

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**



**“EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TEMPLADAS CON  
PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) PARA CAPAS DE PAVIMENTO”**

**POR:  
ING. DANIELA ESCOBOZA ARREDONDO**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES**

**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

**FECHA: MAYO 2025**



“Evaluación de mezclas asfálticas templadas con pavimento asfáltico reciclado (RAP) para capas de pavimento”. Tesis, presentado por Daniela Escoboza Arredondo como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Vías Terrestres, ha sido aprobado y aceptado por:

---

**M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez**  
Director de la Facultad de Ingeniería

---

**M.I. Rodrigo de la Garza Aguilar**  
Secretario de Investigación y Posgrado

---

**M.I. María Selene Ruiz Rivero**  
Coordinadora Académica

---

**Dra. Daphne Espejel García**  
Directora de Tesis

---

**Octubre 2025**

Fecha

**COMITÉ**

**Dra. Daphne Espejel García**

**M.I. Alfonso Díaz Pichardo**

**Dra. Vanessa Verónica Espejel García**

**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**



**ING. DANIELA ESCOBOZA ARREDONDO**

**Presente. -**

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Vías Terrestres, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por la directora **Dra. Daphne Espejel García** para que lo desarrolle como Tesis, con el título **“Evaluación de mezclas asfálticas templadas con pavimento asfáltico reciclado (RAP) para capas de pavimento”**.

### Índice de Contenido

- 1. GENERALIDADES
  - 1.1 Introducción
  - 1.2 Objetivo General
- 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA
  - 2.1 Asfalto
  - 2.2 Clasificación de los materiales asfálticos
    - 2.2.1 Cemento asfáltico
    - 2.2.2 Asfalto rebajado
    - 2.2.3 Emulsión asfáltica
  - 2.3 Mezcla asfáltica
    - 2.3.1 Clasificación de mezclas asfálticas
  - 2.4 Materiales constituyentes
    - 2.4.1 Agregados
  - 2.5 Pavimentos 18
    - 2.5.2 Funciones de los pavimentos asfálticos
    - 2.5.3 Problemáticas del pavimento asfáltico.
  - 2.6 Pavimento asfáltico reciclado (RAP)
    - 2.6.2 Aplicaciones
    - 2.6.3 Requisitos de procesamiento
    - 2.6.4 Propiedades de los materiales
  - 2.6.6 Beneficios ambientales
  - 2.7 Método de diseño
    - 2.7.1 Superpave
    - 2.7.2 Diseño de Mezcla Balanceado (BMD)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Materiales

3.1.1 Agregados pétreos

3.1.2 Emulsiones asfálticas

3.1.3 Diseño de Mezclas asfálticas

#### 3.2 Equipos

3.3 Extracción del material asfáltico del RAP

3.4 Prueba de Recuperación del Asfalto usando el Evaporador Rotatorio "ASTM D 5404 – 03 Standard

Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator".

3.5 Clasificación según el Grado de Desempeño (PG) del material asfáltico recuperado del RAP utilizando distintas pruebas de laboratorio

3.5.1 Prueba de Envejecimiento del Cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO) (M·MMP·4·05·027/22)

3.5.2 Prueba de Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV) (M·MMP·4·05·028/22)

3.6 Prueba de Módulo Reológico de Corte Dinámico (M·MMP·4·05·025/02) 48

3.7 Prueba para medir la rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga a Flexión (AASHTO T 313-12)

3.8 Elaboración de especímenes

3.9 Prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica (MAC-III)

3.10 Prueba estándar para la determinación del índice de tolerancia al agrietamiento de la mezcla asfáltica utilizando la prueba de agrietamiento por tracción indirecta a temperatura intermedia (ASTM D8225)

3.11 Prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324)

3.12 Prueba para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas (ISSN 0188-7297)

3.13 Prueba estándar para determinar la energía de fractura de mezclas asfálticas utilizando la geometría de tensión compacta en forma de disco D(CT) (AASHTO T 322)

3.14 Método de prueba para determinar la viga a la fatiga de mezclas asfálticas sujetas a flexión repetida (ASTM D7460-10)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

**1. RESULTADOS**

- 1.1 Clasificación del cemento asfáltico según su Grado de Desempeño (PG)
- 1.2 Resultados Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo (HWT)
- 1.3 Resultados de Prueba de Índice de Agrietamiento (IDEAL-CT)
- 1.4 Resultados de Prueba de Módulo Dinámico puntual (20°C y 10 Hz)
- 1.5 Resultados de prueba de Energía de Fractura (DCT).
- 1.6 Resultados de la curva maestra del módulo dinámico
- 1.7 Resultados de la prueba de resistencia a la fatiga en vigas a flexión en cuatro puntos

**2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

**3. REFERENCIAS**

**4. CURRICULUM VITAE**

**ATENTAMENTE**  
*"naturam subiecit aliis"*

**EL DIRECTOR**

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
U.A.CH.**



**DIRECCIÓN**

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO**

**M.I. RODRIGO DE LA GARZA AGUILAR**

## **AGRADECIMIENTOS**

En especial a mi familia, a mi pareja, amigos y compañeros por sus ánimos y apoyo.

A la Dra. Daphne Espejel por compartirme de su conocimiento a lo largo de la tesis.

A Ergon Asfaltos México por la oportunidad de realizar la etapa experimental en sus instalaciones y así mismo a su personal por todas sus enseñanzas y compañía en la estancia.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua por brindarme los estudios de Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres.

Muchas gracias.

## RESUMEN

La ingeniería moderna busca soluciones sostenibles, y en el ámbito vial, el uso de Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) en mezclas templadas se presenta como una alternativa viable para reducir el impacto ambiental. Este estudio evaluó la utilización de mezclas asfálticas templadas elaboradas con 100% RAP y emulsiones asfálticas modificadas, mediante un diseño balanceado por desempeño, ante la ausencia de normativas específicas en México. Las mezclas templadas, producidas a temperaturas cercanas a los 100°C, ofrecen ventajas ambientales al disminuir el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero. Se desarrolló una metodología que incluyó el análisis del RAP, la formulación de emulsiones y la determinación de contenidos óptimos de emulsión y de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Los resultados mostraron que las mezclas templadas con emulsión EARA 2P, especialmente aquellas con adición de  $\text{Ca(OH)}_2$ , presentaron buen comportamiento en términos de adherencia, manejabilidad, compactación y desempeño mecánico. Se destacaron por su menor deformación, mayor resistencia al agrietamiento, rigidez controlada y buena resistencia a la fatiga. Además, permiten una apertura temprana al tránsito vehicular, lo que representa una ventaja operativa significativa. Las mezclas asfálticas templadas con RAP y emulsiones modificadas representan una opción efectiva, sostenible y técnicamente sólida para la infraestructura vial, posicionándose como una alternativa intermedia entre las mezclas en caliente y en frío.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
1. GENERALIDADES .....	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Objetivo General.....	14
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	15
2.1 Asfalto .....	15
2.2 Clasificación de los materiales asfálticos .....	15
2.2.1 <i>Cemento asfáltico</i> .....	16
2.2.2 <i>Asfalto rebajado</i> .....	16
2.2.3 <i>Emulsión asfáltica</i> .....	16
2.3 Mezcla asfáltica .....	18
2.3.1 <i>Clasificación de las mezclas asfálticas</i> .....	19
2.4 Materiales .....	20
2.4.1 <i>Agregados</i> .....	20
2.5 Pavimentos .....	20
2.5.1. <i>Características de los pavimentos</i> .....	21
2.5.2 <i>Funciones</i> .....	21
2.5.2 <i>Problemáticas del pavimento asfáltico</i> .....	22
2.6 Pavimento asfáltico reciclado (RAP).....	24
2.6.1. <i>Obtención del RAP</i> .....	25
2.6.2 <i>Aplicaciones</i> .....	27
2.6.3 <i>Acopio del RAP</i> .....	28
2.6.4 <i>Beneficios ambientales</i> .....	29
2.7 Método de diseño.....	29
2.7.1 <i>Superpave</i> .....	29
2.7.2 <i>Diseño de Mezcla Balanceado (BMD)</i> .....	32
3. METODOLOGÍA.....	34
3.1 Materiales .....	36
3.1.1 <i>Agregados pétreos</i> .....	36

