05	3,09	5718,77	5516,04
9,5 SBS+MB	3,04	3,05	5600,61	5286,03
9,5 SBS+CAL	2,71	3,05	5411,06	4389,53
12,5 CT	2,30	1,73	3938,31	3632,71
12,5 SBS	2,90	2,34	4624,61	4532,50
12,5 SBS+MB	2,63	2,58	4759,76	4538,19
12,5 SBS+CAL	2,70	2,49	4663,85	4822,55

Los rangos de los coeficientes de variación obtenidos en los diferentes ensayos para los resultados anteriores se muestran en el Cuadro 4-70. La variabilidad para la carga máxima y la Rigidez Inicial obtenida en las diferentes pruebas es muy similar. De los valores del Cuadro 4-69 es posible notar que en un mismo ensayo hay mezclas con medias muy similares, lo cual aunado con los C.V. genera que en algunas mezclas no haya diferencias estadísticas.

*Cuadro 4-70. Rangos de los coeficientes de variación de la carga máxima y rigidez de los ensayos*

C.V.	Ensayo <i>Overlay</i>	Ensayo SCB	Ensayo de vigas (400 $\mu$ s)	Ensayo de vigas (600 $\mu$ s)
	Carga máxima (kN)		Rigidez Inicial (MPa)	
Mínimo	1,52	0,75	2,26	2,07
Máximo	8,58	11,40	10,47	11,89

El Cuadro 4-71 presenta un resumen de los principales resultados obtenidos en los análisis estadísticos realizados para los factores TMN y Tipo de mezcla individualmente.

Cuadro 4-71. Resumen de los análisis estadísticos realizados usando la carga o rigidez como variable respuesta y las variables explicativas TMN y Tipo de mezcla

Variable predictora	Parámetro de comparación	Carga máxima		Rigidez Inicial	
		Overlay	SCB	Vigas a flexión	
				400 $\mu$ s	600 $\mu$ s
TMN	¿D,E,?*	Sí	Sí	Sí	Sí
	Aumento en el TMN	Menor carga	Menor carga	Menor Rigidez Inicial	Menor Rigidez Inicial
Tipo de Mezcla	¿D,E,?	Sí	Sí	Sí	Sí
	Grupos de Tukey	3	2	2	2
	Mayor promedio	SBS	SBS+MB	SBS+MB	SBS
	Menor promedio	CT	CT	CT	CT
	Grupo con mayor promedio**	(2) SBS y SBS+MB	(3) SBS+MB, SBS+CAL, SBS	(3) SBS+MB, SBS, SBS+CAL	(3) SBS+MB, SBS+CAL, SBS
	Grupo con menor promedio**	(2) CT y SBS+CAL	(1) CT	(1) CT	(2) CT y SBS+CAL

\*¿D,E,?: ¿Genera diferencias estadísticas?

\*\*Para los grupos con mayor y menor promedio el número entre paréntesis representa la cantidad de elementos del grupo.

El tamaño máximo nominal del agregado afecta los resultados de la carga y rigidez en todos los casos. El comportamiento encontrado es el mismo, un aumento en el TMN genera una disminución de la carga o rigidez medida.

El Tipo de mezcla es una variable con influencia en las medias de la carga y rigidez de los diferentes ensayos, pues en todos los ensayos se obtuvo una probabilidad menor a 0,05 en el análisis ANOVA.

Los resultados para el factor Tipo de mezcla son muy semejantes en todas las pruebas. Las mezclas de control (CT) son las menos rígidas y presentan las menores cargas y rigideces. Las agrupaciones realizadas mediante el método de Tukey presentan igual número de elementos en la mayoría de casos. Según los promedios, se obtienen dos Tipos de mezclas clasificadas como las más rígidas en los diferentes ensayos, la SBS+MB y la SBS. Las medias de dichas mezclas son iguales estadísticamente y presentan valores muy similares.

El Cuadro 4-72 muestra la comparación de resultados obtenidos para el análisis estadístico realizado para la combinación de los factores TMN y Tipo de mezcla. Como se mencionó anteriormente, en los casos donde el análisis ANOVA brinda probabilidades mayores a 0,05 no hay diferencias significativas entre las medias de las poblaciones. Si el análisis estadístico muestra valores menores a 0,05, pero se generan diferentes agrupaciones con el método de

Tukey, significa que las diferencias en los grupos son generadas por la variación de los factores individualmente y no por la combinación de los mismos.

*Cuadro 4-72. Resumen de los análisis estadísticos realizados usando la carga o rigidez como variable respuesta y la combinación de variables explicativas (Tipo de Mezcla (TMN))*

Combinación de Variables predictoras	Parámetro de comparación	Carga máxima		Rigidez Inicial	
		Overlay	SCB	Vigas a flexión	
				400 $\mu$ s	600 $\mu$ s
Tipo de Mezcla (TMN)	¿Genera diferencias estadísticas?	No	No	No	Sí
	Cantidad de grupos de Tukey	3	2	4	3
	Mezcla con mayor promedio	9,5 SBS	9,5 SBS	9,5 SBS	9,5 SBS
	Mezcla con menor promedio	12,5 CT	12,5 CT	12,5 CT	12,5 CT
	Número de mezclas del grupo con mayor promedio	6	7	4	3
	Número de mezclas del grupo con menor promedio	4	3	4	2

Únicamente en el ensayo de vigas a flexión con una deformación de 400  $\mu$ s se encuentran diferencias significativas debido a la combinación de factores. En todos los casos la mezcla 9,5 SBS es la mezcla más rígida o con mayor carga y la mezcla 12,5 CT es la menos rígida.

En los análisis con el método de Tukey hay variabilidad entre la cantidad de grupos generados en los ensayos y los elementos de los grupos con menor y mayor promedio. Como se puede notar en la mayoría de pruebas, hay más de tres mezclas por grupo de Tukey, por lo que las diferencias en las medias de varias mezclas son pocas.

El análisis comparativo de los ensayos se realiza por medio de los valores de los *rankings*. Las mezclas con menores cargas o rigideces presentan los menores valores de orden. El Cuadro 4-73 muestra el orden obtenido para cada mezcla según el tipo de ensayo.

*Cuadro 4-73. Ranking de los resultados de carga y rigidez de los ensayos*

Mezcla	Orden de los resultados de carga y rigidez de los ensayos			
	Ensayo <i>Overlay</i> - Carga máxima	Ensayo SCB - Carga máxima	Ensayo de vigas (400 $\mu$ s) - Rigidez Inicial	Ensayo de vigas (600 $\mu$ s) - Rigidez Inicial
9,5 CT	4	5	5	6
9,5 SBS	8	8	8	8
9,5 SBS+MB	7	6	7	7
9,5 SBS+CAL	5	7	6	2
12,5 CT	1	1	1	1
12,5 SBS	6	2	2	3
12,5 SBS+MB	2	4	4	4
12,5 SBS+CAL	3	3	3	5

En el análisis se supone que las mezclas con mal comportamiento a la fatiga poseen rigideces altas o cargas elevadas. Todos los ensayos clasifican la peor (9,5 SBS) y mejor (12,5 CT) MAC de igual manera, no obstante, en las mezclas intermedias existen diferencias de clasificación. La mezcla 12,5 CT con alto contenido de asfalto resultó ser la más flexible. La mezcla 12,5 SBS+ MB con bajo contenido de asfalto no resultó ser la más rígida, por lo que la influencia del TMN, los aditivos y modificantes puede ser más importante en el comportamiento de fatiga que el contenido de asfalto.

Las diferencias de orden se pueden ver claramente en la Figura 4-18. La mezcla 9,5 SBS+CAL presenta diferencias considerables de orden en el ensayo de vigas para la deformación de 600  $\mu$ s. Dicha mezcla tuvo influencia del contenido de vacíos en los resultados del ensayo mencionado. La mezcla 12,5 SBS presenta variación significativa para la clasificación del ensayo *Overlay* con respecto a los demás.

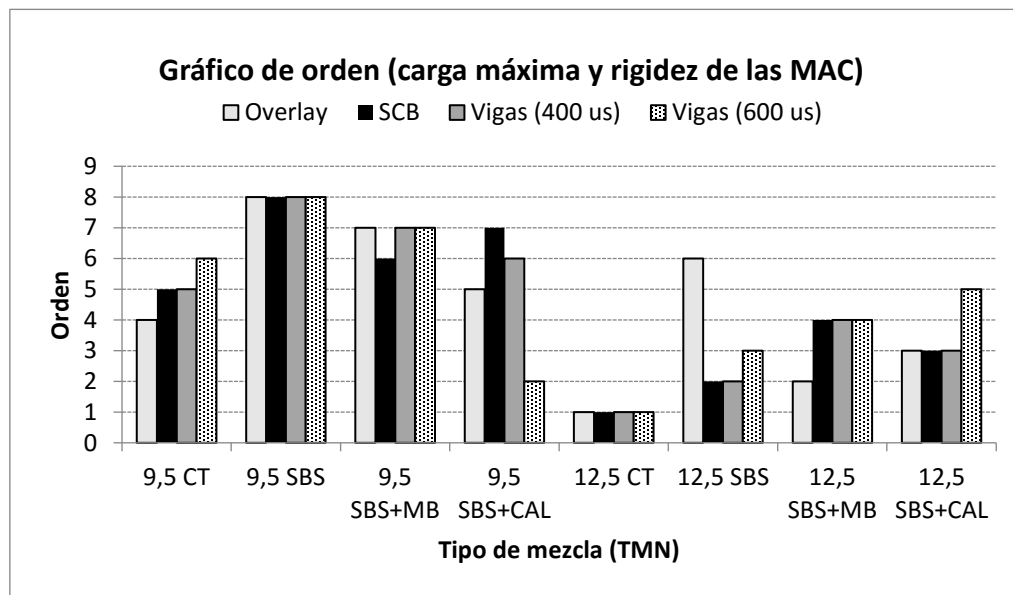


Figura 4-18. Gráfico del ranking de los resultados de carga máxima y rigidez de los ensayos

En general, el comportamiento de la rigidez y la carga es muy similar y con poca variabilidad en todos los ensayos. Las clasificaciones obtenidas para las mezclas son semejantes, por lo que para dichos parámetros todos los ensayos resultan adecuados. Es importante recalcar el hecho de que todas las pruebas resultaron susceptibles al TMN y al Tipo de mezclas para los resultados de carga y rigidez.



#### 4.5.2 Comparación de resultados de fatiga

Los resultados de evaluación de fatiga para todos los ensayos se muestran en el Cuadro 4-74. Se agrega la energía de fractura ( $G_c$ ) determinada como el área bajo la curva de carga-deformación obtenida en el ensayo SCB. Nótese que en algunos casos los promedios obtenidos para dos o más tipos de mezclas son muy similares, lo que quiere decir que dichas mezclas no tienen un comportamiento distinto a la fatiga.

Para cada ensayo de fatiga se utilizaron dos criterios de evaluación de falla. No se encontró relación entre el número de ciclos de los dos criterios analizados por ensayo, es decir, no se encontró un factor constante que relacione el número de ciclos de ambos criterios. Tampoco se obtuvo un factor de relación constante entre los resultados de los diferentes ensayos.

Cuadro 4-74. Resultados de fatiga de los ensayos

Mezcla	Ensayo <i>Overlay</i>		Ensayo RSCB		Ensayo de vigas (400 $\mu$ s)		Ensayo de vigas (600 $\mu$ s)		Ensayo SCB
	Nmax	N(NLC)	Nmax	N(ad.)	N(50% RI)	N(RB)*	N(50% RI)	N(RB)*	Gc
9,5 CT	698	389	544	389	321843	325566	43237	71036	4,79
9,5 SBS	301	129	354	268	417257	431288	32953	47551	4,43
9,5 SBS+MB	244	133	422	314	874737	1001388	49970	93919	3,91
9,5 SBS+CAL	366	260	496	350	414597	438157	34720	70925	4,69
12,5 CT	2012	1792	615	453	509780	548053	46273	80871	5,00
12,5 SBS	413	297	664	488	511340	546091	37397	95796	4,70
12,5 SBS+MB	534	152	510	374	237387	287898	25687	50076	3,97
12,5 SBS+CAL	719	544	748	578	269287	306758	24603	37025	3,26

\*N(RB): N(Rowe y Bouldin)

En relación con la carga máxima y la rigidez inicial determinados para cada ensayo, únicamente se encontraron concordancias con la vida de fatiga para los ensayos *Overlay* y RSCB. Para dichos ensayos una mayor carga género en la mayoría de casos una menor vida de fatiga.

Los rangos de coeficientes de variación son elevados en todos los casos (ver Cuadro 4-75). El ensayo SCB presenta la variabilidad más baja y el rango más distinto con respecto a los demás ensayos. Los C.V. tan altos encontrados para el parámetro Nmax en el ensayo *Overlay* (mezcla 12,5 SBS+MB, C.V.=93,75 %) y el parámetro N(RB) del ensayo de vigas a flexión con deformación controlada de 600  $\mu$ s (mezcla 12,5 SBS, C.V.=95,52 %) son valores que distan del comportamiento normal de las otras mezclas.

Cuadro 4-75. Rangos de los coeficientes de variación de los resultados de fatiga de los ensayos

C.V. (%)	Ensayo <i>Overlay</i>		Ensayo RSCB		Ensayo de vigas (400 $\mu$ s)		Ensayo de vigas (600 $\mu$ s)		Ensayo SCB
	Nmax	N(NLC)	Nmax	N(ad.)	N(50% RI)	N(RB)	N(50% RI)	N(RB)	Gc
Mínimo	13,20	23,31	3,14	7,37	15,46	14,11	7,15	28,32	2,18
Máximo	93,75	67,06	40,77	48,94	65,61	66,18	54,85	95,52	31,90

\*N(RB): N(Rowe y Bouldin)

El ensayo RSCB fue el ensayo de fatiga con menor variabilidad, aunque los C.V. continúan siendo elevados en algunos casos. La variabilidad del ensayo *Overlay* y el ensayo de vigas a flexión es relativamente similar. Si se analizan puntualmente los coeficientes de variación por mezcla mostrados en el análisis individual de los ensayos, es posible notar que los ensayos de vigas a flexión y el *Overlay* presentan en la mayoría de casos C.V. cercanos a 50 % o menores, salvo pocas excepciones. El ensayo RSCB presenta C.V. cercanos a 30 % o menores en la mayoría de casos.