3.1.2 Emulsiones asfálticas.....	37
3.1.3 Diseño de Mezclas asfálticas .....	37
3.2 Equipos.....	38
3.3 Extracción del material asfáltico del RAP .....	38
3.4 Prueba de Recuperación del Asfalto usando el Evaporador Rotatorio “ASTM D 5404 – 03 Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator”.....	40
3.5 Clasificación según el Grado de Desempeño (PG) del material asfáltico recuperado del RAP utilizando distintas pruebas de laboratorio .....	41
3.5.1 Prueba de Envejecimiento del Cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO) (M·MMP·4·05·027/22).....	41
3.5.2 Prueba de Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV) (M·MMP·4·05·028/22).....	44
3.6 Prueba de Módulo Reológico de Corte Dinámico (M·MMP·4·05·025/02).....	47
3.7 Prueba para medir la rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga a Flexión (AASHTO T 313-12) .....	50
3.8 Elaboración de especímenes .....	53
3.9 Determinación de la gravedad específica teórica máxima (Gmm) y la densidad de la mezcla asfáltica conforme al procedimiento MAC-III .....	55
3.10 Prueba de compactación de Mezclas Asfálticas templadas con el Compactador Giratorio (ASTM D6925) .....	59
3.11 Prueba estándar para la determinación del índice de tolerancia al agrietamiento de la mezcla asfáltica utilizando la prueba de agrietamiento por tracción indirecta a temperatura intermedia (ASTM D8225).....	63
3.12 Prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324).....	66
3.13 Prueba para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas (ISSN 0188-7297).....	68
3.14 Prueba para determinar la energía de fractura de mezclas asfálticas utilizando la geometría de tensión compacta en forma de disco D(CT) (AASHTOT322) .....	73
3.15 Método de prueba para determinar la viga a la fatiga de mezclas asfálticas sujetas a flexión repetida (ASTM D7460-10) .....	75
4.2 Resultados de Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo (HWT).....	82
4.3 Resultados de Prueba de Índice de Agrietamiento (IDEAL – CT).....	87
4.4 Resultados de Prueba de Módulo Dinámico Puntual (20°C y 10 Hz).....	92
4.5 Resultados de prueba de Energía de Fractura (DCT).....	97
4.6 Resultados de la curva maestra del módulo dinámico.....	100
4.7 Resultados de la prueba de resistencia a la fatiga en vigas a flexión en cuatro puntos .....	104
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
6. REFERENCIAS .....	110
6.1 PÁGINAS WEB CONSULTADAS .....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de materiales asfálticos. Fuente: NOM N-CMT-4-05-001/05	15
Tabla 2. Clasificación de las emulsiones asfálticas catiónicas	18
Tabla 3. Clasificación de las emulsiones asfálticas aniónicas	18
Tabla 4. Clasificación de las emulsiones asfálticas modificadas con polímero	18
Tabla 5. Requisitos para calidad de cementos asfálticos de acuerdo al grado de desempeño (PG) y al nivel de ajuste	31
Tabla 6. Los criterios granulométricos para base ( $\Sigma L > 106$ ) definidos en la norma N-CMT-4-02-003/21 emitida por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT)	36
Tabla 7. Evaluación de ECM 65-110 (Emulsión convencional)	37
Tabla 8. Evaluación de la emulsión modificada formulada por Ergon Asfaltos México EARA 2P	37
Tabla 9. Parámetro y aproximación	49
Tabla 10. Clasificación de acuerdo con el Grado de Desempeño	81
Tabla 11. Resultados de Rueda Cargada de Hamburgo en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión convencional ECM 65-110	82
Tabla 12. Resultados de Rueda Cargada de Hamburgo en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P.	83
Tabla 13. Resultados de Rueda Cargada de Hamburgo en Mezcla en frío 100% RAP en frío 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P	84
Tabla 14. Resultados de Rueda Cargada de Hamburgo en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P + 1% Ca(OH) <sub>2</sub>	85
Tabla 15. Resultados de Índice de Agrietamiento (IDEAL-CT) en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión convencional ECM 65-110	87
Tabla 16. Resultados de Índice de Agrietamiento (IDEAL-CT) en Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P.	88
Tabla 17. Resultados de Índice de Agrietamiento (IDEAL -CT) en Mezcla en frío 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P.	89
Tabla 18. Resultados de Índice de Agrietamiento (IDEAL-CT) en Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P+1% Ca(OH) <sub>2</sub>	90
Tabla 19. Resultados de Módulo Dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión convencional ECM 65-110.	92
Tabla 20. Resultados de Módulo Dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión convencional ECM-65-110	93
Tabla 21. Resultados de Módulo Dinámico en Mezcla en frío 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P	94
Tabla 22. Resultados de Módulo Dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P+1% Ca(OH) <sub>2</sub>	95
Tabla 23. Resumen de los resultados de pruebas de desempeño	96
Tabla 24. Resultados de Energía de Fractura (DCT) en Mezcla Templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P97	97
Tabla 25. Resultados de Energía de Fractura (DCT) en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P+1% Ca (OH) <sub>2</sub>	98
Tabla 26. Resultados de curva maestra del módulo dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P	101
Tabla 27. Resultados de curva maestra del módulo dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P+1% Ca(OH) <sub>2</sub>	102
Tabla 28. Resultados de Fatiga en mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P	104
Tabla 29. Especificaciones de Fatiga para el diseño de acuerdo con la NCAT	104
Tabla 30. Resultados de Fatiga en mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA + 1% Ca(OH) <sub>2</sub>	105
Tabla 31. Especificaciones de Fatiga para el diseño de acuerdo con la NCAT	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Asfalto líquido .....	15
Fig. 2. Clasificación de mezclas asfálticas por temperatura de fabricación (Fuente: Porot, 2008) .....	19
Fig. 3. Pavimento con deformación permanente .....	23
Fig. 4. "Piel de cocodrilo". Agrietamiento por fatiga .....	24
Fig. 5. Niveles protocolo AMAAC. Fuente: Solorio R., Garnica P., Hernández R., 2018.....	32
Fig. 6. Diagrama del diseño balanceado con enfoque en diseño por desempeño. Fuente: Yin, 2021 .....	34
Fig. 7. Proceso propuesto para elección de contenidos óptimos .....	35
Fig. 8. Diagrama para diseño de mezclas asfálticas .....	35
Fig. 9. Pavimento asfáltico reciclado.....	38
Fig. 10. Proceso de extracción del asfalto del RAP.....	39
Fig. 11. Filtrado de la extracción del RAP .....	39
Fig. 12. Proceso de la concentración del asfalto extraído del RAP.....	41
Fig. 13. Vertimiento de asfalto a recipiente RTFO .....	42
Fig. 14. Recipientes RTFO en rejilla de enfriamiento .....	42
Fig. 15. Colocación de recipientes RTFO.....	43
Fig. 16. Envejecimiento del residuo asfáltico en el RTFO .....	43
Fig. 17. Acondicionamiento de cemento asfáltico por envejecer.....	45
Fig. 18. Equipo PAV.....	45
Fig. 19. Retiro de bandejas PAV.....	46
Fig. 20. Muestras envejecidas en el horno .....	46
Fig. 21. Obtención de cemento asfáltico envejecido .....	47
Fig. 22. Muestras envejecidas en Horno de Vacío .....	47
Fig. 23. Muestra en reómetro de cortedínámico .....	49
Fig. 24. Muestras del residuo asfáltico para prueba para medir la rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga a Flexión.....	51
Fig. 25. Equipo de Reómetro de Viga de Flexión (BBR) .....	52
Fig. 26. RAP cribado.....	54
Fig. 27. RAP muestreado.....	54
Fig. 28. RAP en el horno .....	54
Fig. 29. Colocación de emulsión al RAP .....	56
Fig. 30. 100% RAP y emulsión en mezcla asfáltica .....	56
Fig. 31. Disgregación de la mezcla para Gmm .....	57
Fig. 32. RAP para el diseño de los especímenes.....	58
Fig. 33. RAP en el horno.....	58
Fig. 34. Mezclado del RAP con emulsión .....	58
Fig. 35. Compactador Giratorio Superpave .....	61
Fig. 36. Especímenes compactados.....	62
Fig. 37. Esquema del índice de tolerancia de agrietamiento .....	63
Fig. 38. Equipo de prueba de tensión indirecta tradicional.....	64
Fig. 39. Equipo con tiras de carga .....	64
Fig. 40. Especímenes acondicionándose .....	65
Fig. 41. Prueba de agrietamiento, "IDEAL CT".....	65
Fig. 42. Especímenes cortados .....	67
Fig. 43. Especímenes en el equipo de Rueda Cargada de Hamburgo .....	67
Fig. 44. Pre-acondicionamiento del equipo de Rueda Cargada de Hamburgo.....	68
Fig. 45. Encendido de equipo de Rueda Cargada de Hamburgo.....	68
Fig. 46. Especímenes cortados para prueba de Módulo dinámico.....	70
Fig. 47. Especímenes realizándose volumetría .....	71
Fig. 48. Colocación de pines en espécimen.....	71
Fig. 49. Especímenes en cámara de temperatura para prueba de módulo dinámico .....	71
Fig. 50. Especímen con LVDT para la prueba.....	72
Fig. 51. Especímen en Prueba de Energía de Fractura D(CT) .....	74

Fig. 52. Carga y movimiento del equipo de Fatiga Fuente: ASTM D7460-10. ....	75
Fig. 53. Compactador lineal .....	77
Fig. 54. Colocación de mezcla asfáltica en el compactador lineal .....	77
Fig. 55. Resultado de la compactación lineal para prueba de Fatiga.....	77
Fig. 56. Vigas cortadas.....	78
Fig. 57. Especímenes para equipo de Fatiga .....	78
Fig. 58. Geometría para equipo de Fatiga.....	78
Fig. 59. Prueba de Fatiga en Viga de 4 Puntos.....	80
Fig. 60. Deformación (mm) en función del número de pasadas en Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo .....	82
Fig. 61. Espécimen izquierdo y derecho de la Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo .....	82
Fig. 62. Deformación (mm) en función del número de pasadas en Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo .....	83
Fig. 63. Espécimen izquierdo y derecho de la Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo.....	83
Fig. 64. Deformación (mm) en función del número de pasadas en Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo .....	84
Fig. 65. Espécimen izquierdo y derecho de la Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo.....	84
Fig. 66. Deformación (mm) en función del número de pasadas en Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo .....	85
Fig. 67. Espécimen izquierdo de la Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo .....	85
Fig. 68. Resultados de prueba de Rueda Cargada de Hamburgo.....	86
Fig. 69. Desplazamiento en función de la carga (kn) y Valor de IDEAL-CT Index.....	87
Fig. 70. Especímenes después de ensaye .....	87
Fig. 71. Desplazamiento en función de carga y Valor de IDEAL-CT.....	88
Fig. 72. Especímenes después del ensaye.....	88
Fig. 73. Desplazamiento en función de la Carga (kn) y Valor de IDEAL-CT Index .....	89
Fig. 74. Especímenes después del ensaye.....	89
Fig. 75. Desplazamiento en función de la Carga (kn) y Valor de IDEAL-CT Index .....	90
Fig. 76. Especímenes después del ensaye.....	90
Fig. 77. Resultados de la prueba de IDEAL-CT .....	91
Fig. 78. Últimos ciclos de ensaye.....	92
Fig. 79. Especímenes después de la prueba .....	92
Fig. 80. Últimos ciclos de ensaye.....	93
Fig. 81. Especímenes después de la prueba .....	93
Fig. 82. Últimos ciclos del ensaye.....	94
Fig. 83. Especímenes después de la prueba .....	94
Fig. 84. Últimos ciclos de ensaye.....	95
Fig. 85. Especímenes después de la prueba .....	95
Fig. 86. Resultados de prueba de Módulo Dinámico a 20°C y 10 Hz. ....	96
Fig. 87. Resultados de carga (kN).....	97
Fig. 88. Resultados de Energía de Fractura (Gf/m <sup>2</sup> ).....	97
Fig. 89. Espécimen DCT, Plano de Falla y Agrietamiento .....	98
Fig. 90. Resultados de carga (kN).....	99
Fig. 91. Resultados de Energía de Fractura (Gf/m <sup>2</sup> ).....	99
Fig. 92. Espécimen en DCT, Plano de falla y Agrietamiento.....	99
Fig. 93. Resultados de prueba de Energía de fractura Gf (J/m <sup>2</sup> ).....	100
Fig. 94. Curva maestra a una temperatura de referencia de 20°C.....	101
Fig. 95. Curva maestra a una temperatura de referencia de 20°C.....	102
Fig. 96. Resultados de las curvas maestras a una temperatura de referencia de 20°C.....	103
Fig. 97. Ley de Fatiga obtenida .....	104
Fig. 98. Especímenes para prueba de Fatiga.....	104
Fig. 99. Reducción de rigidez para número de ciclos a la falla.....	105
Fig. 100. Ensaye de Fatiga .....	105
Fig. 101. Ley de Fatiga obtenida .....	105
Fig. 102. Especímenes para prueba de Fatiga.....	106
Fig. 103. Reducción de rigidez para números de ciclos a la falla .....	106
Fig. 104. Ensaye de Fatiga .....	106
Fig. 105. Resultados de número de ciclos a la falla (Nf) en la prueba de Fatiga en viga de cuatro puntos.....	107



## 1. GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

Actualmente, el campo de la ingeniería se centra con mayor enfoque en la sustentabilidad. La economía circular surge como la incorporación de medidas que permiten minimizar el impacto ambiental (Merseguer *et al.*, 2021), implicando compartir, reutilizar, reparar y reciclar todas las veces posibles para que el ciclo de vida de los productos se extienda (Europarl, 2023).

De acuerdo con Muench (2014), un pavimento sustentable cumple con los objetivos de ingeniería cuando satisface las necesidades básicas humanas, utiliza recursos de manera efectiva y preserva los ecosistemas circundantes. Una de las mejores prácticas de sustentabilidad involucra la reducción de gases de efecto invernadero y de los recursos no renovables (Goyer *et al.*, 2012).

El uso de Pavimento Asfáltico Reciclado (R.A.P, por sus siglas en inglés: *Reclaimed Asphalt Pavement*) reduce la demanda de agregados vírgenes de banco de materiales, se considera funcionalmente factible (Mendoza *et al.*, 2020), y demás se puede utilizar en cualquier capa del pavimento. Puesto que fabricación de las mezclas asfálticas se producen con mayor frecuencia a temperaturas altas (160°C-180°C) para los materiales pétreos como al asfalto (mezclas asfálticas en caliente). Debido al aumento de los costos energéticos y los gases de efecto invernadero se ha llevado a cabo el desarrollo de mezclas a menor temperatura (Lesme, 2015).

Las mezclas asfálticas templadas (HWMA) son aquellas a las que su temperatura de mezclado se reduce a 100°C (Asfáltica, 2019) con el uso de emulsiones y aditivos. La contribución de las emulsiones asfálticas en una mezcla permite disminuir el consumo de energía y las emisiones con respecto a las mezclas en caliente (ATEB, 2014).

En esta investigación se evaluará la utilización de 100% de RAP en mezclas asfálticas en temperatura templada fabricadas con emulsiones asfálticas modificadas, basándose en un diseño balanceado por desempeño.

En México aún no existen especificaciones ni normativas para la fabricación y diseño de mezclas asfálticas templadas. Esta investigación propuso una metodología que abarca desde analizar el RAP, la propuesta de las emulsiones asfálticas, la selección de los porcentajes óptimos de emulsión para diseñar las mezclas y el contenido de hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ .



La evaluación de las mezclas asfálticas con los porcentajes óptimos se realizó por medio de dos etapas, la primera por las pruebas de desempeño de la Rueda Cargada de Hamburgo (HWT), Índice de Agrietamiento (IDEAL-CT) y Módulo Dinámico Puntual (20°C), mientras que la segunda etapa, fue para las mezclas que obtuvieron mayor desempeño y se realizaron las pruebas de Energía de Fractura D(CT), Curva Maestra del Módulo Dinámico y Resistencia a la Fatiga por medio la prueba de la Viga de 4 Puntos.

El interés de realizar esta investigación se orienta en destacar las ventajas del uso del reciclado de un pavimento asfáltico (RAP) en mezclas templadas producidas con emulsiones asfálticas con modificaciones para la obtención de durabilidad y condiciones de servicio eficientes, con la intención de que se reduzca el consumo de energéticos, las emisiones causadas por las mezclas calientes y que el uso de este pueda ser más implementado en nuestro país.

## **1.2 Objetivo General**

Evaluar el diseño de mezclas asfálticas a temperatura templada diseñadas con 100% pavimento asfáltico reciclado (RAP) y distintas emulsiones asfálticas como una alternativa sustentable, cumpliendo con resultados de durabilidad y desempeño.

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 Asfalto

Según la *American Society for Testing and Materials*, o ASTM (en inglés) (1991), el asfalto se define como un material que cementa que varía de color negro a pardo oscuro, este se licua gradualmente al calentarse, cuyos constituyentes son betunes que se dan en la naturaleza de forma sólida o semisólida o se obtienen de la destilación del petróleo. En la figura 1 se muestra como es el asfalto en su forma líquida.



*Fig. 1. Asfalto líquido*

### 2.2 Clasificación de los materiales asfálticos

Según la NOM N·CMT·4·05·001/05, el asfalto se emplea en la elaboración de carpetas, riegos estabilizaciones y morteros ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o subbases. Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica la Tabla 1.

*Tabla 1. Clasificación de materiales asfálticos. Fuente: NOM N·CMT·4·05·001/05*

Material de asfalto	Aplicación en	Usos
Cemento	Calor	Fabricación de morteros, carpetas y estabilizaciones
Emulsión	Agua	Se utiliza en temperatura fría de morteros, carpetas, riegos
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en temperatura fría de impregnación de subbases, carpetas y bases hidráulicas.



### **2.2.1 Cemento asfáltico**

Son asfaltos obtenidos del proceso de la destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

### **2.2.2 Asfalto rebajado**

Los asfaltos rebajados regularmente se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de bases y subbases hidráulicas, son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente.

### **2.2.3 Emulsión asfáltica**

Son materiales asfálticos líquidos, constituidos por doble fase, en los que la fase de la emulsión está formada por agua y un agente emulsificador, y la fase discontinua por pequeños glóbulos de asfalto. Se clasifican en emulsiones asfálticas catiónicas cuando un agente emulsificador confiere carga positiva a los glóbulos y las emulsiones aniónicas son cuando les confiere carga negativa.

Las emulsiones, tanto catiónicas como aniónicas, pueden ser de los siguientes tipos de acuerdo con su rompimiento, indicándose a continuación sus usos más comunes:

- De rompimiento rápido
- De rompimiento rápido de baja viscosidad
- De rompimiento medio
- De rompimiento lento



- De *rompimiento lento para riegos de impregnación*
- De *rompimiento lento para riegos de impregnación*
- De *rompimiento lento*
- De *rompimiento lento, sobre-estabilizada*

Si usan asfaltos modificados con polímero, las emulsiones catiónicas asfálticas se clasifican en:

- De *rompimiento rápido de alta viscosidad ECR-68P*
- De *rompimiento rápido de baja viscosidad ECR-65P*
- De *rompimiento rápido de baja viscosidad ECR-45P*
- De *rompimiento controlado, rápido o lento ECCR-62P y ECCL-62P*
- De *rompimiento lento ECL-62P*

Según su contenido asfáltico en masa, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas catiónicas, aniónicas y catiónicas modificadas, se clasifican como se indican en las tablas 2 - 4, las cuales se muestra a continuación.

Tabla 2. Clasificación de las emulsiones asfálticas catiónicas

Tipo	Contenido de asfalto (%)	Tipo	Carga
ECR-45	45	Rompimiento rápido	Catiónica (+)
ECR-60	60		
ECR-65	65		
ECR-68	68		
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECL-50	50	Rompimiento lento para impregnación	
ECS-60	60	Rompimiento lento sobre estabilizada	

Tabla 3. Clasificación de las emulsiones asfálticas aniónicas

Tipo	Contenido de asfalto (%)	Tipo	Carga
EAR-60	60	Rompimiento rápido	Aniónica (-)
EAR-65	65		
EAM-60	60	Rompimiento medio	
EAM-65	65		
EAL-60	60	Rompimiento lento	
EAL-65	65		
EAI-40	40	Rompimiento lento para impregnación	

Tabla 4. Clasificación de las emulsiones asfálticas modificadas con polímero

Tipo	Contenido de cemento asfáltico en masa (%)	Tipo	Carga
ECR-45P	45	Rompimiento rápido	Catiónica (+)
ECR-65P	65		
ECR-68P	68		
ECCR-62P	62	Rompimiento rápido controlado	
ECCL-62P	62	Rompimiento lento controlado	
ECL-62P	62	Rompimiento lento	

### 2.3 Mezcla asfáltica

Según la norma N·CMT·4·05·003/02, una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución de un material pétreo en uno asfáltico.

Las mezclas asfálticas, según el procedimiento de fabricación se clasifican como mezclas calientes, semi- templadas, templadas y frías (ver figura 2).

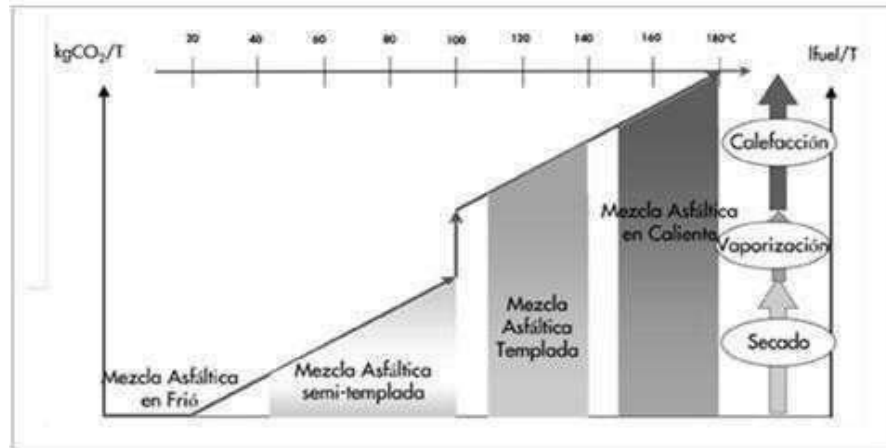


Fig. 2. Clasificación de mezclas asfálticas por temperatura de fabricación (Fuente: Porot, 2008).

### 2.3.1 Clasificación de las mezclas asfálticas

**Mezclas asfálticas en caliente.** se refieren a aquellas que se realizan utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos en una planta mezcladora estacionaria o móvil. Esta planta cuenta con el equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla.

**Mezclas asfálticas en frío.** Son elaboradas en temperatura fría, utilizando emulsiones asfálticas o también asfaltos rebajados y agregados una planta de mezcla móvil, (N·CMT·4·05·003/08).

**Mezclas asfálticas templadas.** Denominadas en inglés “HWMA” (*Half-Warm Mix Asphalt*), permiten reducir drásticamente la temperatura de fabricación y puesta en obra por debajo de 100°C, ya que se fabrican, extienden y compactan generalmente entre 70°C y 95°C.

Estas mezclas están compuestas por agregados graduados calentados a temperaturas inferiores a 100°C y una emulsión adecuada para recubrir totalmente dichos agregados, si bien también se puede emplear métodos de espumación del asfalto por vía directa o indirecta. Las mezclas templadas presentan importantes ventajas medio ambientales y constituirán en un futuro no muy lejano una alternativa eficaz para la fabricación y puesta en obra.



La mezcla asfáltica templada con alguna emulsión se define como la unión homogénea de material pétreo (incluido el agregado fino o el material procedente de la demolición de pavimento asfáltico), una emulsión de asfalto como ligante y eventualmente aditivos, que es fabricada a una temperatura inferior a 100°C.

## **2.4 Materiales**

### **2.4.1 Agregados**

Son parte fundamental en las características mecánicas de la mezcla y, específicamente en las capas de rodadura, juegan un papel importante en su funcionalidad. Es por ello por lo que estos materiales para ser utilizados en su combinación con las emulsiones deben poseer una serie de características que permitan asegurar la adhesividad entre el árido y la emulsión. Los agregados, trabajan con una componente de rozamiento interno para soportar las cargas a compresión. Por lo tanto, es importante exigirles una dureza adecuada para evitar degradaciones por las sollicitaciones del tráfico. Dado que la adhesividad agregado-ligante, está condicionada por la naturaleza de ambos materiales, es importante determinar tanto sus características físicas como químicas.

Las características del agregado a considerar son dureza, resistencia al pulimiento, forma y angulosidad de las partículas, granulometría, limpieza, equivalente de arena y composición mineralógica (León, 2010).

## **2.5 Pavimentos**

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados (Farinango, 2014).

Las capas del pavimento han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada (Monsalve, *et. al.*, 2012).



### 2.5.1. Características de los pavimentos

- **Flexibilidad:** Los pavimentos de asfalto son relativamente flexibles, lo que les permite adaptarse a los movimientos y cambios en la superficie del suelo. Esta flexibilidad ayuda a reducir la formación de grietas y deformaciones causadas por cargas y movimientos del terreno.
- **Resistencia al agua:** Los pavimentos de asfalto tienen una buena resistencia al agua. La mezcla asfáltica y el aglomerante bituminoso actúan como una barrera efectiva para el agua, evitando que penetre en las capas inferiores del pavimento y cause daños.
- **Rapidez de construcción:** La construcción de pavimentos de asfalto es generalmente más rápida en comparación con otros tipos de pavimentos. La mezcla asfáltica se puede calentar y mezclar rápidamente en una planta de asfalto y luego transportar al lugar de construcción para su aplicación y compactación.
- **Reparaciones y mantenimiento:** Los pavimentos de asfalto son relativamente fáciles de reparar y mantener. Las áreas dañadas o desgastadas pueden ser parcheadas o reparadas mediante la aplicación de capas adicionales de asfalto. El mantenimiento regular, como el sellado de grietas y el repavimentado periódico, ayuda a prolongar la vida útil del pavimento.
- **Superficie suave:** Los pavimentos de asfalto proporcionan una superficie continua, suave y uniforme para la conducción. Esto resulta en una experiencia de conducción más cómoda y reduce el ruido generado por el tráfico.
- **Reciclabilidad:** El asfalto es un material altamente reciclable. Se pueden reciclar y reutilizar los materiales asfálticos existentes para la construcción de nuevos pavimentos, lo que ayuda a reducir la demanda de nuevos recursos y el impacto ambiental.
- **Coste:** Los pavimentos de asfalto tienden a ser más económicos en comparación con algunos otros tipos de pavimentos. El costo inicial de construcción y mantenimiento suele ser más bajo, lo que los hace atractivos para proyectos con presupuestos ajustados. (Unifort, 2024).

### 2.5.2 Funciones

Un pavimento asfáltico debe de cumplir de funciones para cumplir en buena forma su utilización.



La función inicial (visible) de los pavimentos flexibles es proporcionar una superficie que sea segura, lisa y lo suficientemente duradera para el tránsito cual se prevé que se utilice durante la vida útil del diseño.

La función dos es la clave de distribuir las cargas de las llantas del vehículo sobre un área amplia debajo (subrasante) para que esta no se deforme bajo cargas repetidas. Por último, es importante proteger las capas inferiores del pavimento y la subrasante de cualquier efecto debilitador del agua (Tensar, 2024).