En el Cuadro 4-76 se muestra un resumen de los análisis estadísticos realizados para las variables predictoras TMN y Tipo de mezcla individualmente. La variabilidad tan elevada obtenida, aunada con la similitud en los promedios de los resultados de algunas mezclas genera que estadísticamente sea difícil encontrar diferencias estadísticas.

Cuadro 4-76. Resumen de los análisis estadísticos realizados usando los resultados de fatiga como variable respuesta y las variables explicativas TMN y Tipo de mezcla

Variable predictorora	Parámetro de comparación	Número de ciclos				Gc
		<i>Overlay</i>	RSCB	Vigas a flexión		SCB
				400 $\mu$ s	600 $\mu$ s	
TMN	¿D,E,?*	Sí	Sí	No	No	No
	Aumento en el TMN	Aumento	Aumento	-	-	-
Tipo de Mezcla	¿D,E,?*	Sí	No	No	No	No
	Grupos de Tukey	2	1	1	1	1
	Mayor promedio	CT	SBS+CAL	SBS+MB	CT	CT
	Menor promedio	SBS	SBS+MB	SBS+CAL	SBS+CAL	SBS+MB
	Grupo con mayor promedio**	(1) CT	-	-	-	-
	Grupo con menor promedio**	(3) SBS+MB, SBS+CAL, SBS	-	-	-	-

\*¿D,E,?: ¿Genera diferencias estadísticas?

\*\*Para los grupos con mayor y menor promedio el número entre paréntesis representa la cantidad de elementos del grupo.

Únicamente los ensayos *Overlay* y RSCB son sensibles o presentan diferencias estadísticas con respecto al TMN. En dichos ensayos un mayor tamaño máximo nominal del agregado generó un aumento en la vida de fatiga. Para la rigidez y carga máxima un aumento en el TMN correspondía a menores valores de carga y rigidez. Mezclas más flexibles poseen por lo general mejor comportamiento a la fatiga, por lo que los resultados de los ensayos *Overlay* y RSCB son adecuados.

Con respecto a la variable predictora Tipo de mezcla, el ensayo *Overlay* es el único que presenta sensibilidad. De acuerdo con los resultados de carga máxima y rigidez, se podría esperar que la mezcla de control (CT) tenga el mejor comportamiento a la fatiga y las mezclas SBS y SBS+MB el peor, no obstante, solo los ensayos SCB y *Overlay* presentan resultados acordes con el comportamiento de la carga y la rigidez.

No se presenta distinción entre los resultados de los dos criterios de falla analizados por ensayo, porque los resultados estadísticos obtenidos para ambos criterios fueron los mismos.

Al realizar un análisis estadístico para la combinación de variables predictoras (TMN y Tipo de mezcla) solo el ensayo *Overlay* y el de vigas a flexión para una deformación controlada de 400  $\mu$ s presentan diferencias estadísticas entre los promedios para el número de ciclos. El resumen de los análisis estadísticos para la combinación de factores se presenta en el Cuadro 4-77.

*Cuadro 4-77. Resumen de los análisis estadísticos realizados usando los resultados de fatiga como variable respuesta y la combinación de variables explicativas (Tipo de Mezcla (TMN))*

Comb. de variables predictoras	Parámetro de comparación	Número de ciclos				Gc
		Overlay	RSCB	Vigas a flexión		SCB
				400 $\mu$ s	600 $\mu$ s	
Tipo de Mezcla (TMN)	¿D,E,?*	Sí	No	Sí	No	No
	Cantidad de grupos de Tukey	2	1	2	1	1
	Mezcla con mayor promedio	12,5 CT	12,5 SBS+CAL	9,5 SBS+MB	9,5 SBS+MB (1) - 12,5 SBS (2)**	12,5 CT
	Mezcla con menor promedio	9,5 SBS+MB (Nmax) -9,5 SBS (N(NLC))	9,5 SBS	12,5 SBS+MB	12,5 SBS+CAL	12,5 SBS+CAL
	Mezclas del grupo con mayor promedio	1	-	5(1) - 6 (2)**	-	-
	Mezclas del grupo con menor promedio	7	-	7	-	-

\*¿D,E,?: ¿Genera diferencias estadísticas?

\*\* En el ensayo de vigas a flexión se presentaron diferencias entre los resultados estadísticos de los dos criterios de análisis. (1) corresponde al resultado para el análisis con N(50% RI) y (2) corresponde al resultado para el análisis con N(Rowe y Bouldin).

En el ensayo *Overlay* se encuentra que la mezcla 12,5 CT es la más resistente a la fatiga y posee diferencias estadísticas con respecto a todas las demás mezclas. Para el ensayo de vigas a flexión con deformación controlada de 400  $\mu$ s se obtienen dos agrupaciones de Tukey, ambas con gran cantidad de elementos, por lo que muchas mezclas son iguales estadísticamente. Se podría esperar que las mezclas 9,5 SBS y 9,5 SBS+CAL sean las que presenten menores números de ciclos debido a su rigidez, solo en el ensayo RSCB y *Overlay* dichas mezclas son las que poseen el menor promedio.

El Cuadro 4-78 muestra los *rankings* obtenidos para cada MAC, según los parámetros de evaluación de fatiga de los ensayos. El menor orden corresponde a las MAC más resistentes a la fatiga. No todos los ensayos predicen de igual manera el comportamiento a la fatiga, es decir, no se tienen *rankings* similares entre todos los ensayos para todas las MAC.

Cuadro 4-78. Ranking de los resultados de fatiga de los ensayos

Mezcla	Orden - Ensayo <i>Overlay</i>		Orden - Ensayo RSCB		Orden - Ensayo de vigas (400 $\mu$ s)		Orden - Ensayo de vigas (600 $\mu$ s)		Ensayo SCB
	Nmax	N(NLC)	Nmax	N(ad.)	N(50% RI)	N(RB)*	N(50% RI)	N(RB)*	Gc
9.5 CT	3	3	4	4	6	6	3	4	2
9.5 SBS	7	8	8	8	4	5	6	7	5
9.5 SBS+MB	8	7	7	7	1	1	1	2	7
9.5 SBS+CAL	6	5	6	6	5	4	5	5	4
12.5 CT	1	1	3	3	3	2	2	3	1
12.5 SBS	5	4	2	2	2	3	4	1	3
12.5 SBS+MB	4	6	5	5	8	8	7	6	6
12.5 SBS+CAL	2	2	1	1	7	7	8	8	8

\*N(RB): N(Rowe y Bouldin)

La Figura 4-19 muestra esquemáticamente los *rankings* encontrados por mezcla. Para cada ensayo se utilizó un color de barra diferente y para cada criterio de evaluación de fatiga de cada ensayo se utilizó una barra con degradado y otra sin degradado. La Figura 4-19 se presenta para recalcar el hecho de que no todos los ensayos evalúan la susceptibilidad a la fatiga de igual manera. Si todos los ensayos evaluaran de igual forma el comportamiento a la fatiga las barras del gráfico para una misma mezcla no tendrían tanta variación.

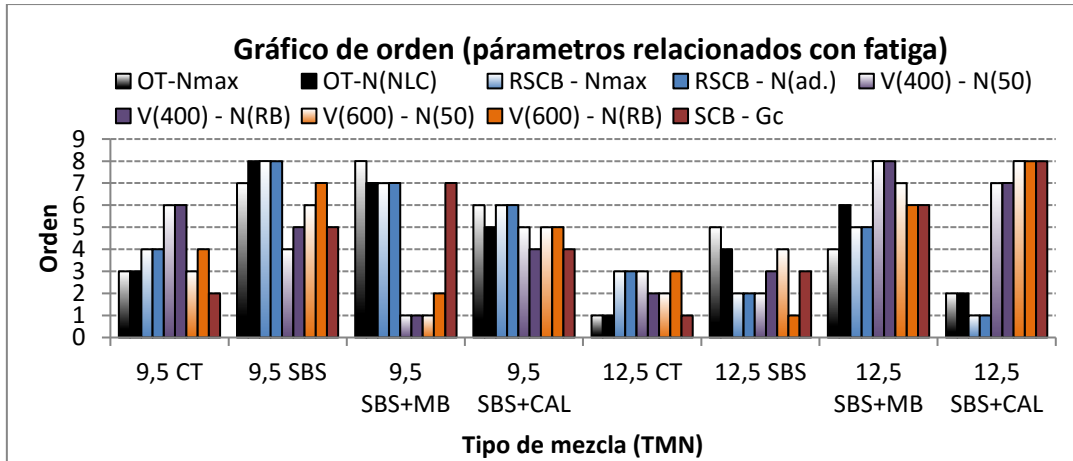


Figura 4-19. Gráfico del ranking de los resultados de fatiga de los ensayos

Las mezclas 12,5 CT y 9,5 SBS+CAL son la únicas que poseen un comportamiento relativamente similar en todos los ensayos, independientemente del criterio de análisis, pues en todos los casos presentan un ranking que no difiere de 2 unidades entre ensayos y criterios.

En ningún caso se encontró diferencia significativa entre la clasificación de mezclas para los dos criterios de análisis evaluados en cada ensayo de fatiga. En cualquier ensayo es posible aplicar cualquiera de los criterios de análisis presentados, cuando se requiera realizar únicamente una clasificación de las mezclas.

En el Cuadro 4-79 se muestran las diferencias de orden entre criterios para cada ensayo. Únicamente la mezcla 12,5 SBS+MB para el ensayo de vigas a flexión con deformación controlada de 600  $\mu$ s presenta una diferencia superior a 2 al comparar los métodos de evaluación de fatiga. En casi todos los demás casos las diferencias son 0 o 1.

Cuadro 4-79. Diferencias de orden entre criterios de falla de los ensayos

Mezcla	Ensayo <i>Overlay</i> (Nmax - N(NCL))	Ensayo RSCB (Nmax - N(ad.))	Ensayo de vigas a Flexión	
			400 $\mu$ s (N(50% RI) - N(RB))	600 $\mu$ s (N(50% RI) - N(RB))
9,5 CT	0	0	0	1
9,5 SBS	1	0	1	1
9,5 SBS+MB	1	0	0	1
9,5 SBS+CAL	1	0	1	0
12,5 CT	0	0	1	1
12,5 SBS	1	0	1	3
12,5 SBS+MB	2	0	0	1
12,5 SBS+CAL	0	0	0	0

La energía de fractura presenta similitud en la clasificación para algunas mezclas con respecto a todos los ensayos, no obstante, siempre hay una o dos mezclas en las que el comportamiento difiere considerablemente. En la mezcla 9,5 SBS+MB presenta un comportamiento similar al de los ensayos *Overlay* y RSCB, pero diferente al de vigas. En la mezcla 12,5 SBS+CAL presenta un comportamiento similar al de los ensayos de vigas, pero diferente al de las pruebas *Overlay* y RSCB.

Las mezclas 12,5 SBS+CAL y 9,5 SBS+MB presentan comportamientos totalmente opuestos entre los ensayos de vigas a flexión y los ensayos *Overlay* y RSCB. En el ensayo de vigas la mezcla 9,5 SBS+MB es una de la mejor clasificada (orden 1 y 2) y en los ensayos *Overlay* y RSCB es una de las que presenta peores comportamientos ante la fatiga (orden 7 y 8). Para la mezcla 12,5 SBS+CAL los ensayos *Overlay* y RSCB presentan bajos *rankings* (1 y 2) y el ensayo de vigas a ambas deformaciones presentan valores de orden altos (7 y 8).

Los ensayos *Overlay* y RSCB presentan resultados muy similares. Las diferencias en las clasificaciones no son significativas para ambos ensayos, independientemente del criterio de análisis.

La Figura 4-20 muestra un gráfico comparativo del orden de los ensayos *Overlay*, RSCB y SCB. El *ranking* entre los ensayos *Overlay* y RSCB difiere en 3 unidades en la mezcla de 12,5 SBS para el parámetro  $N_{max}$  del ensayo *Overlay*, en los demás casos las diferencias son menores a 3. La energía de fractura presenta un comportamiento similar a los de los ensayos *Overlay* y RSCB en todas las MAC, excepto en las mezclas 9,5 SBS (diferencia de orden de 3 unidades) y 12,5 SBS+CAL (diferencia de orden de 7 y 8).

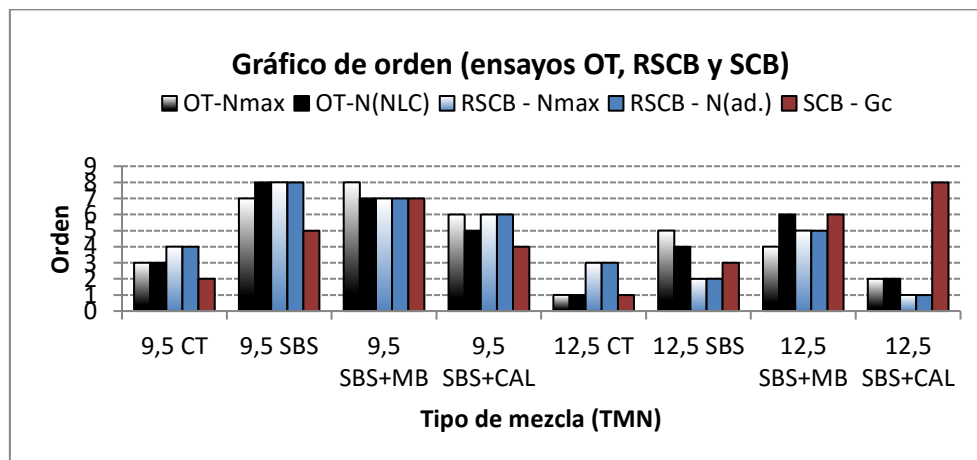


Figura 4-20. Gráfico del ranking de los ensayos *Overlay*, RSCB y SCB

Se espera que las clasificaciones de MAC en el ensayo de vigas a ambas deformaciones sean similares, no obstante, se presentan diferencias iguales a 3 unidades en algunos casos (9,5 CT, 9,5 SBS y 12,5 SBS). Se analizan ambos criterios de falla del ensayo.