### 2.5.2 *Problemáticas del pavimento asfáltico.*

Cuando una mezcla asfáltica se incorpora a un pavimento, está expuesta a una serie de influencias que afectan su vida útil. Estas acciones están relacionadas principalmente con el tráfico de vehículos y el medio ambiente, los cuales tienen diferentes efectos sobre el daño de la mezcla asfáltica. Algunos de los deterioros son: la deformación permanente, agrietamiento por fatiga, agrietamiento por temperatura (Rico *et. al.*, 1998). A continuación, se describen dichos deterioros.

***Deformación permanente (Roderas).*** La deformación permanente se puede apreciar claramente como depresiones o canales en la trayectoria. Otros factores que afectan la apariencia de los pavimentos asfálticos son el espesor delgado del pavimento, la pérdida de material de la superficie rodante y deformaciones plásticas en la capa de asfalto (Rondón, 2009).

La deformación permanente (Figura 3) se caracteriza por una sección de superficie cruzada que ya no se encuentra en su posición de diseño. Se llama permanente porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga.

La aparición de roderas en la superficie de rodamiento, aparte de afectar la funcionalidad del pavimento representar un problema serio para quienes transitan por la vía que la cantidad de agua dentro de estas suele causar que se deslicen los neumáticos.

Es por esto por lo que se deben establecer términos permisibles de lo profundo de una rodera en función de las consideraciones de seguridad.

La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) clasifica las roderas en grados de severidad:

Hidroplaneo, Baja, Media y Alta



*Fig. 3. Pavimento con deformación permanente*

Para los investigadores es aquel que se asocia al hidroplaneo. Pavimentos con pendientes transversales del orden del 2 % y profundidades de rodera de aproximadamente 1.25 cm, son condiciones que se consideran suficientes para causar el hidroplaneo de un automóvil que viaje a una velocidad de 80 km/h o más (Garnica, 2005).

***Agrietamiento por Fatiga.*** Aunque una sola carga por lo general no causa grietas en el pavimento, las cargas repetidas pueden causar agrietamientos en las capas confinadas. Los esfuerzos cortantes y de tensión, así como las deformaciones confinadas, conducen a la formación de microgrietas.

Estas microgrietas acumuladas pueden dar lugar a macro fisuras visibles. Este proceso es llamado fatiga. Una señal temprana de agrietamiento por fatiga son las grietas longitudinales periódicas en las huellas de las llantas del tránsito.

Las fallas por fatiga son progresivas por las fallas iniciales en algún punto se combinan para causar múltiples fallas. Al avanzado rompimiento por fatiga se le conoce como “piel de cocodrilo”, ver la Figura 4 (Peña, 2007).



Fig. 4. “Piel de cocodrilo”. Agrietamiento por fatiga

**Agrietamiento por temperatura.** A temperaturas muy bajas, especialmente por debajo del punto de transición de cristalización del asfalto, la relajación de los esfuerzos de tensión inducidos térmicamente se produce muy lentamente. Por lo tanto, a medida que el camino se enfría, los esfuerzos de tensión aumentan y pueden superar la resistencia del asfalto.

En el asfalto, las grietas podrían aparecer y propagarse con los ciclos termales. Estos esfuerzos de tensión inducidos termalmente pueden también combinarse con esfuerzos de tensión inducidos por el tránsito causando agrietamiento.

Las grietas pueden ocurrir en la capa de cemento de un pavimento como resultado de los gradientes térmicos. Cuando la superficie del camino tiene mayor temperatura que la base, el gradiente térmico causará alabeo el cual será restringido por la capa estabilizada con cemento. Esto provocará un esfuerzo de tensión en la parte inferior de la capa estabilizada con cemento, lo que puede llevar el agrietamiento cuando se combina con los esfuerzos de tensión inducidos por el tránsito (Garnica, 2002).

## 2.6 Pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Pavimento asfáltico reciclado o recuperado (RAP) es el término que se le da a los materiales de pavimento removidos y/o reprocesados que contienen asfalto y agregados. Estos materiales se



generan cuando se retiran los pavimentos asfálticos para reconstrucción, repavimentación o para obtener acceso a servicios públicos enterrados. Cuando se tritura y tamiza correctamente, el RAP consiste en agregados bien clasificados y de alta calidad recubiertos con cemento asfáltico.

El pavimento asfáltico generalmente se elimina mediante fresado o eliminación total. El fresado implica la eliminación de la superficie del pavimento mediante una fresadora.

El retiro a profundidad implica rasgar y romper el pavimento usando un cuerno de rinoceronte en una topadora y/o martillos neumáticos. En la mayoría de los casos, el material roto se recoge y se carga en camiones de transporte mediante un cargador frontal y se transporta a una instalación central para su procesamiento.

En esta instalación, el RAP se procesa mediante una serie de operaciones que incluyen trituración, cribado, transporte y apilado. Aunque la mayoría de los pavimentos asfálticos viejos se reciclan en plantas centrales de procesamiento, los pavimentos asfálticos pueden pulverizarse en el lugar e incorporarse a capas base granulares o estabilizadas utilizando una máquina pulverizadora autopropulsada.

Los procesos de reciclaje in situ en caliente y en frío han evolucionado hasta convertirse en operaciones continuas que incluyen la eliminación parcial en profundidad de la superficie del pavimento, la mezcla del material recuperado con aditivos beneficiosos (como agregados vírgenes, aglutinantes y/o agentes suavizantes o rejuvenecedores para mejorar las propiedades aglutinantes), y así como colocar y compactar la mezcla resultante en una sola pasada

No todas las agencias estatales de carreteras ni las jurisdicciones locales ofrecen cifras confiables sobre la generación de RAP. Con base en datos incompletos, se estima que cada año se pueden producir hasta 41 millones de toneladas métricas (45 millones de toneladas) de RAP en los Estados Unidos (*Federal Highway Administration, 1995*).

### **2.6.1. Obtención del RAP.**

El RAP se obtiene de pavimentos o firmes envejecidos mediante la aplicación de dos técnicas principalmente: Demolición mecánica o Fresado.



El material obtenido con cada una tiene características diferentes que hacen que precisen un post tratamiento diferente en cada caso, para su aprovechamiento posterior en procesos de reciclado en el centro de producción.

- **Demolición mecánica:** Efectuada mediante levantamiento con pala o retroexcavadora, es una alternativa muy usada en demoliciones de firmes, en especial cuando no hay requisitos precisos de reutilización posterior del material en procedimientos de reciclado o necesidad de un saneo por fresado para sustitución de un determinado espesor del firme. Se genera así un material troceado por bloques, con una cierta heterogeneidad de tamaños, que necesitara un tratamiento posterior por trituración y clasificación. No obstante, este método, debe realizarse cuidando la contaminación del reciclado con agregados de las capas siguientes de la explanada, ya que puede condicionar su uso.
- **Fresado:** El fresado en frío es la técnica utilizada para retirar un determinado espesor de firme obteniéndose una superficie regular para el siguiente apoyo de otras capas de mezclas asfálticas. La granulometría y tamaño máximo del producto obtenido por fresado son función de las características y estado de integridad de la capa a fresar, de la velocidad de avance de la fresadora, del espesor de fresado y de las características de la fresadora y del tambor utilizado.
- **Fresado por capas:** En este se obtiene un reciclado homogéneo, fresando diferentes capas del firme y acopiando el material restante por separado. Este método tiene la gran ventaja que te permite la clasificación del RAP según distintas calidades de las capas de los firmes, permitiendo optimizar su uso; así el RAP de capas de rodadura y/o intermedia permitirá su reutilización en capas similares, cosa que no ocurriría si están mezclados con RAP de capas inferiores, de inferiores características, generalmente, en sus agregados. Mediante este proceso y tras un tratamiento de trituración y/o cribado, se pueden llegar a reutilizar altas tasas de RAP en la fabricación de las nuevas mezclas mediante la técnica de reciclado templado.
- **Fresado profundo:** Se procede a disgregar con el tambor de fresado todo el espesor necesario de pavimento que posteriormente se debe reponer, retirando varias capas de



diferentes mezclas bituminosas al mismo tiempo. Esta alternativa, conlleva un postratamiento mínimo que puede consistir en una simple clasificación del RAP, con reducción o rechazo de tamaños superiores (Fabela, 1999).

### **2.6.2 Aplicaciones**

**Reciclaje.** La mayor parte del reciclado del pavimento asfáltico que se produce se recicla, sin embargo, no siempre en el presente año en que se produce. El RAP casi siempre se devuelve a la estructura de la carretera de alguna forma, generalmente incorporado a la pavimentación de asfalto mediante reciclaje en caliente o en frío, pero a veces también se usa como agregado en la construcción de bases o subbases.

Se ha estimado que hasta aproximadamente 33 millones de toneladas métricas (36 millones de toneladas), o entre el 80 y el 85 por ciento del exceso de concreto asfáltico que se genera actualmente, se utiliza como parte de la mezcla asfáltica en caliente reciclada, en mezclas en frío, o como agregado en materiales base granulares o estabilizados. Parte del RAP que no se recicla o usa durante la misma temporada de construcción en la que se genera se almacena y eventualmente se reutiliza.

**Desecho.** El exceso de concreto asfáltico se elimina en vertederos o, en ocasiones, en el derecho de vía. En la mayoría de las situaciones, esto ocurre cuando se trata de pequeñas cantidades, o cuando el material está mezclado con otros materiales, o no hay instalaciones disponibles para recolectar y procesar el RAP. Se estima que la cantidad de concreto asfáltico sobrante que se debe eliminar es menos del 20 por ciento de la cantidad anual de RAP que se genera.

- **Fuentes de mercado.** La mezcla asfáltica en caliente reciclada puede ser obtenida de centrales en donde se procesa el RAP, en este, los pavimentos flexibles se trituran, criban y se guardan para utilizarlos en la producción de concreto asfáltico, mezcla en frío o como material base granular o estabilizado (ATEB, 2020).



### ***2.6.3 Acopio del RAP***

A la central de fabricación de la mezcla asfáltica, podrán llegar materiales procedentes de firmes y pavimentos envejecidos de distintos orígenes y características según el tipo de material, tipo de mezcla fresada y la técnica de obtención utilizada. Este aspecto es fundamental y hay que tenerlo muy en cuenta a la hora de proceder a su almacenamiento ya que con esta operación se puede minimizar heterogeneidades en el material, lo cual es fundamental para la calidad final de la nueva mezcla templada reciclado (FHWA, 2016).



#### **2.6.4 Beneficios ambientales**

Los beneficios ambientales están asociados principalmente en el consumo de recursos y energía, así como en la comparación del resultado de un pavimento convencional y uno con RAP (Alkins, *et. al.*, 2008).

- Recursos naturales: el beneficio del reciclaje de pavimentos es la reducción de la utilización de recursos naturales.
- Reutilizar el agregado existente de un pavimento puede sólo requerir entre 1% al 3% de asfalto adicional, comparado contra un 6% necesario para un pavimento nuevo (Abad, 2016).
- Consumo de energía: en términos de transportación, el RAP logra disminuir el número de viajes ya que requiere una menor cantidad de agregados vírgenes de banco debido al reúso de materiales. Por lo tanto, al reducir los viajes de camión, se obtiene un consumo de energía menor (Copeland, 2011).

Emisiones contaminantes: La elaboración de mezclas asfálticas propaga gases que contaminan, derivados del uso de químicos. Es por ello, que se tienen daños a la salud (Frederick, *et. al.*, 2009).

- Residuos: al no utilizar el producto existente en un pavimento, se convierte en desperdicio. Estudios muestran que el método tradicional de rehabilitación genera 1.63 veces más residuos que el método de reciclado en sitio (Contreras, 2014).

### **2.7 Método de diseño**

#### **2.7.1 Superpave**

*Superpave* (Pavimentos Asfálticos de Rendimiento Superior; significado en español) es un producto de la investigación sobre asfalto del SHRP.

Los tres componentes principales de *Superpave* son la especificación del ligante asfáltico, el diseño de la mezcla y el sistema de análisis según la especificación del ligante asfáltico *Superpave*, AASHTO M320, y las pruebas que utiliza para caracterizar los ligantes asfálticos (*Superpave*, 2003).



- ***Grado PG.***

El grado de desempeño (Performance Grade) se refiere al intervalo de temperaturas, desde la más alta hasta la más baja, dentro del cual un cemento asfáltico —ya sea convencional o modificado— puede funcionar de manera eficiente. Esta clasificación facilita la elección del tipo de asfalto más adecuado para un proyecto vial específico, considerando factores como el clima predominante, el volumen de tráfico previsto y la velocidad promedio a la que circularán los vehículos durante la vida útil de la carretera. (N·CMT·4·05·004/05).

Tabla 5. Requisitos para calidad de cementos asfálticos de acuerdo al grado de desempeño (PG) y al nivel de ajuste.

Fuente: N-CMT-4-05-004/05.

GRADO DE DESEMPEÑO (PG)	PG 64		PG 70		PG 76		PG 82	
	-16	-22	-16	-22	-16	-22	-16	-22
Temperatura máxima del pavimento <sup>[1]</sup> , °C	≤ 64		≤ 70		≤ 76		≤ 82	
Temperatura mínima del pavimento <sup>[1]</sup> , °C	≥ -16		≥ -22		≥ -16		≥ -22	
<b>Cemento asfáltico original</b>								
Punto de inflamación Cleveland <sup>[2]</sup> , °C, mín.	230							
Viscosidad rotacional 135°C <sup>[2]</sup> , Pa·s, máx.	3							
Punto de reblandecimiento <sup>[2]</sup> , °C, mín.	48				55			
Separación, diferencia anillo y esfera <sup>[2]</sup> , °C, máx.	-				2			
Recuperación elástica por torsión 25°C <sup>[2]</sup> , %, mín.	-				35			
Modulo reológico de corte dinámico <sup>[2]</sup> (G*/sen δ) <sup>[2]</sup> , kPa, mín.	1,0							
- Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64		70		76		82	
<b>Después de envejecimiento en horno RTFO <sup>[2]</sup></b>								
Pérdida por calentamiento <sup>[2]</sup> , %, máx.	1,0							
Recuperación elástica en ductilometro <sup>[5]</sup> , 25°C, %, mín.	-				75			
Modulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) <sup>[2]</sup> , kPa, mín.	2,2							
- Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64		70		76		82	
Traffic Normal "S", Nivel de Ajuste (MSCR) <sup>[3]</sup>	4,0							
- Jnr a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][14]</sup> , kPa-1, máx.	4,0							
- Temperatura de prueba, °C	64		70		76		82	
- Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][6]</sup> , %, mín.	-				25			
Traffic Alto "H", Nivel de Ajuste (MSCR) <sup>[3]</sup>	2,0							
- Jnr a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][14]</sup> , kPa-1, máx.	2,0							
- Temperatura de prueba, °C	64		70		76		82	
- Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][6]</sup> , %, mín.	-				25			

**Protocolo AMAAC.** En 2013, la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) dio a conocer el documento PA-MA 01/2013, un protocolo enfocado en el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa con alto rendimiento. Este enfoque surge como una evolución del sistema SUPERPAVE, originalmente desarrollado en Estados Unidos, pero ajustado para responder a las condiciones específicas del entorno mexicano, tanto en términos climáticos como de infraestructura vial.

Para cada nivel de evaluación, el protocolo especifica un conjunto de pruebas de laboratorio que deben llevarse a cabo a efecto de validar los diseños (AMAAC, 2013).



Fig. 5. Niveles protocolo AMAAC. Fuente: Solorio R., Garnica P., Hernández R., 2018.

### 2.7.2 Diseño de Mezcla Balanceado (BMD)

Derivado de las fallas más comunes que presenta un pavimento asfáltico, el antiguo Grupo de Tecnologías de Expertos (*Expert Technologies Group*, o ETG, por sus siglas en inglés) en Mezclas y Construcción de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) formó un Grupo de Trabajo de Diseño de Mezclas Equilibradas con el fin de realizar un diseño balanceado de mezclas (*Balanced Mix Design*, o BMD, por sus siglas en inglés).

Este se basa en la utilización de la prueba de deformación permanente (rueda cargada de Hamburgo, AASHTO T 324 (AASHTO, 2019) para obtener un contenido máximo de asfalto más allá del cual comúnmente se mostraran fallas de deformación permanente y una prueba de agrietamiento (*Indirect tensile asphalt cracking test*, ASTM D8225-19 (ASTM, 2019) que indicaría un contenido mínimo de asfalto por debajo del cual podrían mostrarse fallas por agrietamiento, este concepto se conoce como diseño de mezcla balanceado (*National Asphalt Pavement Association*, 2021).

Diseño balanceado proceso:

- Elección de materiales



- Selección de formulación de trabajo
- Análisis de mezcla asfáltica

Diseño balanceado metodología en diseño volumétrico

- Validación de desempeño
- Optimización de desempeño
- Modificación de desempeño

### 3. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo un análisis del pavimento asfáltico reciclado (RAP) obtenido en el kilómetro 4 de la vía Zapotlanejo–Guadalajara, en el estado de Jalisco, con el propósito de incorporarlo en el desarrollo de mezclas asfálticas templadas utilizando emulsiones modificadas, así como en una mezcla en frío. Dado que actualmente no existe una regulación específica en México para el diseño y evaluación de mezclas templadas que empleen exclusivamente RAP, este estudio adoptó un enfoque de diseño balanceado. Para validar su desempeño, se aplicaron ensayos conforme a los lineamientos establecidos en el protocolo PA-MA 01/2013 de la Asociación Mexicana del Asfalto, orientado al diseño de mezclas densas de alto rendimiento.

Tal como se muestra en la *Figura 6*.



*Fig. 6. Diagrama del diseño balanceado con enfoque en diseño por desempeño. Fuente: Yin, 2021.*

Como primer paso, se llevó a cabo la determinación del contenido más adecuado tanto de emulsión asfáltica como de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para el desarrollo de las mezclas asfálticas. La selección se realizó a partir de pruebas de desempeño aplicadas a tres proporciones distintas de emulsión, utilizando métodos como la resistencia a la humedad (TSR), el módulo resiliente ( $M_r$ ), el ensayo IDEAL-CT, la construcción de la Curva Maestra del Módulo Dinámico, y la evaluación de la fatiga mediante el ensayo de flexión en viga de cuatro puntos. Todo este proceso se resume en el esquema presentado en la Figura 7.

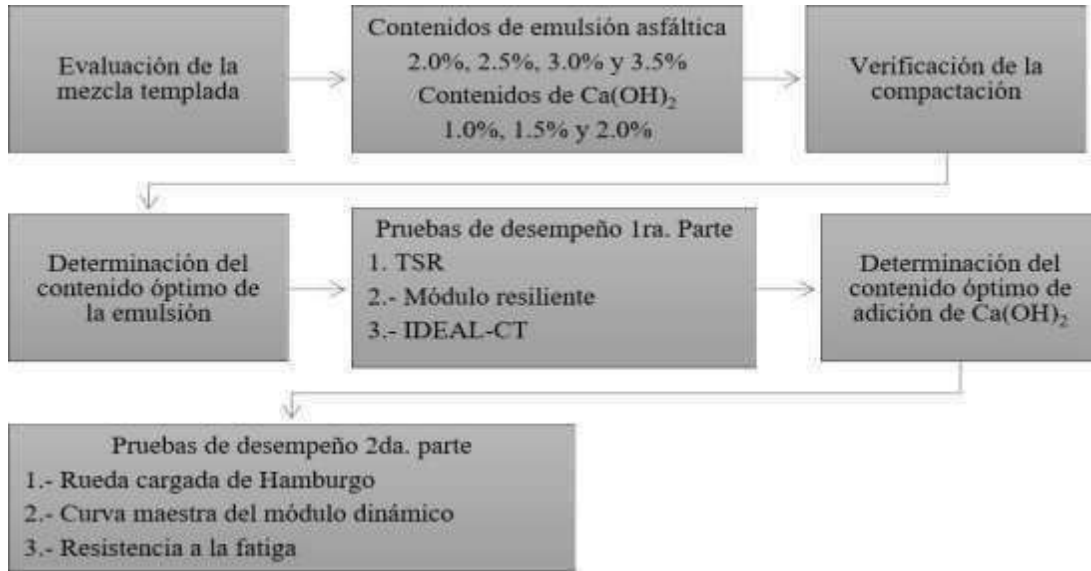


Fig. 7. Proceso propuesto para elección de contenidos óptimos.

Una vez definido el contenido más adecuado de emulsión asfáltica y de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), se procedió al diseño de mezclas asfálticas templadas y en frío, utilizando exclusivamente material reciclado (RAP) y diferentes tipos de emulsiones modificadas. Con estas mezclas se elaboraron especímenes para someterlos a una serie de pruebas mecánicas que permitieran evaluar su comportamiento. Entre los ensayos aplicados se encuentran: la prueba de Rueda Cargada de Hamburgo (HWT), los métodos de evaluación de energía de fractura mediante IDEAL-CT y DCT, el análisis del Módulo Dinámico tanto puntual como a través de la curva maestra, y la resistencia a la fatiga mediante el ensayo de flexión en viga de cuatro puntos. Todo el procedimiento se resume en el esquema mostrado en la Figura 8.

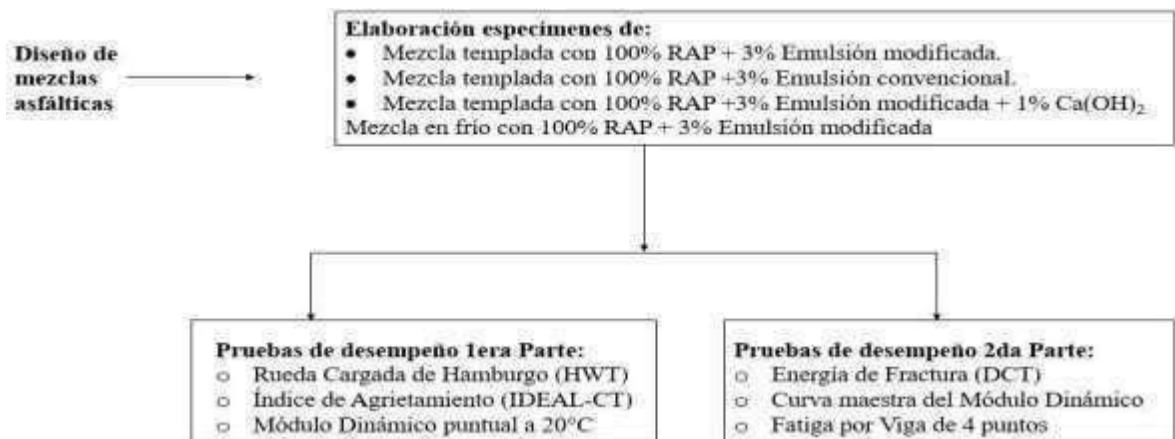


Fig. 8. Diagrama para diseño de mezclas asfálticas.



### 3.1 Materiales

Se llevó a cabo un estudio del ligante asfáltico presente en el material reciclado (RAP), utilizando el equipo Reflux Extractor H-1495 para realizar la extracción. Este procedimiento se basó en un sistema de recirculación que combina evaporación y condensación, empleando como solvente tricloroetileno ( $C_2HCl_3$ ), siguiendo el método B establecido en la norma ASTM D2172. Para recuperar el ligante del solvente utilizado, se aplicó un proceso de filtrado con el fin de eliminar partículas finas (filler), y posteriormente se utilizó un Rotovapor con inyección de nitrógeno ( $N_2$ ), conforme a lo indicado en la norma ASTM D5404. Una vez recuperado el ligante, se procedió a evaluar su comportamiento mediante la clasificación por Grado de Desempeño (PG), conforme a los lineamientos de la norma mexicana N·CMT·4·05·004/08, que establece los criterios de calidad para cementos asfálticos según su desempeño.