La Figura 4-21 presenta esquemáticamente las diferencias entre ensayos de vigas a diferentes deformaciones, además de los resultados de la energía de fractura. La energía de fractura presenta diferencia superiores a 2 unidades únicamente en la mezcla 9,5 SBS+MB (diferencia de orden de 6) para ambos ensayos de vigas y para la mezcla 9,5 CT (diferencia de orden de 4) con respecto al ensayo de vigas a flexión en 4 puntos para la deformación de 400  $\mu$ s.

La mezcla 9,5 SBS+CAL que presentó una gran variabilidad en el contenido de aire promedio y en la Rigidez Inicial promedio de los especímenes para ambas deformaciones no tuvo variaciones considerables en la clasificación de acuerdo a la vida de fatiga.

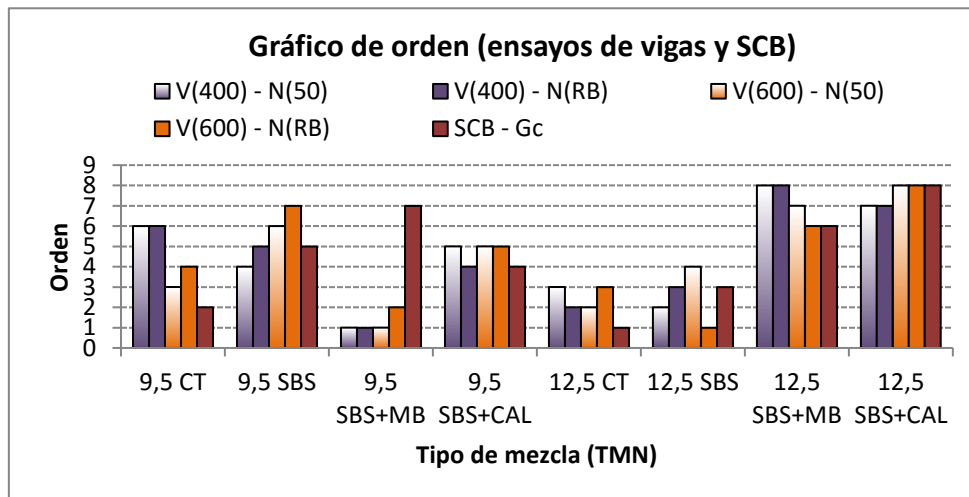


Figura 4-21. Gráfico del ranking de los ensayos de vigas a flexión y SCB

Se presentan mayores variaciones entre los ensayos *Overlay* y RSCB, con respecto al ensayo de vigas a deformación controlada de 400  $\mu$ s que con respecto al ensayo de vigas a flexión con deformación controlada de 600  $\mu$ s.

Entre el ensayo *Overlay* y el ensayo de vigas a deformación de 400  $\mu$ s se presentan diferencias de *ranking* iguales o superiores a 3 unidades en 6 mezclas (máxima diferencia de orden de 7 unidades). Con respecto al ensayo de vigas a deformación controlada de 600  $\mu$ s se presentan diferencias mayores a 2 en 4 mezclas (máxima diferencia de orden de 7 unidades).

El ensayo RSCB posee diferencias de *ranking* iguales o superiores a 3 unidades con respecto al ensayo de vigas a deformación de 400  $\mu$ s en 4 mezclas (máxima diferencia de orden de 6 unidades). Con respecto al ensayo de vigas a deformación controlada de 600  $\mu$ s se presentan diferencias mayores a 2 únicamente en 2 mezclas (máxima diferencia de orden de 7 unidades).

En los casos donde se encuentran diferencias de orden mayores a 4 unidades, aunque sea solo en una mezcla, se establece que la predicción de la susceptibilidad a la fatiga no es semejante.

Se determina que los resultados de los ensayos *Overlay* y RSCB son comparables y similares, es decir, que ambas pruebas realizan una clasificación del comportamiento a la fatiga semejante. Para el ensayo de vigas a flexión en 4 puntos a diferentes deformaciones también se puede decir que la predicción del daño por fatiga es equivalente, pero en algunos casos los resultados podrían ser diferentes. En ningún otro caso se obtienen resultados equivalentes.

Es difícil establecer o definir cuales ensayos predicen de mejor manera el comportamiento a la fatiga, pues no se tiene datos adicionales que permitan realizar otros tipos de análisis. Únicamente se tienen los resultados de laboratorio presentados hasta el momento. Ninguna mezcla ha sido evaluada en campo.

Con respecto a las mezclas que poseen mayor variabilidad en los rankings 9,5 SBS+MB y 12,5 SBS+CAL se puede notar que ambas poseen el mismo contenido de asfalto (6,3 %) y se ubican entre las 3 mezclas con menor cantidad de ligante asfáltico.

Con respecto al polímero SBS, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, mejora la flexibilidad del ligante a bajas temperaturas. La mayoría de mezclas poseen dicho modificante, por lo que no se espera que genere una afectación considerable en la clasificación de las mezclas modificadas. La cal podría ser un agente que rigidice la mezcla y por lo tanto empeore su comportamiento a la fatiga, sin embargo, si no se adiciona más de la concentración crítica de cal podría ser que la afectación no sea significativa. No se tienen estudios que indiquen si el porcentaje de cal agregado sobrepasa la concentración crítica.

De los resultados obtenidos para la carga máxima y rigidez, se puede notar que la mezcla 12,5 SBS+CAL es una de las más flexibles. En este caso probablemente el TMN tuvo mayor influencia en el comportamiento de la MAC. La mezcla 9,5 SBS+MB por su parte, es una de las más rígidas. Las mezclas de mayor granulometría son menos rígidas.



Se espera que la mezcla 9,5 SBS+MB posea un comportamiento relativamente malo a la fatiga, pues posee un bajo contenido de asfalto (en comparación con las demás mezclas) y una rigidez alta. La mezcla 12,5 SBS+CAL podría tener un comportamiento relativamente adecuado a la fatiga, pues aunque posee un contenido de asfalto bajo, es una de las mezclas menos rígidas. Pese a que se realiza el análisis anterior, no necesariamente el comportamiento de las mezclas es el mencionado, sin embargo, no se tiene ninguna otra información que permita realizar más conclusiones.

Teniendo en cuenta el análisis mencionado, es posible mencionar que los ensayos *Overlay* y RSCB realizan una predicción más acertada del comportamiento a la fatiga que los ensayos de vigas. Para las mezclas 9,5 SBS+MB y 12,5 SBS+CAL logran predecir un *ranking* más acorde a lo esperado.

Aunque casi todos los ensayos poseen *rankings* diferentes, la mezcla 12,5 CT en todos los casos es clasificada como una de las mejores y la mezcla 9,5 SBS como una de las que poseen peor comportamiento al daño por fatiga. Estos resultados concuerdan con los obtenidos para la carga máxima y rigidez. Si se realiza un promedio de los *rankings* de todos los ensayos y criterios de los parámetros de evaluación de fatiga se obtienen los resultados del Cuadro 4-80. El menor promedio lo posee la mezcla 12,5 CT y el mayor la mezcla 9,5 SBS.

*Cuadro 4-80. Promedio de orden de las MAC para todos los ensayos*

<b>MAC</b>	<b>Promedio de orden de todos los ensayos</b>
12,5 CT	2,11
12,5 SBS	2,89
9,5 CT	3,89
9,5 SBS+MB	4,56
12,5 SBS+CAL	4,89
9,5 SBS+CAL	5,11
12,5 SBS+MB	6,11
9,5 SBS	6,44

El ensayo RSCB presenta tiempos de prueba considerablemente menores con respecto a los demás ensayos (ver Cuadro 4-81). En dicho ensayo se obtuvieron duraciones menores a 13 minutos en todos los casos, independientemente del criterio de falla utilizado. Duraciones menores de ensayo no necesariamente son buenas, pues en ocasiones se podrían generar muy pocos datos de análisis con los cuales no se logre diferenciar correctamente entre el comportamiento de las MAC.

Cuadro 4-81. Tiempos de ensayo (minutos) requeridos para la obtención de los resultados de los ensayos

Mezcla	Ensayo Overlay		Ensayo RSCB		Ensayo de vigas (400 $\mu$ s)		Ensayo de vigas (600 $\mu$ s)	
	Nmax	N(NLC)	Nmax	N(ad.)	N(50% RI)	N(Rowe y Bouldin)	N(50% RI)	N(Rowe y Bouldin)
9,5 CT	116	65	9	6	536	543	72	118
9,5 SBS	50	22	6	4	695	719	55	79
9,5 SBS+MB	41	22	7	5	1458	1669	83	157
9,5 SBS+CAL	61	43	8	6	691	730	58	118
12,5 CT	335	299	10	8	850	913	77	135
12,5 SBS	69	50	11	8	852	910	62	160
12,5 SBS+MB	89	25	9	6	396	480	43	83
12,5 SBS+CAL	120	91	12	10	449	511	41	62
Máximo	335	299	12	10	1458	1669	83	160
Mínimo	41	22	6	4	396	480	41	62
Promedio	110	77	9	7	741	809	61	114
%mayor*	20,1	17,9	0,7	0,6	87,4	100,0	5,0	9,6
%promedio**	13,6	9,5	1,1	0,8	91,5	100,0	7,6	14,1

\*%mayor: representa el valor porcentual de la duración de tiempo mayor de cada ensayo con respecto a la duración mayor de tiempo obtenida para el criterio de Rowe y Bouldin en el ensayo de vigas a flexión con deformación controlada de 400  $\mu$ s (mayor tiempo presentado en todos los ensayos).

\*\*%promedio: valor porcentual entre la duración promedio de cada ensayo y la duración obtenida para el criterio de Rowe y Bouldin en el ensayo de vigas a flexión con deformación controlada de 400  $\mu$ s (mayor promedio).

El ensayo que presenta las mayores duraciones es el de vigas a flexión con una deformación controlada de 400  $\mu$ s. Se obtuvieron duraciones promedio de 741 minutos (12,3 horas) y 809 minutos (13,5 horas) para los criterios de la norma AASHTO T321 y Rowe y Bouldin respectivamente. Dichos tiempos son poco prácticos para laboratorios que no sean de investigación. Las duraciones se deben al lento deterioro que sufren los especímenes debido a la baja deformación aplicada.

El ensayo de vigas con deformación controlada de 600  $\mu$ s presenta duraciones mucho más bajas con respecto al de 400  $\mu$ s (en promedio entre 61 minutos y 114 minutos para los criterios de la norma AASHTO T321 y Rowe y Bouldin respectivamente), de aproximadamente un 14,1 % con respecto al promedio obtenido en el ensayo de vigas a deformación de 400  $\mu$ s.

El ensayo *Overlay* presenta duraciones semejantes a las del de vigas a flexión con deformación controlada de 600  $\mu$ s. En promedio entre 110 minutos y 77 minutos para los criterios de la norma Tex-248-F y NLC respectivamente.

El proceso de envejecimiento en horno a largo plazo disminuye considerablemente la vida de fatiga de los especímenes, aunque no se sabe la magnitud específica de la reducción. Como datos de comparación se presentan los resultados del grupo 1 de ensayos *Overlay*, en los cuales no se obtuvo la falla de los especímenes en ningún caso aun cuando se incrementó el número de ciclos por encima del especificado por la norma. En todos los casos se aplicaron al menos 1200 ciclos (200 minutos) que equivalen casi al doble de la duración promedio de los especímenes envejecidos. También se aplicó, en algunos especímenes del grupo 1 de ensayos *Overlay*, hasta 1800 ciclos (300 minutos) y no se alcanzó la falla.

En mezclas fabricadas en laboratorio y sin procesos de envejecimiento las duraciones de los ensayos *Overlay* y vigas a flexión en 4 puntos (independientemente de la deformación 400  $\mu$ s o 600  $\mu$ s) podrían ser excesivas dependiendo de las propiedades de las mezclas.

La norma del ensayo *Overlay* especifica que la prueba se debe detener si se aplican de 1000 ciclos de carga y no se ha alcanzado la falla. En dicho caso el ensayo no es adecuado para clasificar MAC como las del presente documento si no se realiza el procedimiento de envejecimiento.

El ensayo RSCB se proyecta como un ensayo adecuado a aplicar aun cuando los especímenes no estén envejecidos. Si el tiempo de ensayo aumenta 5 veces al utilizar especímenes sin envejecer, el tiempo promedio del ensayo RSCB sería menor a una hora y continuaría siendo una duración relativamente adecuada de prueba.

#### **4.6 Modelos de predicción**

Se realizan modelos de predicción del número de ciclos entre ensayos. Las relaciones se obtienen al realizar regresiones múltiples tomando en cuenta distintas variables o parámetros de los ensayos. Para obtener las variables significativas se realizan regresiones escalonadas (*stepwise*).

La regresión escalonada realiza un proceso en el cual se agregan automatizadamente las variables de mayor influencia y se eliminan las que no son de utilidad en el modelo, de acuerdo con el nivel de significancia establecido. Se establece un nivel de significancia  $\alpha = 0,15$  en la generación de las regresiones.

En todos los casos se utilizan modelos que dependen del número de ciclos de otro ensayo. Cuando se utiliza el número de ciclos como variable predictora se permiten probabilidades

mayores al nivel de significancia establecido. Es posible generar modelos con un mejor ajuste (coeficientes de determinación mayores) al agregar variables que el procedimiento de regresión escalonada descarta. Dichos modelos no son tomados en cuenta debido a que las variables agregadas no presentan valores de probabilidad adecuados.

Para realizar los análisis se utilizan los siguientes parámetros o variables predictoras:

- $N$  = Número de ciclos (2 criterios por ensayo)
- $GP$  = Parámetro granulométrico,  $GP = \frac{P_{NMS} - P_{PCS}}{P_{200}}$ 
  - $P_{NMS}$  = Porcentaje de agregado pasando la malla del tamaño máximo nominal
  - $P_{PCS}$  = Porcentaje de agregado pasando la malla de control primario
  - $P_{200}$  = Porcentaje de agregado pasando la malla No. 200
- $\varepsilon$  = deformación unitaria, mm/mm
- $VP$  = Parámetro volumétrico (Porcentaje de vacíos de aire en los Vacíos del Agregado Mineral),  $VP = \frac{AV}{AV + V_b}$ 
  - $AV$  = Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla, %
  - $V_b$  = Contenido de asfalto en volumen,  $V_b = \frac{G_{mb} * P_{ac}}{G_b}$
  - $G_{mb}$  = Gravedad específica bruta de la mezcla
  - $P_{ac}$  = Porcentaje de asfalto por peso total de la mezcla, %
  - $G_b$  = Gravedad específica bruta del asfalto
- Carga Máxima (Ensayos Overlay y SCB)
- $G_c$  = Energía de fractura determinada según las condiciones de ensayo (Área bajo la curva carga deformación)

Las regresiones se realizaron en escala logarítmica, para facilitar los ajustes. El parámetro  $VP$  se obtiene para los datos de los ensayos que se usan para predecir el comportamiento (*Overlay* y RSCB). Se usan los valores promedio de los tres especímenes por ensayo.

De acuerdo con la investigación realizada por Parker (2010), algunos autores han indicado que no es recomendable obtener relaciones entre la energía de fractura y la vida de fatiga por medio de ecuaciones lineales o similares, pues pueden generar una relación errónea. En los casos donde la energía de fractura (variable predictora) fue significativa en la regresión, se realizaron modelos con y sin dicho parámetro.

#### 4.6.1 Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos

Se realizan varios modelos para la predicción de la vida a fatiga obtenida en el ensayo de vigas a flexión en 4 puntos. Para cada ensayo se evaluaron 2 criterios de evaluación de la vida a la fatiga, se realiza una regresión para cada combinación posible de los criterios.

El Cuadro 4-82 muestra un resumen de los modelos encontrados para la predicción de la vida de fatiga del ensayo de vigas a flexión a partir de los resultados de los ensayos *Overlay* (OT) y RSCB. El Cuadro 4-83 muestra un resumen de las variables consideradas en los modelos, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y los cuadrados del residual ( $MS_{Res}$ ). Los valores del  $R^2$  y  $R^2_{aj}$  son elevados en todos los casos, lo que es indicativo de que un alto porcentaje de la variación obtenida en la vida de fatiga del ensayo de vigas es explicada por las ecuaciones.

Cuadro 4-82. Modelos obtenidos para a predicción de la vida de fatiga del ensayo de vigas a flexión

Ensayo	Ec.	Modelo ajustado
OT	38	$N(50\% RI) = 1,585^{-17} \varepsilon^{-6,02} Nmax_{OT}^{-0,291} VP_{OT}^{-5,68}$
	39	$N(50\% RI) = 1,585^{-18} \varepsilon^{-6,02} N(NLC)_{OT}^{-0,319} VP_{OT}^{-7,70}$
	40	$N(RB) = 1,259^{-21} \varepsilon^{-4,76} N(NLC)_{OT}^{-0,516} VP_{OT}^{-10} GP^{6,44}$
	41	$N(RB) = 3,162^{-13} \varepsilon^{-4,76} Nmax_{OT}^{-0,331} VP_{OT}^{-5,98}$
RSCB	42	$N(50\% RI) = 1,995^{-14} \varepsilon^{-6,02} Nmax_{RSCB}^{-0,403}$
	43	$N(50\% RI) = 1,585^{-14} \varepsilon^{-6,02} N(adicional)_{RSCB}^{-0,417}$
	44	$N(RB) = 2,138^{-10} \varepsilon^{-4,76} N(adicional)_{RSCB}^{-0,325}$
	45	$N(RB) = 1,862^{-10} \varepsilon^{-4,76} Nmax_{RSCB}^{-0,289}$

Cuadro 4-83. Resumen de parámetros de los modelos de predicción para el ensayo de vigas a flexión

Ensayo	Ec.	Variable repuesta	Variables predictoras	$R^2$ (%)	$R^2_{aj}$ (%)	$MS_{res}$
OT	38	N(50 % RI)	$\varepsilon, Nmax_{OT}, VP_{OT}$	97,8	97,2	0,0089
	39	N(50 % RI)	$\varepsilon, N(NLC)_{OT}, VP_{OT}$	98,4	98,0	0,0064
	40	N(RB)	$\varepsilon, N(NLC)_{OT}, VP_{OT}, GP$	97,7	96,8	0,0068
	41	N(RB)	$\varepsilon, Nmax_{OT}, VP_{OT}$	95,6	94,5	0,0116
RSCB	42	N(50 % RI)	$\varepsilon, Nmax_{RSCB}$	93,9	93,0	0,0224
	43	N(50 % RI)	$\varepsilon, N(adicional)_{RSCB}$	94,0	93,1	0,0222
	44	N(RB)	$\varepsilon, N(adicional)_{RSCB}$	88,7	86,9	0,0277
	45	N(RB)	$\varepsilon, Nmax_{RSCB}$	88,6	86,8	0,0280

Los ajustes obtenidos presentan una mejor correlación para los parámetros del ensayo *Overlay*. Normalmente la adición de variables genera un incremento en los valores de los coeficientes de determinación. En todas las regresiones las variables predictoras incluidas son significativas según el nivel de significancia establecido, por lo que las regresiones obtenidas son adecuadas.

La Figura 4-22 y la Figura 4-23 muestran los estimados de los modelos desarrollados para cada criterio de falla del ensayo de vigas, graficados contra los valores medidos en laboratorio. Se puede notar que las ecuaciones encontradas para el ensayo *Overlay* predicen de mejor forma los datos. Se presentan los  $R^2$  de las líneas de ajuste de cada ecuación.

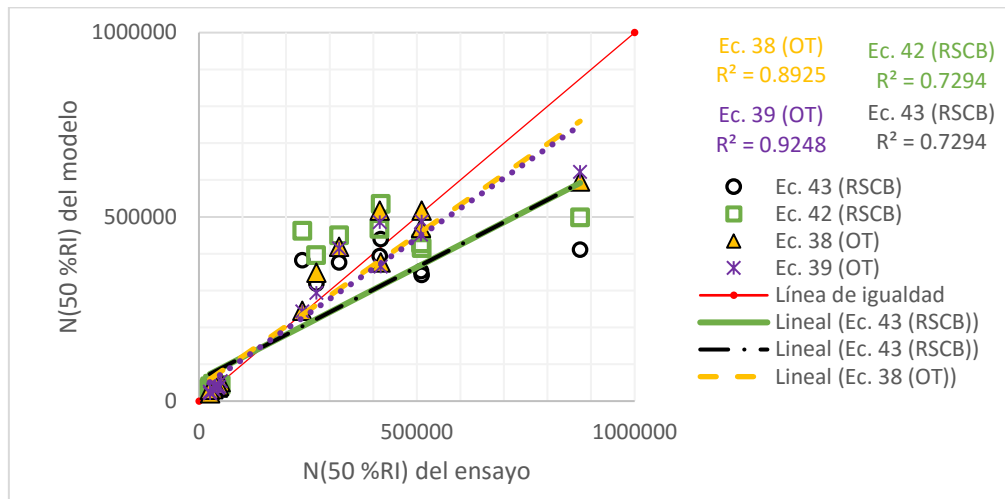


Figura 4-22. Comparación del  $N(50\% RI)$  calculado y  $N(50\% RI)$  medido en el ensayo

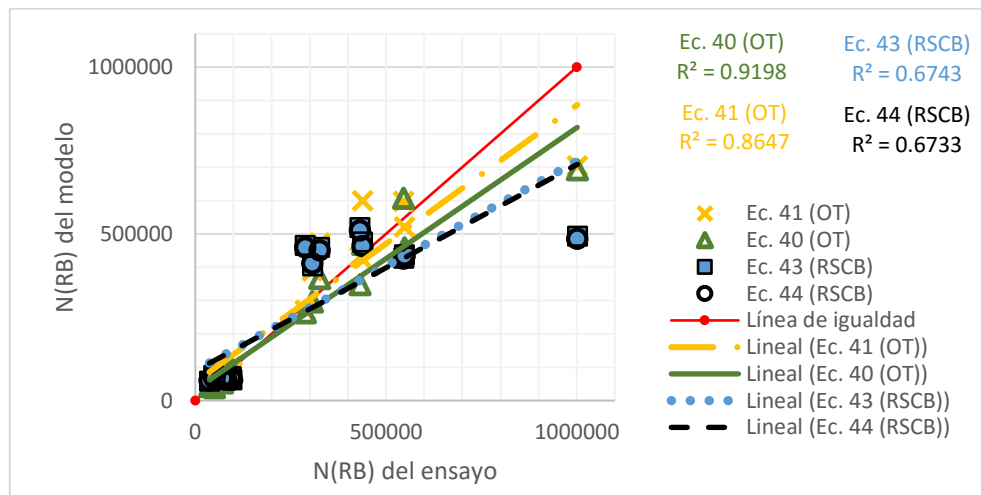


Figura 4-23. Comparación del  $N(RB)$  calculado y  $N(RB)$  medido en el ensayo

Es posible notar que hay un resultado que presenta un comportamiento inadecuado en todos los modelos, correspondiente al mayor del ensayo de vigas (Mezcla 9,5 SBS+MB (400  $\mu$ s)). Si se eliminan los datos estimados para la mezcla 9,5 SBS+MB (400  $\mu$ s) el comportamiento predicho es el mostrado en la Figura 4-24 y Figura 4-25. La línea de ajuste es similar en todos los casos y semejante a la línea de igualdad.

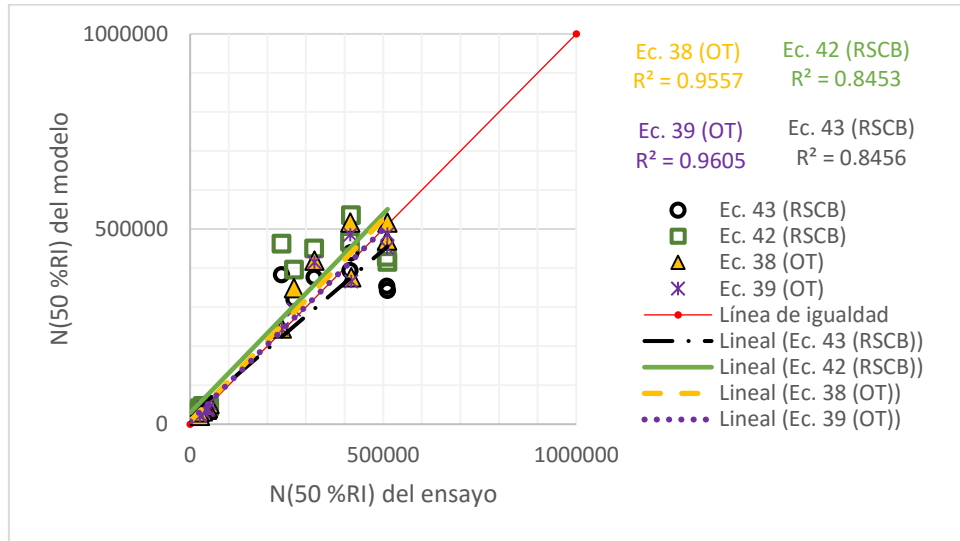


Figura 4-24. Comparación del  $N(50\% \text{ RI})$  calculado y  $N(50\% \text{ RI})$  medido en el ensayo (excluyendo la mezcla 9,5 SBS+MB (400  $\mu$ s))

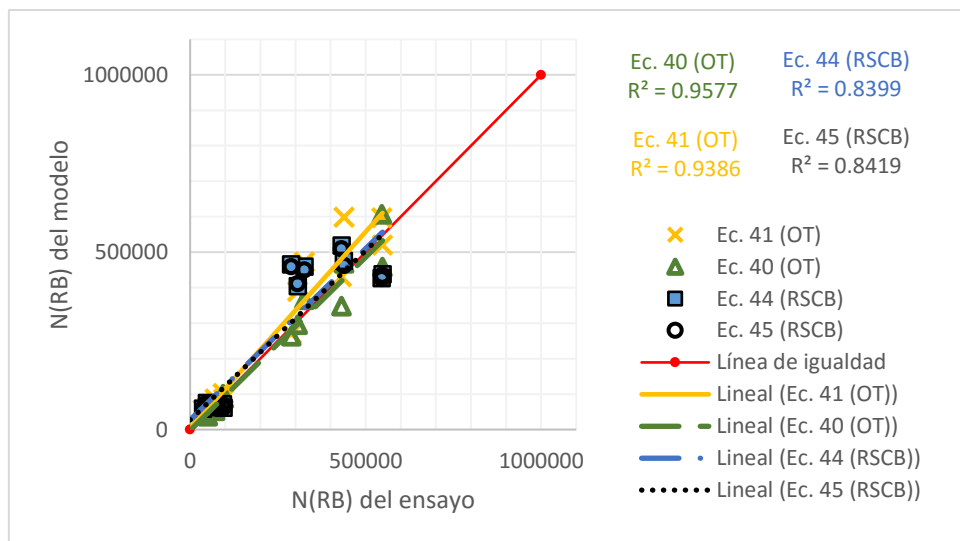


Figura 4-25. Comparación del  $N(\text{RB})$  calculado y  $N(\text{RB})$  medido en el ensayo (excluyendo la mezcla 9,5 SBS+MB (400  $\mu$ s))

#### 4.6.2 Ensayo Overlay

Se realizan modelos para la predicción de la vida a fatiga obtenida en el ensayo *Overlay* a partir del ensayo RSCB. El Cuadro 4-84 muestra un resumen de los modelos encontrados. El Cuadro 4-85 muestra un resumen de las variables consideradas en los modelos, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y los cuadrados del residual ( $MS_{Res}$ ). Los valores del  $R^2$  y  $R^2_{aj}$  son elevados en todos los casos, lo que es indicativo de que un alto porcentaje de la variación obtenida en la vida de fatiga del ensayo *Overlay* es explicada por las ecuaciones.

Para el criterio NLC la energía de fractura resultó ser significativa, por lo que se realizan 4 modelos (2 incluyendo la energía de fractura como variable predictora y 2 sin incluirla).