#### 3.1.1 Agregados pétreos

En la fabricación de la mezcla asfáltica templada para este estudio, se usó totalmente pavimento asfáltico reciclado del RAP fresado en la Carr. Zapotlanejo-Guadalajara Km. 4, Jalisco. La granulometría cumplió con los límites establecidos en la norma N·CMT·4·02·003/21 de la SICT para bases de mezcla asfáltica (base negra), con una fracción única de  $\frac{3}{4}$ " (19mm) a finos, retirando el material retenido en malla de una pulgada por medio de cribado (Tabla 6). Para el análisis granulométrico del RAP, se utilizó el material tal como se recuperó, sin haber sido sometido a procesos de incineración. En cuanto a la mejora del contenido de finos, se incorporó hidróxido de calcio —también conocido como cal hidratada— con una pureza del 90%. En una de las formulaciones de mezcla asfáltica, se integró este aditivo en una proporción del 1.0% respecto al peso total de los agregados.

Tabla 6. Los criterios granulométricos para base ( $\Sigma L > 106$ ) definidos en la norma N·CMT·4·02·003/21 emitida por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT).

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^0$	$\Sigma L \geq 10^0$
37.5	1 ½ in	100	100
25	1 in	90 - 100	90 - 100
19	¾ in	76 - 100	76 - 100
9.5	3/8 in	42 - 100	42 - 100
4.75	Nº4	24 - 100	24 - 70
2	Nº10	10 - 90	10 - 27
0.85	Nº20	5 - 65	5 - 14
0.425	Nº40	4 - 47	4 - 10
0.25	Nº60	2 - 35	2 - 8
0.15	Nº100	1 - 25	1 - 7
0.075	Nº200	0 - 15	0 - 6

$\Sigma L$  = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8, 2 t, esperado durante la vida útil.



### 3.1.2 Emulsiones asfálticas

En el estudio se analizaron dos emulsiones desarrolladas por Ergon Asfaltos México. La primera corresponde a una emulsión asfáltica convencional de rompimiento medio, identificada como ECM 65-110. La segunda es una emulsión especialmente modificada con aditivos, diseñada para su aplicación en mezclas templadas, conocida como EARA-2P. Las propiedades técnicas de ambas formulaciones se detallan en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Evaluación de ECM 65-110 (Emulsión convencional)

Prueba	Método de prueba	Valor obtenido
<b>Pruebas a la emulsión asfáltica</b>		
Contenido asfáltico, destilación %	ASTM D 6997	65.9
Viscosidad Saybolt Furol, SSF, 50°C	ASTM D 7496	27.8
Retenido en malla no. 20, %	ASTM D 6933	0.0000
Asentamiento a 5 días, %	ASTM D 6930	0.35
<b>Pruebas al residuo, obtenido por destilación</b>		
Penetración 25°C, 1/10 mm	ASTM D5	134.0
Ductilidad 25°C, 5cm/min	ASTM D113	>100

Tabla 8. Evaluación de la emulsión modificada formulada por Ergon Asfaltos México EARA 2P.

Prueba	Método de prueba	Valor obtenido
<b>Pruebas a la emulsión asfáltica</b>		
Contenido de cemento asfáltico, 204°C, %	ASTM D 6997	63.2
Contenido de aceite destilado, 204°C, %	ASTM D 6997	0.5
Viscosidad Saybolt Furol 25°C, SSE	ASTM D 7496	35.0
Retenido en malla no. 20, %	ASTM D 6933	0.0000
Asentamiento a 5 días, %	ASTM D 6930	0.20
<b>Pruebas al residuo, obtenido por destilación</b>		
Punto de reblandecimiento, °C	ASTM D 36	28.10
Jnr 0.1kPa <sup>-1</sup> , 40°C	ASTM D 7405-20	1.49
R, 0.1kPa, 40°C, %	ASTM D 7405-20	46.44
Jnr 3.2kPa <sup>-1</sup> , 40°C	ASTM D 7405-20	2.72
R, 3.2kPa, 40°C, %	ASTM D 7405-20	22.94
G <sup>o</sup> /sen δ, 40°C, KPa	ASTM D 7175-15	2.60
Angulo de fase, 40°C, °	ASTM D 7175-15	73.10

### 3.1.3 Diseño de Mezclas asfálticas

Mezclas templadas:

- Mezcla asfáltica compuesta exclusivamente por material reciclado (RAP), al que se le incorporó un 3% de emulsión asfáltica convencional del tipo ECM 65-110 como agente ligante.
- Mezcla asfáltica con 100% de RAP, pero esta vez con la adición de un 3% de emulsión modificada EARA 2P, diseñada para mejorar la cohesión y el desempeño mecánico de la mezcla.
- Mezcla asfáltica con 100% RAP y emulsión EARA 2P (3%), a la que se le añadió un 1% de hidróxido de calcio [Ca(OH)<sub>2</sub>] como aditivo mineral, con el objetivo de optimizar la reactividad de los finos y mejorar la estabilidad química del sistema.

Mezcla asfáltica en frío:

- Mezcla asfáltica 100% RAP con 3% de emulsión EARA 2P.

### 3.2 Equipos

- Un sistema de cribado de partículas mediante tamizadora Gilson, modelo TS-1, con número de serie TS1-20521, utilizado para la separación granulométrica de los agregados.
- Un horno de laboratorio de la serie LBB/LEB de la marca Despatch.
- Una balanza de alta precisión Explorer de la marca Ohaus.
- Mezcladora de laboratorio marca Troxler
- Compactador giratorio Servopac de IPC Global.
- Dispositivo de ensayo de rueda cargada de Hamburgo, también de la marca Troxler.
- Equipo para la determinación del módulo dinámico.
- Sistema de prueba IDEAL-CT.
- Equipo DCT (Disk-shaped Compact Tension).

### 3.3 Extracción del material asfáltico del RAP

Se tomó una muestra representativa de 1 kg para la extracción del asfalto del RAP (Figura 9) y conocer su clasificación por grado de desempeño.



*Fig. 9. Pavimento asfáltico reciclado.*

El material RAP fue sometido a un proceso de tamizado utilizando una malla número 10, con el propósito de separar las partículas finas tipo arena y facilitar el posterior proceso de filtración. Para la etapa de extracción, se empleó el equipo tipo Reflux, en cuyo cono se colocó previamente papel filtro. RAP previamente tamizado se introdujo cuidadosamente. Se llevó a cabo la recuperación del ligante asfáltico presente en el RAP mediante un proceso de extracción por disolución, utilizando tricloroetileno ( $C_2HCl_3$ ) como solvente. Para garantizar condiciones seguras durante la manipulación del reactivo, se emplearon guantes y mascarilla, y se vertió el solvente cuidadosamente hasta llenar el cono del equipo.

El sistema se activó configurando la temperatura de ebullición entre 150 y 175 °C, mientras que el condensador se mantuvo en un rango de 10 a 15 °C para facilitar la recirculación del solvente. El proceso se prolongó durante un periodo continuo de 4 horas. Al concluir el ciclo, la separación por densidad permitió que el ligante recuperado se desplazara hacia la parte inferior del sistema, desde donde fue recolectado en un recipiente para su posterior análisis, tal como se ilustra en la Figura 10.



*Fig. 10. Proceso de extracción del asfalto del RAP.*

### ***Concentración del asfalto***

Durante la etapa final del proceso de recuperación, se efectuó la separación del ligante asfáltico del solvente tricloroetileno, que había sido utilizado como medio de extracción. Para garantizar la pureza del material recuperado y evitar la presencia de partículas residuales, se aplicó un filtrado complementario utilizando papel filtro. Este paso permitió eliminar los finos remanentes, asegurando que el asfalto obtenido estuviera libre de impurezas (Figura 11)



*Fig. 11. Filtrado de la extracción del RAP.*

- Tras el filtrado, se efectuó una separación en una única etapa utilizando el rotovapor, conforme a la normativa establecida.



### 3.4 Prueba de Recuperación del Asfalto usando el Evaporador Rotatorio “ASTM D 5404 – 03 Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator”.

El objetivo es separar el asfalto del agregado con un solvente y recuperarlo sin alterar sus propiedades esenciales.

#### Equipo

- Evaporador Rotatorio: equipado con un matraz de destilación, un motor de velocidad variable capaz de hacer girar el matraz de destilación a una velocidad de al menos 50 rpm, un condensador, un matraz de recuperación de disolvente y un baño de aceite calentado.
- Manómetro
- Flujo de gas capaz de indicar un flujo de hasta 1000 mL/min.
- Recipiente de muestra, que tenga un volumen adecuado para contener la muestra (asfalto) y el disolvente añadido
- Sistema de vacío, capaz de mantener un vacío dentro de 60,7 kPa 80 kPa.

#### Reactivos y materiales

- Gas nitrógeno
- Solvente: Tricloro - etileno grado reactivo

#### Método de prueba

- Primeramente, Se calentó el baño de aceite a 145 °C y se introdujo la solución de asfalto con solvente en el matraz. Se aplicó un vacío de 5.3 kPa y se mantuvo un flujo de nitrógeno de 500 mL/min para generar un ambiente inerte libre de oxígeno.

Luego, El matraz se giró a 40 rpm y se sumergió en el baño térmico, iniciando la separación. Tras la destilación del solvente, se aumentó la inmersión y se aplicó gradualmente un vacío de 80 kPa. Una vez que el solvente se recolectó en el matraz y que no hubo más condensación, el ciclo terminó, como se muestra en la Figura 12.



Fig. 12. Proceso de la concentración del asfalto extraído del RAP.

### **3.5 Clasificación según el Grado de Desempeño (PG) del material asfáltico recuperado del RAP utilizando distintas pruebas de laboratorio**

#### **3.5.1 Prueba de Envejecimiento del Cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO) (M·MMP·4·05·027/22).**

El objetivo de esta prueba permite mediante el efecto de calor y aire aplicados a una película de cemento asfáltico semisólido, obtener un residuo que simula los efectos del envejecimiento a corto plazo que ocurre durante el transporte, mezclado, tendido y compactación de la mezcla asfáltica, a fin de determinar, a partir de la medición de la viscosidad y sus características reológicas, el efecto del envejecimiento.

#### **Equipo**

- Horno Rotatorio de Película Delgada
- Balanza
- Horno

## Método de prueba

- La muestra de cemento asfáltico, extraída del residuo de pavimento reciclado, se calentó en horno a una temperatura inferior a 150 °C, el tiempo justo para lograr su fluidez total. Posteriormente, se mezcló manualmente procurando no introducir aire.
- Se colocaron  $35 \pm 0.5$  g de asfalto en cada recipiente de vidrio, según lo ilustrado en la Figura 13.



*Fig. 13. Vertimiento de asfalto a recipiente RTFO.*

- Tras verter la muestra en los recipientes de vidrio, se colocaron en posición horizontal y se rotaron lentamente para cubrir uniformemente la superficie interna.
- Finalmente, los recipientes se ubicaron horizontalmente sobre una rejilla limpia, en ambiente controlado sin corrientes de aire ni fuentes de calor cercanas, como se indica en la Figura 14.



*Fig. 14. Recipientes RTFO en rejilla de enfriamiento.*

- Con el horno rotatorio ajustado a  $163 \pm 0.5$  °C y un flujo de aire de  $4000 \pm 200$  mL/min, se colocaron los recipientes con la muestra en el carrusel, asegurando una distribución uniforme para evitar desequilibrios. Luego se cerró el horno y se hizo girar el carrusel del equipo RTFO a una revolución de  $15 \pm 0.2$  rpm, tal como se muestra en la Figura 10.



*Fig. 15. Colocación de recipientes RTFO.*

- Las muestras se mantuvieron en el horno durante 85 minutos, con el flujo de aire constante y el carrusel en movimiento, como se indica en la Figura 16.



*Fig. 16. Envejecimiento del residuo asfáltico en el RTFO.*

- El residuo fue extraído de cada recipiente de vidrio, y las pruebas correspondientes se efectuaron dentro de las 72 horas posteriores a su obtención.