Cuadro 4-84. Modelos obtenidos para a predicción de la vida de fatiga del ensayo *Overlay*

Ec.	Modelo ajustado
46	$Nmax_{OT} = 1,995^{13} Nmax_{RSCB}^{0,482} Carga_{SCB}^{-3,56} GP^{-9,88}$
47	$Nmax_{OT} = 7,943^{13} N(adicional)_{RSCB}^{0,501} Carga_{SCB}^{-3,58} GP^{-10,4}$
48	$N(NLC) = 1,995^{20} N(adicional)_{RSCB}^{1,48} Carga_{SCB}^{-4,08} GP^{-21,3} VP_{RSCB}^{-4,88}$
49	$N(NLC) = 2,512^{27} N(adicional)_{RSCB}^{0,918} Carga_{SCB}^{-5,09} GP^{-26,2} VP_{RSCB}^{-6,82} Gc^{-1,67}$
50	$N(NLC) = 1,585^{18} Nmax_{RSCB}^{1,33} Carga_{SCB}^{-4,03} GP^{-19,1} VP_{RSCB}^{-4,79}$
51	$N(NLC) = 3,981^{27} Nmax_{RSCB}^{0,856} Carga_{SCB}^{-5,18} GP^{-26,1} VP_{RSCB}^{-6,83} Gc^{-1,86}$

Cuadro 4-85. Resumen de parámetros de los modelos de predicción para el ensayo *Overlay*

Ec.	Variable repuesta	Variables predictoras	$R^2$ (%)	$R^2_{aj}$ (%)	$MS_{res}$
46	$Nmax_{OT}$	$Nmax_{RSCB}, Carga_{SCB}, GP$	84,9	81,1	0,01457
47	$Nmax_{OT}$	$N(adicional)_{RSCB}, Carga_{SCB}, GP$	84,9	81,2	0,01452
48	$N(NLC)$	$N(adicional)_{RSCB}, Carga_{SCB}, GP, VP_{RSCB}$	96,4	95,0	0,0063
49	$N(NLC)$	$N(adicional)_{RSCB}, Carga_{SCB}, GP, VP_{RSCB}, Gc$	99,1	98,6	0,00192
50	$N(NLC)$	$Nmax_{RSCB}, Carga_{SCB}, GP, VP_{RSCB}$	95,3	93,5	0,00887
51	$N(NLC)$	$Nmax_{RSCB}, Carga_{SCB}, GP, VP_{RSCB}, Gc$	99,0	98,5	0,00201

La Figura 4-26 y la Figura 4-27 muestran los estimados de los modelos desarrollados para cada criterio de falla del ensayo *Overlay*, graficados contra los valores medidos en el laboratorio. Se debe tener en cuenta que el comportamiento de la mezcla 12,5 CT fue considerablemente diferente al de las demás. Dicha mezcla es la que posee los valores más lejanos de la línea de igualdad para las regresiones del número de ciclos obtenido con el criterio NLC.



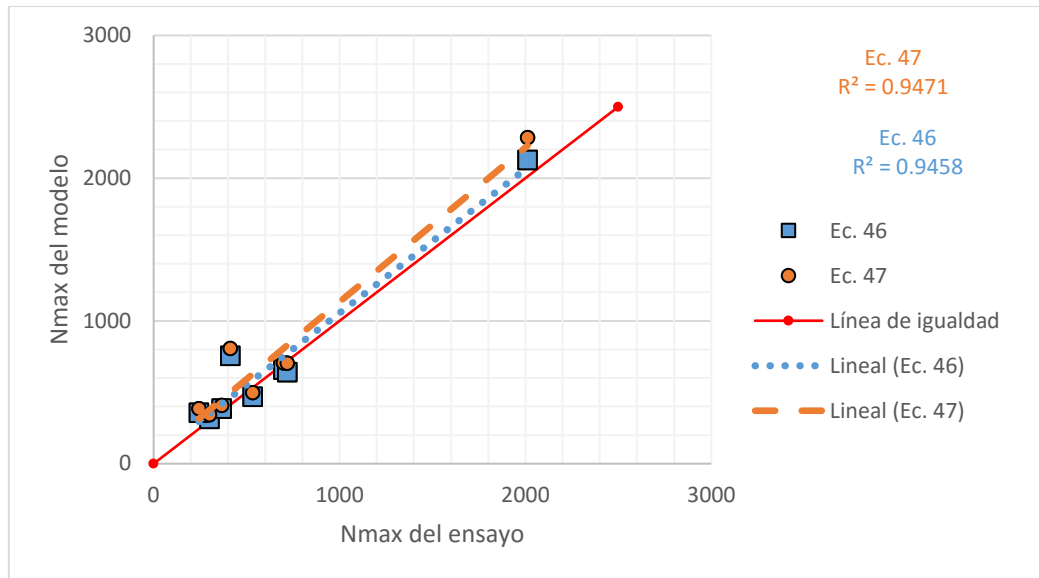


Figura 4-26. Comparación del  $N_{max_{OT}}$  calculado y  $N_{max_{OT}}$  medido en el ensayo

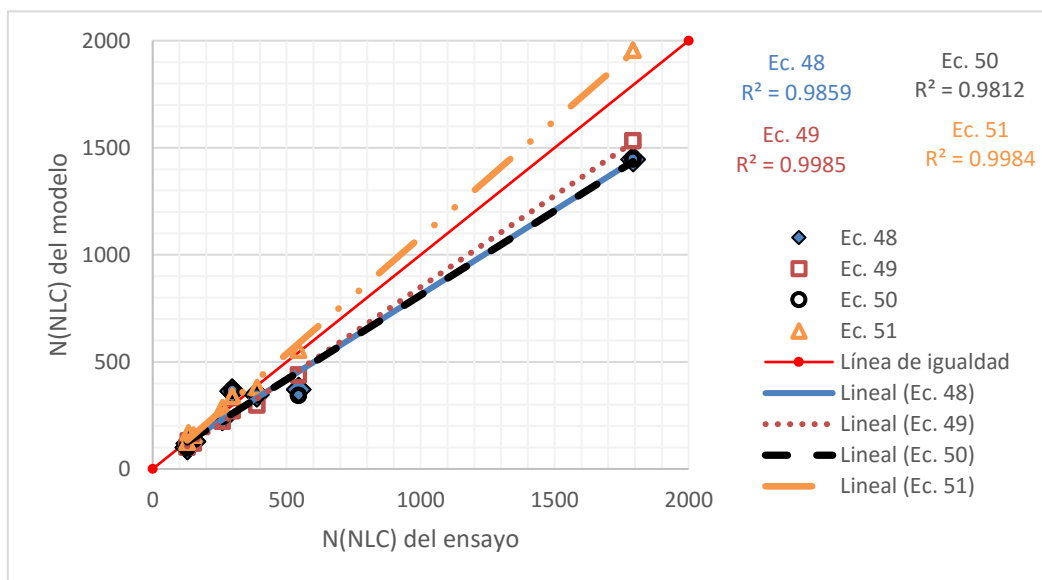


Figura 4-27. Comparación del  $N(NLC)$  calculado y  $N(NLC)$  medido en el ensayo

### 4.6.3 Resumen

Las ecuaciones de las regresiones permiten obtener datos para generar modelos de predicción utilizando ensayos que requieren menor tiempo de ejecución y especímenes de menor tamaño. Es importante mencionar que entre mayor cantidad de datos se agreguen a la regresión la variabilidad de los modelos puede disminuir. Los variables independientes usadas en los

modelos son sencillas de calcular y dependen de datos que normalmente se tienen de los especímenes de laboratorio.

Todos los resultados utilizados fueron obtenidos en ensayos de laboratorio y deben calibrarse con datos de campo para implementarse. En general, todos los modelos realizados para los ensayos de vigas y *Overlay* presentan coeficientes de determinación elevados y constituyen una alternativa adecuada para estimar la vida de fatiga entre ensayos.

Se prefieren los modelos obtenidos para los parámetros  $N(RB)$ ,  $N(\text{adicional})$  y  $N(NLC)$ , pues como se mencionará posteriormente y de acuerdo con los análisis realizados hasta el momento, corresponden a criterios más adecuados de análisis. Se recomienda el uso de la ecuación 40 cuando se utilice el ensayo OT para predecir la vida a fatiga del ensayo de vigas, la ecuación 44 cuando se usen los resultados del ensayo RSCB para predecir el número de ciclos del ensayo de vigas y la ecuación 48 cuando se usen los parámetros del ensayo RSCB para obtener la falla del ensayo *Overlay*.

#### **4.7 Comparación de métodos de ensayo**

Para determinar la aplicabilidad de un determinado ensayo los resultados son el parámetro de mayor importancia, no obstante, realizar un análisis comparativo de los métodos de prueba permite notar ventajas y desventajas de los mismos. Este análisis permite tomar en cuenta aspectos como las características de los especímenes, la correspondencia con resultados de campo, el tiempo de ensayo, entre otros.

El Cuadro 4-86 presenta un análisis comparativo de algunos aspectos relevantes de los ensayos. La mayoría de los aspectos de los ensayos presentados en el Cuadro 4-86 fueron tomados a partir de la investigación bibliográfica realizada, especialmente de documento de Parker (2010), algunos otros son presentados de acuerdo a los resultados y metodologías aplicadas en el presente documento y criterio personal.

Cuadro 4-86. Comparación de métodos de ensayo

	<b>Ítem</b>	<b>OT</b>	<b>RSCB</b>	<b>Vigas</b>
<u>Normativa e investigación</u>	<i>¿Posee norma de ensayo?</i>	Si	No	Si
	<i>Investigación hasta el momento</i>	Amplia investigación en diversos documentos	Poca información de referencia. Poca investigación académica	Amplia investigación en diversos documentos
<u>Teoría del ensayo</u>	<i>Correlación con las condiciones y comportamiento de campo</i>	Alta	Alta	Alta
	<i>¿Criterios de falla válidos?</i>	Si	Si	Si
<u>Especímenes de ensayo y procedimiento de obtención</u>	<i>Variabilidad del porcentaje de vacíos de aire del procedimiento usado en la presente investigación</i>	Alta, pero respeta el rango de $7 \pm 1 \%$	Alta, no respeta el rango de $7 \pm 1 \%$ siempre	Moderada, respeta el rango de vacíos de $7 \pm 1 \%$
	<i>Simplicidad de fabricación de los especímenes</i>	Simple	Simple	Simple
	<i>Forma y tamaño</i>	Rectangular, pequeño	Semicircular, pequeño	Rectangular, grande
	<i>Peso del espécimen (kg)</i>	0,9-0,95	0,73-0,78	2,7-2,8
	<i>Especímenes con cortes o muescas</i>	No	Si	No
	<i>Equipo de compactación de especímenes en laboratorio</i>	Compactador superpave	Compactador superpave	Compactador de rodillo
<u>Exactitud del ensayo</u>	<i>Variabilidad (resultados)</i>	Alta-moderada	Baja-moderada	Alta-moderada
	<i>Potencial de repetitividad de los ensayos</i>	Moderada	Alta	Baja
	<i>Correlación con datos de campo</i>	Alta	Desconocida	Alta
<u>Especimen y configuración de la prueba</u>	<i>¿Requiere equipo especializado de laboratorio?</i>	Si, equipo específico de ensayo	No, máquina de carga sencilla	Si, Equipo de vigas
	<i>Equipo accesible para obtener en cualquier laboratorio privado</i>	No	Si	No
	<i>Los especímenes requieren preparación adicional al proceso de corte</i>	Pegar el espécimen a los moldes	No	No
	<i>Simplicidad de la configuración del ensayo y facilidad de aplicación</i>	Moderada	Simple	Moderada
<u>Duración de la prueba</u>	<i>Tiempo de ensayo (condiciones usadas en el presente documento)</i>	Moderado, menor a 2 horas en casi todos los casos	Bajo, menor a 15 min	Alto en deformaciones bajas
<u>Análisis de datos</u>	<i>Simplicidad del análisis de datos</i>	Simple	Simple	Simple
<u>Aplicación práctica</u>	<i>Potencial de uso para diseño de MAC</i>	Posee potencial	Alto potencial	Ampliamente utilizado
	<i>Práctico para usar en cualquier laboratorio (teniendo en cuenta equipo y repetitividad del ensayo)</i>	Poco práctico	Muy práctico	Poco Práctico
<u>Otros</u>	<i>Potencial para utilizar en especímenes de campo</i>	Alto	Alto	Bajo
	<i>Comparación de costos incluyendo tiempo y materiales</i>	Moderado	Moderado	Alto

Fuente: Parker, 2010

Modificado por: Autor

La simplicidad de los métodos de ensayo, incluyendo la preparación de los especímenes y la configuración general de la prueba son aspectos de gran importancia a considerar en el proceso de diseño. En el documento no solo se buscó realizar una comparación de las metodologías de ensayo existentes, sino buscar alternativas en las metodologías experimentales que faciliten el procedimiento de las pruebas.

Los ensayos *Overlay* y el de vigas a flexión poseen normas específicas de ensayo, no obstante, los criterios y parámetros de aplicación no generan siempre resultados adecuados. Para ambas pruebas existen diversos documentos investigativos de referencia para buscar alternativas evaluación y parámetros adicionales de ensayo. El ensayo RSCB no posee un procedimiento estándar de aplicación y la bibliografía existente encontrada fue muy poca, únicamente se encontró un documento de referencia.

El ensayo *Overlay*, utilizando el procedimiento especificado por la norma, no provocó la falla de los especímenes de las MAC evaluadas en el presente documento, por lo que se hizo necesario modificar la metodología de ensayo. Documentos como el de Walubita et al. (2012), Ma (2014) y Zhou & Scullion (2003), presentan evaluaciones y rangos de los parámetros de ensayo aplicables. Variar la abertura, frecuencia, temperatura, entre otros parámetros son posibilidades de modificación.

Para el procedimiento del ensayo RSCB únicamente se contó con el documento de Parker (2010) como referencia. Hay diversos estudios del ensayo SCB que evalúan diferentes condiciones de la prueba y sirven para definir la geometría del espécimen, temperatura y otros parámetros. Entre los documentos que se pueden destacar están el de Nsengiyumva (2015) y el de Tang (2014).

Todos los ensayos se basan en configuraciones que ocasionan el daño por fatiga al inducir esfuerzos de tensión en los especímenes, por lo que la correlación con las condiciones de campo es adecuada. Los criterios de falla son válidos, pues permiten realizar una evaluación de la vida a la fatiga de las MAC, no obstante, como se presentará más adelante y se ha mencionado anteriormente, no siempre los criterios son aplicables.

Con respecto a la elaboración de los especímenes, la norma AASHTO T321 no especifica el procedimiento de obtención detalladamente, sin embargo, los especímenes se confeccionan a partir de equipo específico para el ensayo (compactador de rodillo con hoja de acero).