### **3.5.2 Prueba de Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV) (M·MMP·4·05·028/22).**

Esta prueba reproduce los efectos del envejecimiento prolongado por oxidación en el cemento asfáltico, permitiendo analizar sus variaciones reológicas.

#### **Equipo**

- Vasija de envejecimiento a presión PAV
- Mecanismo de control de presión y temperatura
- Bandejas de acero inoxidable de forma cilíndrica con un diámetro interior de  $140 \pm 1$  mm y  $9.5 \pm 1.5$  mm de profundidad, con un espesor de metal de aproximadamente 0.6 mm y fondo plano.
- Balanza
- Hornos de vacío
- Sistema de vacío
- Balanza Analítica
- Cronómetro de reloj
- Recipiente de recolección
- Herramienta de recuperación
- Varilla
- Nivel
- Encendedor
- Equipo de seguridad
- Aire embotellado comercial

#### **Método de prueba**

##### Pre calentamiento de la Vasija de Presión PAV

- Se introdujo el soporte para bandejas en la vasija de presión, y a continuación se procedió con la colocación de las muestras según el protocolo establecido.
- Las vasijas de presión se introdujeron en el equipo y se pre calentaron a una temperatura  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  superior a la de acondicionamiento.

### Obtención y acondicionamiento del cemento asfáltico en las bandejas

- Para esta evaluación se utilizó el residuo de cemento asfáltico previamente envejecido mediante el método de horno rotatorio de película delgada (RTFO).
- Cada bandeja fue colocada sobre una balanza para dosificar  $50 \pm 0.5$  g de cemento asfáltico por envejecer, como se indica en la Figura 17. Durante el vertido, se procuró una distribución homogénea del material sobre toda la superficie, con el objetivo de formar una película de aproximadamente 3.2 mm de espesor.



*Fig. 17. Acondicionamiento de cemento asfáltico por envejecer.*

### Acondicionamiento del cemento asfáltico en la Vasija de Presión PAV

- Una vez alcanzada la temperatura de prueba, se extrajo el soporte para bandejas del interior de la vasija de presión.
- Las bandejas que contenían el cemento asfáltico por envejecer fueron instaladas en su soporte correspondiente y posteriormente introducidas en la vasija de presión, la cual fue cerrada para iniciar el proceso.
- Con base en la clasificación por grado de desempeño del cemento asfáltico, se aplicó el método de medición de rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas utilizando un reómetro de viga. La temperatura y la presión de aire dentro de la vasija se mantuvieron constantes durante  $20 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$ , como se indica en la Figura 18.



*Fig. 18. Equipo PAV.*

### Disminución de la temperatura en el PAV

- Al concluir el período de acondicionamiento de 20 horas, se procedió a reducir gradualmente la presión interna del PAV mediante la válvula de purga de aire. Esta se ajustó cuidadosamente para equilibrar las presiones interna y externa, evitando así la formación de espuma y el burbujeo excesivo en el cemento asfáltico.

### Eliminación de gases a las muestras envejecidas

- El horno de vacío fue precalentado a una temperatura de  $170 \pm 5$  °C, conforme a las condiciones requeridas para el procedimiento.
- Se extrajo el soporte con las bandejas del interior de la vasija de presión PAV, conforme al procedimiento ilustrado en la Figura 19.



*Fig. 19. Retiro de bandejas PAV.*

- Se Las bandejas fueron retiradas de su soporte y colocadas en un horno a  $168 \pm 5$  °C durante  $15 \pm 1$  min, conforme al procedimiento ilustrado en la Figura 20.



*Fig. 20. Muestras envejecidas en el horno.*

- Tras retirar las bandejas del horno, se extrajo el residuo caliente de cada una utilizando una espátula, depositándolo en un único recipiente de recolección (Figura 21).



*Fig. 21. Obtención de cemento asfáltico envejecido.*

- Tras la extracción del asfalto de la última bandeja, estas se colocaron temporalmente en un horno ajustado a  $168\text{ }^{\circ}\text{C}$  para preservar la temperatura del material.
- Una vez preparados todos los recipientes, se trasladaron al horno de vacío en un lapso no mayor a 1 minuto, conforme al procedimiento ilustrado en la Figura 22.



*Fig. 22. Muestras envejecidas en Horno de Vacío.*

- Tras colocar el último recipiente de recolección en el horno de vacío, el material fue calentado a  $170 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante  $15 \pm 1\text{ min}$ . Luego, se abrió rápidamente la válvula del sistema de vacío para reducir la presión absoluta a  $15 \pm 2.5\text{ kPa}$  durante  $30 \pm 1\text{ min}$ . Finalmente, se liberó el vacío y se retiró el recipiente del horno.

### **3.6 Prueba de Módulo Reológico de Corte Dinámico (M·MMP·4·05·025/02)**

El propósito de esta prueba es determinar el módulo reológico de corte dinámico y el ángulo de fase, como parámetros representativos del comportamiento viscoelástico lineal del cemento asfáltico, mediante la aplicación de esfuerzos de torsión a una muestra utilizando un reómetro dinámico de corte.

#### **Equipo**

- Reómetro de Corte Dinámico (DSR)
- Plato base



- Platos oscilatorios:  
Se emplearon platos metálicos de superficie pulida, con diámetros de  $8 \pm 0.05$  mm o  $25 \pm 0.05$  mm. El plato de 8 mm se recomienda para ensayos a aproximadamente  $40$  °C, mientras que el de 25 mm es adecuado para temperaturas más elevadas. Es preferible que estos platos cuenten con una pestaña o anillo perimetral de 2 a 5 mm de altura, lo cual facilita el recorte de la muestra y mejora la repetibilidad del ensayo.
- Cámara ambiental: El sistema debe ser capaz de controlar la temperatura de la muestra con una precisión de  $\pm 0.1$  °C, utilizando medios térmicos como gas o líquido —por ejemplo, nitrógeno o agua— que no alteren las propiedades del material. En caso de emplear agua, se requiere un secador para evitar la condensación en los platos y accesorios, así como la formación de hielo en condiciones de temperatura bajo cero.
- Controlador de temperatura: El sistema debe mantener la temperatura de la muestra con una precisión de  $\pm 0.1$  °C, dentro de un rango operativo de  $5$  °C a  $85$  °C, garantizando condiciones térmicas estables durante la ejecución de la prueba.
- Detector de temperatura: Se empleó un detector de resistencia térmica (RTD) de platino clase A, o equivalente, conforme a la norma DIN 43760, con un rango operativo de  $5$  °C a  $85$  °C y precisión de  $\pm 0.1$  °C. Este sensor fue instalado dentro de la cámara ambiental en contacto directo con el plato, permitiendo el control continuo de la temperatura durante el montaje, acondicionamiento y ensayo de la muestra. El RTD fue calibrado como unidad integral junto con su medidor o circuito electrónico correspondiente.
- Detector térmico de referencia: Se puede emplear un termistor, un detector de resistencia térmica (RTD) montado en un sello de silicón, o bien un termopar, como dispositivos de medición de temperatura, siempre que cumplan con los requisitos de precisión y compatibilidad con el sistema de control térmico.
- Dispositivo de carga: El sistema debe ser capaz de aplicar una carga sinusoidal, ya sea de esfuerzo o deformación controlada, con una frecuencia de  $10 \pm 0.1$  rad/s. En caso de utilizar frecuencias distintas, estas deberán mantenerse dentro de una precisión de  $\pm 1$  %.
- Sistema de control y registro de datos: El sistema debe contar con los dispositivos necesarios para registrar parámetros como la temperatura, la frecuencia, el ángulo de giro y la fuerza o deformación por torsión. Asimismo, debe ser capaz de calcular y registrar el esfuerzo y la deformación cortantes, así como el módulo complejo (G) dentro de un rango de 0.1 a 1 000 kPa con una precisión de 0.5 %. También debe registrar el ángulo de fase ( $\delta$ )

en un intervalo de 0 a 90°, con una aproximación de 0.1°, conforme a lo indicado en la Tabla 9.

*Tabla 9. Parámetro y aproximación*

Parámetro	Aproximación
Temperatura	±0,1°C
Frecuencia	±1%
Ángulo de giro	±100 μrad
Torsión	±10 mN·m

- Se utilizaron moldes de silicón para la conformación de la muestra, con un diámetro aproximadamente igual al del plato superior y una profundidad equivalente a 1.5 veces el espesor establecido para la muestra, que puede ser de 1 mm o 2 mm, según los requerimientos del ensayo.

### Método de prueba

- De la muestra envejecida se extrajo una porción ligeramente superior al volumen requerido para llenar los moldes de silicón, con el fin de asegurar un llenado completo y uniforme durante la preparación de las probetas.
- Una vez que tanto el equipo como la muestra estuvieron debidamente preparados, se procedió a calentarlos mediante la cámara ambiental hasta alcanzar la temperatura establecida para la prueba.
- De acuerdo con la clasificación por desempeño para el cemento asfáltico el siguiente proceso fue la utilización del reómetro de corte dinámico para determinar el módulo reológico de corte dinámico ( $G^*/\text{sen}\delta$ ), kPa, min.
- La caracterización del cemento asfáltico original se llevó a cabo a una frecuencia de 1.0rad/s, conforme a los parámetros establecidos para la evaluación reológica.
- La evaluación del cemento asfáltico, posterior al proceso de envejecimiento en horno RTFO, se llevó a cabo a una frecuencia de 2.2 rad/s, conforme a los parámetros establecidos para caracterización reológica.



*Fig. 23. Muestra en reómetro de corte dinámico*



### **3.7 Prueba para medir la rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga a Flexión (AASHTO T 313-12)**

El Reómetro de Viga a Flexión se emplea para evaluar la deformación de los ligantes asfálticos mediante la determinación del módulo de rigidez a flexión ( $S$ ), aplicando una carga constante a temperaturas representativas de las condiciones más frías que enfrentará el material durante su vida útil, momento en el que el ligante presenta un comportamiento predominantemente sólido. Esta evaluación se realiza conforme a la norma AASHTO T 313, titulada “Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)”, cuyo propósito es verificar que el ligante cumpla con los criterios de desempeño frente al agrietamiento térmico en climas fríos. Para ello, se establece que la rigidez no debe superar los 300 MPa, mientras que el valor mínimo aceptable para la pendiente  $m$  es de 0.3.

Para determinar el grado de desempeño PG correspondiente a bajas temperatura, es decir, el límite inferior en el que el ligante asfáltico mantiene un comportamiento funcional, se realiza la prueba con el Reómetro de Viga a Flexión (BBR). Este ensayo consiste en aplicar una carga constante en el centro de una viga de ligante asfáltico simplemente apoyada, registrando la deflexión en su punto medio. El equipo opera exclusivamente en modo de carga, por lo que no se obtienen datos de recuperación del material tras la aplicación del esfuerzo.

La preparación de los moldes para el ensayo inicia con la aplicación de una película delgada de vaselina sobre las superficies internas del molde. Esta capa facilita la adhesión del acetato a las caras de aluminio. Una vez colocado el acetato, es indispensable eliminar cualquier burbuja de aire que pudiera quedar atrapada entre este y la barra metálica. En caso de que persistan burbujas, se procede a desmontar el molde, repetir la aplicación de vaselina en las superficies laterales de aluminio y reinstalar el acetato, asegurando una adherencia uniforme y libre de imperfecciones.

Una vez colocadas las láminas de acetato, se recubren con una mezcla de glicerol y talco, la cual actúa como agente desmoldante, evitando que el ligante asfáltico se adhiera directamente a las superficies del molde. Tras la aplicación de esta mezcla y la correcta lubricación de las piezas, se procede al ensamblaje del molde. Las distintas partes se mantienen unidas mediante anillos de goma, los cuales ejercen la presión necesaria para conservar la geometría del conjunto durante el proceso de vertido y enfriamiento.