La norma Tex-248-F especifica un procedimiento de obtención para los especímenes de ensayo, no obstante, se busca una alternativa adicional de confección para tratar de hacer el proceso más eficiente y disminuir el desperdicio de material. Para el ensayo RSCB también se propone una metodología de preparación de muestras de ensayo.

La metodología de confección utilizada en el ensayo *Overlay* aplica para especímenes de laboratorio. La variabilidad del porcentaje de vacíos de aire de los especímenes demostró ser relativamente alta, pero los valores se mantuvieron en el rango especificado por la norma en la mayoría de casos ( $7 \pm 1 \%$ ).

En el caso del ensayo RSCB la variabilidad del porcentaje de vacíos de aire de los especímenes no fue la adecuada, pues en muchos casos se obtuvieron contenidos de aire fuera del rango requerido ( $7 \pm 1 \%$ ). Aunque se logró obtener 3 especímenes para el ensayo RSCB que cumplen con el rango de porcentaje de vacíos de aire, los otros 3 especímenes que se utilizan para la obtención de la carga de aplicación del ensayo RSCB no siempre cumplieron dicho parámetro.

Para el ensayo RSCB se propone realizar 2 especímenes base (mismas dimensiones expuestas en la metodología) a partir de los cuales es posible obtener 12 especímenes de ensayo (6 por espécimen base) o 8 especímenes de ensayo (4 por espécimen base). En cualquier caso, se debe extraer o cortar los especímenes de ensayo de la parte más central del espécimen base. De todas las muestras de prueba elaboradas, se utilizan únicamente las 6 con el porcentaje de vacíos más cercano a 7 % (3 para el ensayo SCB y 3 para el ensayo RSCB). Una metodología similar se puede aplicar para el ensayo *Overlay*, en caso de que se quiera disminuir la variabilidad del contenido de aire.

La principal ventaja de los ensayos *Overlay* y RSCB, con respecto al de vigas, es la forma y tamaño de los especímenes. Dichos ensayos son totalmente aplicables como procedimientos de evaluación de especímenes de campo.

El ensayo *Overlay*, de acuerdo con la investigación bibliográfica realizada por Parker (2010), posee correlación con el rendimiento de los especímenes de campo. El ensayo de vigas es ampliamente utilizado en diseño para generar modelos de predicción de falla por fatiga (modelos presentados en el Marco Teórico). El ensayo RSCB no cuenta con investigación que relacione los resultados de ensayo con datos de campo.

En ensayos de fatiga C.V. menores a 30 % se consideran adecuados. En ningún caso se logró obtener variabilidades tan bajas para todas las mezclas. El ensayo RSCB presentó C.V. más bajos a los de las otras dos pruebas, pero en algunos casos sobrepasaron el valor de 30 %. Los ensayos de fractura suelen tener menos variabilidad.

Otra ventaja del ensayo RSCB es que la configuración del ensayo es simple y únicamente se requiere una máquina de carga que pueda medir el desplazamiento vertical del pistón de aplicación de carga. Muchos equipos poseen dicha capacidad y por lo tanto es un ensayo más aplicable en casi cualquier laboratorio.

El ensayo *Overlay* posee una configuración más especializada que limita la aplicabilidad del ensayo en cualquier laboratorio, pues se requiere equipo específico de ensayo. El ensayo de vigas es utilizado prácticamente solo en laboratorios de investigación, pues el equipo de prueba es muy especializado.

Una desventaja del ensayo *Overlay* es que requiere pegar los especímenes a placas metálicas (específicas para el ensayo), lo cual puede influir en la variabilidad del ensayo y genera un proceso de preparación adicional. Lo anterior influye tanto en el costo del ensayo como en el tiempo de preparación. Se requiere un tiempo de curado o secado del pegamento de al menos 8 horas.

Con respecto a la duración de los ensayos, de acuerdo con las condiciones ensayadas, el ensayo RSCB es el más repetitivo, pues cuenta con los menores tiempos de ensayos. El ensayo *Overlay* y el de vigas a flexión a una deformación de 600  $\mu$ s presentan duraciones mayores, pero que siguen siendo relativamente prácticas. Los tiempos del ensayo de vigas a flexión en 4 puntos aplicando una deformación de 400  $\mu$ s son excesivos y no muy prácticos para cualquier laboratorio.

En MAC como las evaluadas en el presente documento y en casos donde no se aplique el proceso de envejecimiento a largo plazo, el ensayo RSCB es el único que se proyecta como una prueba con duraciones relativamente bajas (menores a 3 horas) y que fomente la repetitividad del ensayo.

Es posible generar modelos de predicción de daño a partir de los ensayos *Overlay*, al utilizar diferentes desplazamientos de abertura de ensayo y generar un modelo semejante al generado en ensayos de vigas a flexión, pero utilizando el desplazamiento en lugar de la deformación. De este modo es posible utilizar dicho ensayo en diseño de MAC. Zhou et al. (2007) realizan

una investigación orientada al desarrollo de modelos de predicción del ensayo *Overlay* basados en la Ley de Paris.

El ensayo RSCB no cuenta con investigación suficiente para definir la aplicabilidad en diseño, sin embargo, es una prueba con alto potencial de uso.

La metodología experimental utilizada en el ensayo RSCB utiliza una carga diferente en cada MAC, proporcional a la resistencia obtenida en el ensayo SCB. En ocasiones, dependiendo las características y propiedades de las MAC, las diferencias entre las cargas aplicadas en el ensayo RSCB a dos tipos de mezclas pueden ser considerables e inducir cierta incertidumbre en los resultados.

En la investigación de Parker (2010) no se encuentran resultados adecuados al usar un 50 % de la carga del ensayo SCB para la aplicación en el ensayo RSCB. En dicha investigación no se encontró correspondencia con el ensayo *Overlay*. Hay ciertas diferencias entre la metodología experimental de Parker (2010) y la presentada en el presente documento para el ensayo RSCB, entre las que destacan la frecuencia de ensayo y algunas dimensiones de los especímenes.

Se puede proponer otra metodología experimental donde se use una única carga estándar en el ensayo RSCB. Parker (2010) realiza recomendaciones al respecto, al mencionar que se puede utilizar los resultados de muchas mezclas de referencia para definir la carga estándar. Al aplicar una única carga a las diferentes mezclas, es posible que se encuentren diferencias más marcadas en el comportamiento a la fatiga.

En caso de que se quiera realizar el ensayo RSCB a una tasa de desplazamiento controlado, se podría implementar una metodología similar a la del ensayo *Overlay*. Se podría pegar el espécimen semicircular a la bases del ensayo *Overlay* y aplicar condiciones similares de prueba.

Una ventaja del ensayo de vigas es que es posible determinar de forma sencilla parámetros de energía (energía disipada) que permiten realizar otros tipos de análisis con los resultados. Por otra parte, los modelos de predicción de fatiga generados a partir de ensayos de vigas han sido ampliamente investigados y presentan correlación con datos de campo. Las metodologías de diseño utilizan dichos modelos.

## 4.8 Comparación de criterios de análisis del comportamiento por fatiga de MAC

El Cuadro 4-87 muestra una comparación de los criterios de análisis de fatiga de cada ensayo.

Cuadro 4-87. Comparación de criterios de falla por ensayo

Ensayo	Criterio de análisis	Ventajas	Desventajas
Overlay	Nmax	<ul style="list-style-type: none"> <li>No requiere análisis adicional de datos. El número de ciclos aplicados en el ensayo es el criterio de análisis.</li> <li>Es adecuado para clasificar el comportamiento a la fatiga de las MAC. Genera una clasificación de MAC similar a la del método NLC.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determina un punto de falla total en la mezcla, cuando la grieta se propaga a través de todo el espécimen.</li> <li>En ocasiones el espécimen se agrieta totalmente antes de la alcanzar el 93 % de reducción de la carga inicial.</li> <li>La diferencia con el número de ciclos con respecto al método NLC puede ser amplia.</li> </ul>
	N(NLC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determina un punto de falla antes de la propagación total de la grieta, pero cuando el agrietamiento ya ha iniciado.</li> <li>La falla se presenta a un menor número de ciclos con respecto al criterio de la norma.</li> <li>Menos tiempo de ensayo.</li> <li>Es un criterio más adecuado para utilizar como parámetro de diseño.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere generación de curvas adicionales de análisis para determinar el punto definido como falla.</li> <li>Difícil de establecer un criterio de terminación de ensayo general para el método.</li> </ul>
RSCB	Nmax	<ul style="list-style-type: none"> <li>No requiere análisis adicional de datos. El número de ciclos aplicados en el ensayo es el criterio de análisis.</li> <li>Genera una clasificación de MAC similar a la del método adicional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determina un punto de falla total en la mezcla, cuando la grieta se propagó a través de todo el espécimen.</li> </ul>
	N(adicional)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determina un punto de falla antes de la propagación total de la grieta, pero cuando el agrietamiento ya ha iniciado.</li> <li>La falla se presenta a un menor número de ciclos con respecto al criterio de la norma.</li> <li>Menos tiempo de ensayo.</li> <li>Es un criterio más adecuado para utilizar como parámetro de diseño.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere generación de curvas adicionales de análisis para determinar el punto definido como falla.</li> <li>Difícil de establecer un criterio de terminación de ensayo general para el método.</li> </ul>
Vigas a Flexión	N(50% RI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere menor tiempo de ensayo con respecto al criterio de Rowe y Bouldin</li> <li>En ocasiones, es un criterio de análisis conservador, pues no siempre la mezcla ha llegado a la falla al 50% de la reducción de la Rigidez Inicial.</li> <li>Genera una clasificación de MAC igual a la del criterio de Rowe y Bouldin.</li> <li>No requiere análisis adicional de datos. El número de ciclos aplicados en el ensayo es el criterio de análisis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No determina la falla real del espécimen.</li> </ul>
	N(Rowe y Bouldin)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determina la verdadera falla del espécimen. Punto antes de la fase de ruptura de la curva de deterioro de fatiga.</li> <li>Adecuado para diseño.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere mayor tiempo de ensayo.</li> <li>Es necesario generar curvas adicionales para determinar el punto de falla.</li> </ul>



Para cada ensayo de fatiga se utilizaron dos criterios de análisis de la vida de fatiga, explicados en el Capítulo 2 (Marco Teórico). Aunque no se encontraron diferencias apreciables entre los dos criterios usados en un mismo ensayo, es importante definir las condiciones de aplicabilidad de los mismos.

Los criterios de los métodos NLC (N(NLC)) para el ensayo *Overlay*, Rowe y Bouldin (N(Rowe y Bouldin)) para el ensayo de vigas a flexión y el método adicional de análisis del ensayo RSCB (N(adicional)) son muy similares entre sí. En todos los casos se generan curvas al multiplicar una variable de análisis (Rigidez, carga o desplazamiento) por el número de ciclos y graficar los resultados contra el número de ciclos. El punto máximo de la curva generada es el punto definido como falla.

Las gráficas de deterioro presentadas en los tres ensayos de fatiga son muy similares, con al menos 3 fases bien definidas. Una primer fase de adaptación caracterizada por un deterioro rápido causado por la acción de la carga repetitiva, una segunda fase de fatiga caracterizada por una evolución del daño a una tasa constante y en la cual se forman microfisuras y una tercer fase de ruptura donde se da la propagación de la grieta.

Al mencionar en el Cuadro 4-87 que los criterios N(NLC), N(Rowe y Bouldin) y N(adicional) determinan un punto de falla antes de la propagación total de la grieta, pero cuando el agrietamiento ya ha iniciado, se refiere a que en todos los casos el espécimen ya posee algún grado de daño. Dicho daño es manifestado por la presencia de microfisuras, es decir, los criterios se pueden relacionar hasta cierto punto con el final de la fase 2 de la gráfica de deterioro. Debido a lo anterior, los criterios (N(NLC), N(Rowe y Bouldin) y N(adicional)) corresponden con los modos de iniciación de grietas.

Para el presente documento se prefieren los análisis por dichos criterios. El modo de propagación de grietas en campo puede estar influenciado por factores externos como la infiltración de agua. Para procesos de diseño los métodos son adecuados. La fase de propagación de grietas se puede tomar en cuenta mediante factores de correlación, tal como se presenta en los modelos de iniciación de grietas (Capítulo 2. Marco Teórico). Los criterios N(NLC) y N(adicional) definen una cantidad de ciclos menor que los criterios  $N_{max}$  de los ensayos RSCB y *Overlay* y por lo tanto requieren menor tiempo de ensayo.

El criterio de falla de la norma Tex-248-F presenta la desventaja de que en algunas mezclas, aunque la grieta se haya propagado a través del ancho del espécimen, la reducción de la carga

no se alcanza y pueden transcurrir muchos ciclos hasta alcanzarla. En dichos casos se sobreestima la capacidad de la MAC a resistir el daño por fatiga. En la mezcla 12,5 SBS+MB la diferencia entre los promedios de los criterios para el ensayo *Overlay* es de casi 400 ciclos. Las diferencias entre criterios en las demás mezclas fueron menores (en la mayoría de casos menores a 200).

El criterio de falla de la norma AASHTO T321 (N(50% RI)) no está relacionado con ningún parámetro físico, es empírico. Para procedimientos de diseño el método puede ser conservador, si la falla real está luego de que se alcanza el 50 % de la Rigidez Inicial de la mezcla. Podría darse una sobreestimación si la falla real, en una mezcla muy rígida, ocurre antes de la reducción del 50 % de la Rigidez Inicial. Para clasificar mezclas según su desempeño a la fatiga el método es adecuado.

La principal desventaja de los métodos (N(NLC), N(Rowe y Bouldin) y N(adicional)) es definir un procedimiento de ensayo que especifique un criterio de terminación de la prueba, pues el punto de falla obtenido en cada ensayo varía en cada MAC.

Para el ensayo RSCB se puede mantener la metodología experimental aplicada, pues aunque se realice la prueba hasta la falla total del espécimen la duración de ensayo es corta.

Para el ensayo *Overlay*, dados los resultados obtenidos, se podría detener el ensayo a una reducción de 85 % de la carga inicial. La diferencia entre la reducción de carga de 93 % y 85 % podría generar una reducción del tiempo de ensayo considerable en algunas mezclas. Para establecer el nuevo procedimiento es necesario evaluar más MAC con el fin de determinar si en todos los casos la falla del criterio NLC ocurre antes de la reducción del 85 % de la carga inicial.

Con respecto al ensayo de vigas, se recomienda utilizar el criterio de Rowe y Bouldin únicamente en caso de que se requieran los datos para investigación o diseño, en cuyo caso no es tan crítico realizar el ensayo hasta alcanzar un valor de 30 % de la Rigidez Inicial. Dicha metodología aumenta el tiempo de ensayo.

Los especímenes del ensayo de vigas no presentan un deterioro visible luego de la realización del ensayo, independientemente del criterio de análisis utilizado. En el ensayo *Overlay* y RSCB los puntos de falla asociados a los parámetros N(NLC) y N(adicional), son difíciles de identificar durante la prueba. La Figura 4-28 y la Figura 4-29 muestran los especímenes de los ensayos

RSCB y *Overlay* al final del ensayo, cuando se determinan los parámetros  $N_{max}$  (propagación total de la grieta).



*Figura 4-28. Espécimen del ensayo Overlay al terminar la prueba*



*Figura 4-29. Espécimen del ensayo RSCB al terminar la prueba*

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Existen diversos ensayos de evaluación de la susceptibilidad a la fatiga de las MAC. Los ensayos utilizan diferentes principios (Flexión, tensión directa, tensión indirecta, flexión semicircular, entre otros) para inducir esfuerzos de tensión en los especímenes y provocar el daño. La susceptibilidad al daño se puede determinar por medio de ensayos de fractura y fatiga.

Los ensayos de fractura se utilizan para obtener parámetros como el factor de intensidad de esfuerzo ( $K_c$ ), la energía de fractura ( $G_c$ ) y la Jc-integral ( $J_c$ ). Dichos parámetros no cuantifican directamente la vida de fatiga de las MAC, pero permiten determinar o clasificar las mezclas según su comportamiento al daño por fatiga.

Los ensayos de fatiga están asociados a la aplicación de cargas cíclicas y por lo tanto se utilizan para predecir la vida de fatiga de MAC (número de ciclos necesarios para inducir la falla en los especímenes). Estas pruebas permiten la generación de modelos de predicción de fatiga.

El proceso de envejecimiento en horno a largo plazo provoca una reducción significativa en la vida de fatiga de las mezclas. Para el ensayo *Overlay*, aunque no se cuantifica el valor específico, se identifica que la reducción es de más de 2 veces el número de ciclos. La carga máxima aumenta en promedio 1,5 veces en cada MAC al envejecer las muestras de ensayo.

No es recomendable utilizar la Carga Máxima y la Rigidez Inicial como parámetros de evaluación de fatiga, no obstante, generalmente mezclas con mayores valores de carga y rigidez presentan menores vidas de fatiga. Los ensayos *Overlay* y RSCB muestran mayores vidas de fatiga en las MAC que presentaron menores cargas. Los ensayos de vigas a flexión no presentan relación entre la vida a fatiga y la rigidez en todos los casos.

La variabilidad de los parámetros de carga y rigidez de los ensayos es relativamente baja (C.V. menores a 12 % en todos los casos evaluados). Cuando los valores de carga y rigidez entre mezclas son muy similares, dichos coeficientes de variación no son adecuados, pues no permiten diferenciar entre mezclas estadísticamente.

Todos los ensayos son adecuados para evaluar parámetros de carga y rigidez, pues generan clasificaciones similares de MAC. Para dichos parámetros, todas las pruebas son susceptibles a variaciones en el tamaño máximo nominal de las mezclas y al tipo de mezcla.

La variabilidad de los resultados de fatiga es relativamente alta en todos los casos. El ensayo RSCB es el ensayo de fatiga que presenta menor variabilidad en los resultados (C.V. cercanos a 30 % o menores en la mayoría de casos). Los ensayos de vigas y *Overlay* presentan C.V. cercanos a 50 % o menores en la mayoría de MAC.

Los ensayos de fractura presentan coeficientes de variación más bajos que los ensayos de fatiga. Los C.V. del parámetro  $G_c$  en el ensayo SCB son menores a 11 % en casi todas las MAC.

Los resultados de fatiga de los ensayos RSCB y *Overlay* son sensibles al tamaño máximo nominal del agregado de la mezcla. Únicamente los resultados del ensayo *Overlay* son sensibles al tipo de mezcla.

El criterio de falla de la norma Tex-248-F no es adecuado para todo tipo de MAC. El criterio de falla de la norma AASHTO T321 no predice la verdadera falla de los especímenes. Ambos criterios realizan una clasificación adecuada de la susceptibilidad al daño por fatiga las MAC. No se encuentran diferencias significativas entre las clasificaciones de las MAC de los distintos criterios de falla analizados por tipo de ensayo de fatiga.

Los ensayos RSCB y *Overlay* muestran una clasificación del comportamiento a la fatiga similar y adecuada según las propiedades de las MAC. Los ensayos de vigas presentan resultados inadecuados en algunas mezclas e inclusive variaciones de clasificación al realizar la prueba a diferentes deformaciones.

El ensayo RSCB posee un gran potencial de uso, debido a las ventajas que presenta respecto a los otros ensayos. Esta prueba requiere equipo poco especializado para la realización de la prueba y por lo tanto es aplicable en casi cualquier laboratorio. La forma y tamaño de los especímenes de ensayo RSCB y *Overlay* son adecuadas para utilizar especímenes de campo.

Para especímenes de laboratorio sin el proceso de envejecimiento en horno a largo plazo, cuando se evalúan mezclas con propiedades similares a las analizadas en el presente documento, el ensayo RSCB es el único que generaría duraciones de ensayo adecuadas (menores a 3 horas) y que fomenten la repetitividad de la prueba.

El ensayo *Overlay* presenta resultados adecuados, no obstante, se hace necesario utilizar otros criterios de falla como el método NLC para reducir el tiempo de ensayo y obtener resultados más apropiados. Además, se hace necesario la evaluación de cambios en la metodología

experimental para aumentar la repetitividad cuando no se utilice el proceso de envejecimiento en horno a largo plazo.

El ensayo de vigas a flexión en 4 puntos, de acuerdo a la norma de ensayo, permite realizar una clasificación adecuada del comportamiento de las MAC a la fatiga, aunque no tan acertada como la de los ensayos adicionales. Se hace necesario la aplicación de otros criterios (Rowe y Bouldin) para determinar la falla real de los especímenes. Se recomienda su uso únicamente en investigación, debido a la duración de los ensayos.

Los modelos de predicción calibrados para la obtención del número de ciclos de los ensayos de vigas y *Overlay* presentan indicadores estadísticos adecuados en todos los casos y utilizan variables significativas estadísticamente en los análisis. Estos modelos constituyen una alternativa a implementar en el diseño estructural de pavimentos flexibles una vez calibrados con datos de campo.

El número de ciclos a la falla del ensayo de vigas a flexión en 4 puntos puede expresarse como función de la vida a fatiga de los ensayos *Overlay* y RSCB. Se obtuvieron valores de  $R^2$  superiores a 0,88 en todos los casos. Para los modelos de predicción de la vida de fatiga del ensayo *Overlay* en función de los parámetros del ensayo RSCB se obtienen valores de  $R^2$  superiores a 0,85. La utilización del ensayo RSCB en la generación de modelos presenta la ventaja de la reducción del tiempo de ensayo y el aumento de la aplicabilidad y repetitividad de la prueba.

## **5.2 Recomendaciones**

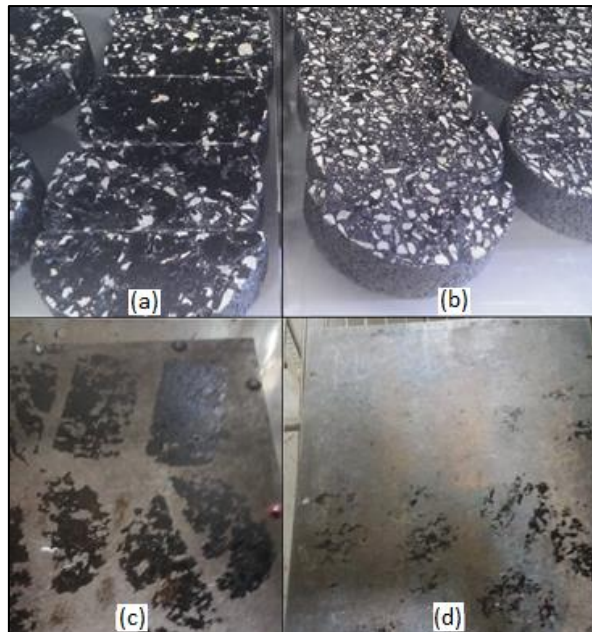
Se recomienda comprobar los resultados de los ensayos con especímenes de campo, para validar los procedimientos con datos de MAC utilizadas en el país. El ensayo RSCB no posee investigación que valide su uso en campo. El LanammeUCR cuenta con una pista a escala real donde se pueden realizar pruebas para determinar la validez de los ensayos.

Es necesaria la evaluación de los ensayos utilizando una misma mezcla con diferentes contenidos de asfalto, para evaluar la sensibilidad a dicho parámetro. Además de mezclas con diferentes modificantes, pues en el presente documento todas las MAC poseen el mismo modificante base (SBS).

El procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo podría ser más perjudicial para mezclas con elevado contenido de asfalto. Para la mezcla 12,5 CT los especímenes presentan

cierta exudación del asfalto al finalizar el proceso e inclusive fue difícil despegarlos de las placas metálicas sobre las que se colocaban, pues el asfalto exudado al enfriarse los pegaba (ver Figura 5-1).

La Figura 5-1 muestra las diferencias presentadas en el acondicionamiento de las mezclas. La Figura 5-1 (a) y (c) presentan los especímenes de la mezcla 12,5 CT luego del procedimiento de envejecimiento y la placa sobre la que se colocaron durante el proceso de acondicionamiento. La Figura 5-1 (b) y (d) muestran los especímenes de la mezcla 9,5 CT luego del procedimiento de envejecimiento y la placa sobre la que se colocaron durante el proceso de acondicionamiento.



*Figura 5-1. Afectación del procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo*

Para ensayos como el de vigas y *Overlay*, donde los tiempos de prueba podrían ser muy elevados, se recomienda estandarizar un procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo que no fomente la exudación de los especímenes. Además, se deben realizar estudios para cuantificar la reducción de la vida a la fatiga entre los procedimientos con y sin envejecimiento y notar si la afectación es similar, en proporción, para los diferentes especímenes de ensayo.

Realizar el proceso de envejecimiento a una temperatura menor (60 °C) podría reducir el efecto de exudación. Se podría aumentar el tiempo de acondicionamiento para compensar la

disminución de temperatura. Es importante mencionar que el proceso de envejecimiento debe usarse únicamente en especímenes de laboratorio.

Como ya se mencionó, se recomienda cambiar la metodología de extracción de especímenes RSCB. Se propone realizar 2 especímenes base por mezcla. De los especímenes de ensayo obtenidos (6 o 4 por espécimen base) se eligen los 6 con el porcentaje de vacíos más cercano a 7 %. Para el ensayo *Overlay* variar la metodología podría ser opcional, pues de igual manera se cumple con el contenido de vacíos de aire requerido en la mayoría de casos.

Entre los parámetros del ensayo *Overlay* que se pueden variar para disminuir la vida de fatiga de los especímenes y generar tiempos de ensayo menores sin la necesidad del procedimiento de envejecimiento en horno a largo plazo están, la temperatura, la abertura o desplazamiento aplicado a los especímenes y la frecuencia.

La temperatura es un parámetro que afecta, pero que no genera una disminución significativa del tiempo de ensayo si no se hacen cambios drásticos y poco prácticos (temperaturas bajas). El desplazamiento de abertura puede ampliarse inclusive hasta dos milímetros (según el rango especificado por Zhou & Scullion, (2003)). Bajas variaciones en el desplazamiento de abertura generan una reducción considerable de la vida como se puede notar en el documento de Ma, (2014). Una mayor frecuencia disminuye el tiempo de ensayo.

La variación de los parámetros de ensayo está sujeta a las condiciones del equipo donde se realicen las mismas. La AMPT tiene una capacidad máxima de medición del desplazamiento de 1 mm. Además, por condiciones de la AMPT utilizada, luego de cierto período de tiempo el motor se sobrecalienta, un aumento de frecuencia podría afectar el funcionamiento.

El ensayo RSCB se puede evaluar utilizando una única carga en todas las MAC, tal y como lo recomienda Parker, 2010. La carga se debe obtener de los resultados obtenidos para varias MAC de las de uso común en el país. Comparar ambas metodologías de ensayo y notar diferencias puede ayudar al crear una estandarización del ensayo. Realizar el ensayo RSCB sin el proceso de envejecimiento aumentaría el número de ciclos a la falla y se podrían obtener mayores diferencias entre mezclas, pues hay más datos de análisis.

En caso de realizar el ensayo RSCB con la metodología expuesta en el presente documento, se recomienda utilizar una precarga de 0,01 kN en la etapa de definición de carga (ensayo SCB). Dicha precarga no es elevada tomando en cuenta las cargas obtenidas.



Se recomienda el uso de los criterios de los métodos NLC (N(NLC)) para el ensayo Overlay, Rowe y Bouldin (N(Rowe y Bouldin)) para el ensayo de vigas a flexión y el método adicional de análisis del ensayo RSCB (N(adicional)) para la evaluación de la vida de fatiga.

La evaluación de ensayos de fatiga a distintas temperaturas permite la inclusión de dicho parámetro en los modelos de predicción. En el presente proyecto únicamente se realizaron ensayos a 20 °C. Se requiere la generación de más resultados de los distintos ensayos para generar una base de datos extensa que permita la calibración de modelos más generales.

Es necesario el control y evaluación de secciones a escala natural para la inclusión de modelos de predicción en el diseño de pavimentos flexibles.

## CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Abojaradeh, M. (2013). Development of fatigue failure criterion for Hot-Mix Asphalt based on dissipated energy and stiffness ratio. *Jordan Journal of Civil Engineering, volume 7* , 54-69.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2002). *AASHTO T 321-07, Determining the fatigue life of compacted Hot Mix Asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending*. AASHTO Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2011). *AASHTO T269: Método estándar de prueba para determinar el porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas abiertas y densas*. AASHTO Officials.
- American Association of State highway and Transportation Officials (AASHTO). (2015). *Procedimiento estándar para el acondicionamiento de Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC)*. . AASHTO Officials.
- Blanchetto, H., Miró, R., & Pérez, F. (2007). *Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de fileres comerciales*. Argentina: Universidad de la Plata.
- Castro, J. (2015). *Estudio del fenómeno de deformación permanente de mezclas asfálticas en caliente con ensayos empíricos de flujo y modelación en elemento finito* . San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Di Benedetto, H., de La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., & Lundstrom, R. (2004). Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures, 37*, 202-2016.
- Hou, T. (2009). *Fatigue performace prediction of North Carolina mixtures using simplified viscoelastic continuum damage model*. Raleigh, North Carolina: North Carolina State University.
- Huang, B., Shu, X., & Tang, Y. (2005). Comparison of semi-circular bending and indirect tensile strength tests for HMA mixtures. *Advances in Pavement Engineering*, 1-12.
- Huang, B., Shu, X., & Zuo, G. (Julio de 2013). Using notched semi circular bending fatigue test to characterize fracture resistance of asphalt mixtures. *Engineering Fracture Mechanics*, 78-88.

- Kim, H., Buttlar, W., & Partl, M. (2008). *Investigation of fracture toughening mechanisms of asphalt concrete using the clustered discrete element method*. Ascona: 8th Swiss Transport Research Conference.
- Kim, R., Jo, D., & Haifang, W. (2002). *Fatigue performance evaluation of Wes Track asphalt mixtures using viscoelastic continuum damage approach*. Raleigh: North Carolina State University.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2004). *Determinación de leyes y una especificación*. Costa Rica: Reporte de investigación: LM-PI - PV- IN- 17 C – 02.
- Ma, W. (2014). *Proposed improvements to Overlay test for determining cracking resistance of asphalt mixtures*. Auburn, Alabama: Auburn University.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)*. San José, Costa Rica.
- Mohammad, L., Kim, M., & Elseifi, M. (2012). Characterization of Asphalt Mixtures Fracture Resistance Using the Semi-Circular Bending (SCB) Test. *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, 1-10.
- Montazeri, S. (2009). *Assessing repeatability of four-point bending method for estimating fatigue cracking of hot mix asphalt*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestría en la Universidad de Texas at el Paso. Estados Unidos.
- Na, C. (2010). *Fatigue-fracture relation on asphalt concrete mixtures*. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2002). *Simple Performance test for 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 Consultants Division.
- Nsengiyumva, G. (2015). *Development of Semi-Circular Bending (SCB) fracture test for bituminous mixtures*. Lincoln, Nebraska.

- Pais, J., Pereira, P., & Picado, L. (2 de Mayo de 2002). Variability of laboratory fatigue life of asphalt mixes using four bending test results. *International Journal of Pavements*, 1.
- Parker, B. (2010). *Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete fatigue cracking resistance*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestría en la Universidad de Texas A&M. Texas, Estados Unidos.
- Pérez, F., Miró, R., Martínez, A., Botella, R., Reyes, O., & Valdés, G. (2009). False failure inflexural fatigue tests. En J. Pais, *2nd Workshop on four point bending* (pág. 337). University of Minho, Portugal.
- Prapoorna, K., Said, S., & Hakim, H. (Julio de 2012). Asphalt Mixtures Crack Propagation Assessment using Semi-Circular Bending Tests. *International Journal of Pavement Research and technology*, 5(4), 209-217.
- 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: Iowa State University.
- Texas Department of Transportation. (2014). *Test Procedure for Overlay Test (Tex-248-F)*. Texas: Texas Department of Transportation.
- Wagoner, M., Buttlar, W., Paulino, G., & Blankenship, P. (2005). Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test. *Journal of the Transportation Research Board*, 183-192.
- Walubita, F., Faruk, A., Das, G., Tanvir, H., Zhang, J., & T, S. (2012). *The overlay tester: a sensitivity study to improve repeatability and minimize variability in the test results*. Austin, Texas: Texas Department of Transportation, Research and Technology Implementation Office.
- Walubita, L. M., Jung, S., Glover, C., & Park, E. (2006). *Application of calibrated mechanistic fatigue analysis with aging effects*. Technical Research Report FHWA/TX-06/0-4468-3, College Station, TX, Texas Transportation Institute.
- Walubita, L., Epps, A., Hoon, S., Glover, C., Sug, E., Chowdhury, A., & Lytton, R. (2004). *Comparison of fatigue analysis approaches for two hot mix asphalt concrete (HMAC) mixtures*. Austin, Texas: Texas Department of Transportation, Research and Technology Implementation Office.

- Wu, H., Huang, B., & Shu, X. (2014). Characterizing fatigue behavior of asphalt mixtures utilizing loaded wheel testers. *Journal of materials in civil engineering*, 26, 152-159.
- Zhou, F., & Scullion, T. (2003). *Upgraded Overlay Tester and its application to characterize reflection cracking resistance of asphalt mixtures*. Texas: Texas Transportation Institute.
- Zhou, F., Fernando, E., & Scullion, T. (2008). *A review of performance models and test procedures with recommendations for use in the Texas m-e design program*. Texas, Estados Unidos.
- Zhou, F., Hu, S., & Scullion, T. (2007). *Development and verification of the Overlay Tester based fatigue cracking prediction approach*. Texas: Texas Transportation Institute.

## ANEXO A. RESULTADOS INDIVIDUALES DE LOS ENSAYOS

A continuación se presentan los resultados individuales, por espécimen, obtenidos en todos los ensayos realizados.

*Cuadro A-1. Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos (600  $\mu$ s)*

Mezcla	Porcentaje de vacíos	Rigidez inicial "RI" (Mpa)	N (50% RI)	% de reducción de la rigidez (Rowe y Bouldin)	N(Rowe y Bouldin)
9,5 CT	6,5	4728,64	46650	45,56	56050
	6,7	5572,93	42430	34,86	111256
	6,9	4459,65	40630	45,91	45803
9,5 SBS	6,8	5526,53	39000	39,67	66870
	6,9	5702,07	29510	42,85	36101
	7,8	5319,52	30350	40,98	39683
9,5 SBS+MB	6,9	5579,09	30660	24,02	53156
	7,6	5157,2	43200	44,92	51355
	7,7	5121,79	76050	37,72	177245
9,5 SBS+CAL	7,6	4868,83	39910	42,99	50033
	7,8	3833,25	13620	-	-
	8,2	4466,52	50630	37,63	91817
12,5 CT	6,9	3851,21	39700	36,89	73051
	7,6	3797,46	24540	34,26	45092
	7,7	3410,94	48230	41,49	69943
	8	3471,22	72620	39,36	135396
12,5 SBS	7,6	4424,62	25440	41,12	34111
	7,4	4595,38	47250	31,53	200931
	7	4577,51	39500	42,41	52346
12,5 SBS+MB	7,2	4757,6	23080	38,07	60550
	7,2	4333,52	27820	-	-
	7,3	4523,45	26160	38,99	39601
12,5 SBS+CAL	7,2	4611,35	30820	39,70	44301
	7,2	4714,66	18950	40,97	25005
	7,1	5141,64	24040	35,56	41768

Cuadro A-2. Ensayo de vigas a flexión en 4 puntos (400  $\mu$ s)

Mezcla	Porcentaje de vacíos	Rigidez inicial "RI" (Mpa)	N (50% RI)	% de reducción de la rigidez (Rowe y Bouldin)	N(Rowe y Bouldin)
9,5 CT	6,6	4932,57	493550	50,41	483045
	6,6	4658,87	306660	47,13	323178
	6,6	5552,91	165320	48,37	170474
9,5 SBS	6,3	6063,22	338840	49,12	350466
	6,5	5600,93	191270	49,04	194983
	6,8	5492,17	721660	48,68	748415
9,5 SBS+MB	7	5923,57	797380	48,33	839778
	7,2	5954,81	678680	49,14	707936
	8,2	4923,44	1148150	46,01	1456449
9,5 SBS+CAL	6,6	5391,32	491660	43,87	590615
	6,2	5541,91	227330	51,33	217145
	6,1	5299,95	524800	50,61	506710
12,5 CT	6,8	4085,1	705230	43,18	907935
	7,2	3790	469530	50,73	456047
	7,4	3976,04	537030	50,36	526140
	7,4	3902,11	327330	55,59	302089
12,5 SBS	6,9	4909,62	558040	46,78	596765
	7,2	4696,64	555900	46,21	584098
	7,9	4267,58	420080	46,13	457409
12,5 SBS+MB	7,2	5111,09	258020	-	-
	7,5	4613,76	324830	42,47	400102
	7,8	4554,44	129310	41,71	175694
12,5 SBS+CAL	7,9	4595,29	130310	44,44	148707
	7,2	4980	407370	45,37	480479
	7,5	4416,27	270180	48,01	291089

Cuadro A-3. Ensayo Overlay (Grupo 1)

Mezcla	% vacíos del espécimen	Carga máxima (kN)	% de reducción al ciclo 1200	# de ciclos aplicados	% de reducción máximo
9,5 CT	5,6	1,86	66,67	1500	68,76
	7,5	1,70	83,96	1200	84,10
	6,6	1,58	71,87	1300	73,14
9,5 SBS	6,2	2,29	80,44	1500	88,74
	8	2,32	91,72	1300	92,02
	7	2,09	-	571	93,16
9,5 SBS+Cal	7,9	2,17	55,64	1200	55,91
	6,5	2,12	91,89	1201	92,06
	6,3	2,18	73,13	1200	73,42
12,5 CT	5,9	1,55	76,74	1300	77,68
	6,9	1,50	79,29	1800	85,06
	6,8	-	-	-	-
12,5 SBS	6	1,93	82,07	1600	85,40
	7,6	1,86	84,73	1400	87,64
	6,7	1,85	86,01	1200	86,43
12,5 SBS+CAL	6,7	1,94	72,69	1800	75,19
	6,5	1,61	57,83	4000	67,60

Cuadro A-4. Ensayo SCB

Mezcla	Porcentaje de Vacíos	Carga SCB (kN)	Gc (kN*mm)
9,5 CT	6,7	2,55	5,10
	6,2	2,76	4,47
9,5 SBS	8,4	3,31	4,56
	8,5	2,86	4,30
9,5 SBS + MB	7,5	3,20	4,80
	6,2	2,90	3,03
9,5 SBS+CAL	6,2	3,05	4,69
12,5 CT	5,4	1,85	5,34
	7,4	1,62	4,65
12,5 SBS	8,3	2,53	4,77
	6,8	2,15	4,62
12,5 SBS +MB	7,0	2,54	4,09
	8,3	2,62	3,84
12,5 SBS+CAL	6,8	2,48	3,01
	8,0	2,50	3,51



Cuadro A-5. Ensayo Overlay (Grupo 2)

Mezcla	% vacíos especimen	Carga máxima (kN)	%de reducción máximo	# de ciclos max	Ciclos NLC	% carga NLC
9.5 CT	6.34	2.80	93.924	323	237	76.81
	7.91	2.46	93.084	893	330	66.65
	6.25	2.84	93.091	878	600	74.08
9.5 SBS	7.60	3.18	93.076	317	110	68.62
	8.02	2.93	93.017	414	204	70.85
	6.86	3.04	93.093	172	73	68.71
9.5 SBS+MB	5.95	3.16	93.056	319	166	72.92
	7.25	2.85	93.220	263	194	77.68
	6.63	3.11	93.040	151	40	68.01
9.5 SBS+Cal	6.44	2.72	93.018	290	167	68.57
	7.54	2.65	93.142	613	460	80.41
	6.63	2.77	93.315	196	152	71.16
12.5 CT	5.92	2.27	77.025	1658	1652	76.64
	6.73	2.34	82.241	2578	2287	78.82
	7.19	2.30	90.193	1800	1438	80.73
12.5 SBS	5.97	3.01	-	-	465	72.37
	7.62	2.81	93.093	451	349	80.36
	6.73	2.88	93.108	374	77	70.51
12.5 SBS+MB	7.13	2.63	-	-	91	65.48
	7.99	2.41	93.817	180	129	73.59
	6.98	2.86	93.032	888	237	72.90
12.5 SBS+CAL	6.61	2.71	93.080	608	452	86.41
	7.93	2.63	93.167	829	492	80.70
	6.31	2.76	-	-	689	71.81

Cuadro A-6. Ensayo RSCB

Mezcla	% vacíos del espécimen	Carga promedio aplicada por espécimen (N)	Máximo número de ciclos	Desplazamiento del máximo número de ciclos	N (Punto de falla alternativo)	Desplazamiento del punto de falla alternativo (mm)
9,5 CT	6,50	1312,45	702	3,22	512	2,07
	7,96	1312,52	374	2,46	259	1,42
	6,80	1312,54	557	2,86	397	1,67
9,5 SBS	8,00	1527,85	405	2,00	304	1,19
	7,03	1527,62	337	2,31	258	1,36
	6,83	1527,55	320	1,94	243	1,09
9,5 SBS+MB	7,70	1512,48	311	1,91	225	1,24
	6,72	1512,71	447	1,79	335	1,09
	7,51	1512,43	509	2,44	382	1,46
9,5 SBS+CAL	6,78	1512,61	433	2,03	313	1,24
	6,27	1512,56	597	2,68	430	1,85
	6,48	1512,54	458	2,39	307	1,72
12,5 CT	6,30	852,74	416	5,06	288	2,92
	7,89	852,60	533	6,35	366	3,79
	6,49	852,57	897	5,71	705	3,24
12,5 SBS	7,04	-	-	-	-	-
	7,72	1157,71	833	3,31	602	1,95
	6,11	1157,58	494	3,93	373	2,26
12,5 SBS+MB	7,72	1277,40	417	2,78	303	1,59
	6,11	1277,43	569	3,50	433	1,82
	6,83	1277,47	545	2,79	386	1,64
12,5 SBS+CAL	6,95	1232,81	740	2,75	565	1,50
	6,50	1232,87	729	2,39	544	1,39
	6,68	1232,99	774	2,85	626	1,61