Durante la preparación de los especímenes de ensayo, el ligante asfáltico debe ser calentado hasta alcanzar una temperatura que le proporcione la fluidez necesaria para su vertido en el molde. En caso de que el material presente una viscosidad elevada que dificulte su manipulación, será indispensable incrementar la temperatura hasta lograr una consistencia adecuada. Esta necesidad responde a las condiciones de envejecimiento inducido mediante el procedimiento PAV (Pressure Aging Vessel), el cual incrementa la rigidez del ligante y, en consecuencia, exige temperaturas más altas para alcanzar un nivel óptimo de trabajabilidad.

Cuando el ligante asfáltico alcanza una fluidez óptima, se procede a su vertido continuo dentro del molde, desplazándolo de un extremo al otro en una sola operación. Se recomienda dejar un ligero excedente por encima del nivel del molde para garantizar un llenado completo y uniforme. Posteriormente, el conjunto se deja reposar a temperatura ambiente durante un periodo de 45 a 60 minutos, permitiendo que el material se enfríe y estabilice. Una vez transcurrido este tiempo, se utiliza una espátula previamente calentada para nivelar la superficie, eliminando el exceso de ligante y asegurando un acabado uniforme en el borde del molde.



*Fig. 24. Muestras del residuo asfáltico para prueba para medir la rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga a Flexión.*

El ensayo debe programarse para realizarse dentro de las cuatro horas posteriores al llenado de los moldes, a fin de preservar las condiciones óptimas del ligante. Previo a la ejecución, es necesario colocar el molde de aluminio con el cemento asfáltico en un congelador, manteniéndolo a una temperatura de  $-5 \pm 7$  °C durante un intervalo de 5 a 10 minutos. Este enfriamiento tiene como finalidad aumentar la rigidez de la viga asfáltica, facilitando su extracción del molde sin provocar deformaciones. En el caso de ligantes con grados PG más blandos, puede ser necesario emplear temperaturas inferiores para lograr una rigidización adecuada.



Una vez extraída la muestra del molde, se procede a colocarla en el baño de acondicionamiento para el ensayo. Es fundamental evitar introducir la muestra sin desmoldar, ya que esto podría generar variaciones indeseadas en la temperatura del sistema. El proceso de acondicionamiento se realiza durante un periodo de  $60 \pm 5$  minutos, utilizando un fluido compuesto por glicol etileno, metanol y agua. La prueba se efectúa a una temperatura que excede en  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  el valor mínimo de desempeño del ligante asfáltico, con un control térmico de alta precisión, limitado a  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Una vez concluido el periodo de acondicionamiento, la viga de ligante asfáltico se coloca cuidadosamente sobre los apoyos del equipo de ensayo, utilizando pinzas para facilitar su manipulación sin retirarla del baño térmico, con el fin de evitar alteraciones en la temperatura. Para iniciar la prueba, se aplica una carga de contacto de  $35 \pm 10 \text{ mN}$ , la cual debe incrementarse de manera gradual hasta alcanzar dicho valor, asegurando un contacto adecuado entre la muestra y la cabeza de carga. Este ajuste debe completarse en un tiempo máximo de 10 segundos. Inmediatamente después, se incrementa la carga hasta alcanzar el valor de asentamiento de  $980 \pm 50 \text{ mN}$ , manteniéndola durante un intervalo de  $1.0 \pm 0.1$  segundos.

Una vez aplicada la carga de asentamiento, esta se reduce nuevamente a  $35 \pm 10 \text{ mN}$ , permitiendo que la viga experimente un proceso de recuperación durante un intervalo de  $20.0 \pm 0.1$  segundos. Finalizado este periodo, se aplica una segunda carga de  $980 \pm 50 \text{ mN}$ , la cual se mantiene durante 240 segundos, tiempo en el que se registra la deflexión de la muestra. Es indispensable verificar que la carga de contacto se restablezca correctamente tanto al concluir la carga de asentamiento inicial como al finalizar el ensayo. Si la viga no retorna a su posición original, el procedimiento se considera inválido y será necesario calibrar el reómetro. El registro de los datos se realiza mediante un software especializado, operado desde un equipo de cómputo conectado al BBR, lo que permite un control preciso de los parámetros de carga y deformación.



*Fig. 25. Equipo de Reómetro de Viga de Flexión (BBR).*



### 3.8 Elaboración de especímenes

- Los especímenes fueron elaborados utilizando granulometrías inversas, conformadas por seis tamaños de control: material retenido en malla de  $\frac{3}{4}$ ", malla de  $\frac{3}{8}$ ", malla #4, malla #20, malla #60, y el material que pasa la malla #60. Esta distribución permitió establecer una estructura granulométrica.
- Los agregados reciclados (RAP) fueron calentados a una temperatura de 90 °C, mientras que las emulsiones asfálticas se acondicionaron a 60 °C. Como resultado, la mezcla asfáltica obtenida presentó una temperatura final comprendida entre 70 °C y 75 °C, adecuada para su manipulación y conformación.
- La mezcla fue curada en horno a 70 °C durante un periodo de 2 horas. Finalizado este proceso, se llevó a cabo la compactación de los especímenes conforme al protocolo de ensayo establecido, empleando tanto el compactador giratorio tipo Superpave.
- En el caso de la mezcla modificada con hidróxido de calcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , este aditivo fue incorporado a temperatura ambiente durante el proceso de mezclado.
- Para la mezcla en frío, se siguió el mismo procedimiento de fabricación, con la diferencia de que el agregado reciclado (RAP) se mantuvo a temperatura ambiente durante el proceso de mezclado.
- La geometría de los especímenes fue determinada en función del tipo de prueba a realizar, aplicando una compactación controlada por altura con el objetivo de alcanzar un nivel de vacíos del  $7 \pm 1$  %. Este ajuste garantizó la representatividad y uniformidad de las condiciones de ensayo.
- Una vez compactados, los especímenes fueron sometidos a un proceso de curado en horno a 50 °C durante 48 horas, con el propósito de eliminar la humedad residual presente en la mezcla y garantizar condiciones óptimas para su evaluación.
- Se determinó la gravedad específica máxima teórica (Gmm) para cada contenido de emulsión.
- Para la elaboración de las mezclas asfálticas se empleó exclusivamente material reciclado (100 % RAP). La distribución granulométrica se ajustó a los límites establecidos por la norma N·CMT·4·02·003/21 de la SICT, correspondiente a bases de mezcla asfáltica tipo base negra, conforme a lo ilustrado en la Figura 26.



*Fig. 26. RAP cribado.*

- Se llevó a cabo el análisis granulométrico y se determinaron las cantidades requeridas para el diseño de las mezclas, tal como se muestra en la Figura 27 (vista derecha e izquierda).



*Fig. 27. RAP muestreado.*

- Los recipientes con el RAP y las emulsiones asfálticas se colocaron en hornos durante dos horas, el RAP a 90°C (Figura 28) y la emulsión a 60°C para la determinación de la gravedad específica teórica máxima y densidad.



*Fig. 28. RAP en el horno*



### **3.9 Determinación de la gravedad específica teórica máxima (Gmm) y la densidad de la mezcla asfáltica conforme al procedimiento MAC-III**

El propósito de esta prueba fue establecer la gravedad específica teórica máxima (Gmm) de las mezclas asfálticas en estado no compactado. Esta propiedad constituye un parámetro esencial, influenciado directamente por la composición granulométrica y el contenido de asfalto de la mezcla. El valor de Gmm se emplea en el cálculo del porcentaje de vacíos de aire en mezclas compactadas, en la estimación de la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, así como en la definición de los niveles de compactación requeridos en campo.

#### **Equipo y herramientas para Gmm**

- Picnómetro de vacío con una cubierta (tapa) transparente, empaque de goma y una conexión para línea de vacío.
- Bomba de vacío El equipo utilizado debe ser capaz de evacuar el aire del picnómetro hasta alcanzar una presión residual igual o inferior a 4.0 kPa [30 mmHg], y contar con un manómetro adecuado para registrar con precisión el vacío aplicado.
- Manómetro de presión absoluta El sistema debe estar conectado al picnómetro para garantizar que la presión especificada se aplique correctamente, y debe contar con la capacidad de medir presiones absolutas iguales o inferiores a 4 kPa [30 mmHg], asegurando la precisión del vacío durante el procedimiento.
- Válvula de alivio La válvula debe estar conectada a la bomba de vacío o directamente al picnómetro, permitiendo tanto el ajuste del nivel de vacío aplicado como la liberación gradual de la presión, con el fin de evitar alteraciones en la muestra durante el procedimiento.
- Dispositivo de agitación El dispositivo debe ser capaz de sujetar firmemente el picnómetro y aplicar una agitación suave y constante a la muestra, con el fin de facilitar la liberación de aire atrapado y asegurar una distribución homogénea del material durante el procedimiento.
- La balanza utilizada debe contar con una resolución mínima de 0.1 g
- Baño de agua
- Termómetro
- Horno para tener temperatura 200°C.

## Método de prueba

- Lo primero que se realizó, fue mantener agua a 25°C. Enseguida, se determinó la masa de la muestra requerida, que en este caso fue de 3000 g, posteriormente, se retiró el RAP y las emulsiones del horno una vez que completaron el tiempo de curado y se realizó el cálculo para obtener la cantidad de emulsión necesaria y se procedió a mezclar con el 3% de emulsión en función del peso del RAP (Figura 29). Por último, se mezcló hasta obtener un cubrimiento homogéneo del total de los agregados.



*Fig. 29. Colocación de emulsión al RAP.*

- Una vez finalizado el procedimiento, las muestras fueron colocadas en charolas, tal como se muestra en la Figura 30, y sometidas nuevamente a un proceso de curado en horno a 70 °C durante un periodo de dos horas, con el objetivo de eliminar cualquier exceso de humedad residual en la mezcla.



*Fig. 30. 100% RAP y emulsión en mezcla asfáltica.*

- Una vez transcurrido el tiempo de curado, las muestras fueron retiradas del horno y disgregadas de manera continua con ayuda de una espátula. Posteriormente, se procedió a la separación manual de las partículas utilizando guantes térmicos, conforme a lo ilustrado en la Figura 31.



Fig. 31. Disgregación de la mezcla para Gmm.

- Una vez enfriadas, las mezclas fueron colocadas en el recipiente del picnómetro para determinar su masa inicial (A). Se añadió aproximadamente una pulgada de agua a 25 °C y se cerró herméticamente la tapa del picnómetro. Posteriormente, el conjunto fue colocado en un agitador mecánico, donde se aplicó vacío de manera gradual hasta alcanzar una presión de 27.5 inHg en un lapso de dos minutos. El vacío se mantuvo durante 15 minutos adicionales y luego se liberó lentamente. Finalmente, el picnómetro con la muestra fue suspendido en agua a 25 °C durante 10 minutos, registrándose la masa total (C). También se obtuvo el peso del picnómetro sumergido sin muestra (B), bajo las mismas condiciones de temperatura.

Tal como la fórmula que se muestra a continuación:

$$Gmm = A / A - (C - B)$$

Donde:

Gmm [adimensional] = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla. Se reporta este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

A [g] = Masa de la muestra seca al aire, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

B [g] = Masa del picnómetro sumergido, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

C [g] = Masa del picnómetro y muestra sumergida, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

- Al obtener los resultados de la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica se procedió a armar los especímenes de mezclas asfálticas con RAP y las distintas emulsiones asfálticas modificadas para evaluar su desempeño.
- Primeramente, se pesó el RAP de acuerdo con el volumen de vacíos y el tipo de prueba, en este caso obtener 5200 g y 6800 g de mezcla con el fin de elaborar especímenes con una altura de 130 mm y 165 mm, como se muestra en la Figura 32.



*Fig. 32. RAP para el diseño de los especímenes.*

- Una vez obtenidos los pesos correspondientes, las muestras de RAP fueron llevadas al horno y calentadas a una temperatura de 90 °C, como se muestra en la Figura 33. Paralelamente, la emulsión asfáltica fue acondicionada a 60 °C, asegurando condiciones térmicas adecuadas para su incorporación en el diseño de mezclas



*Fig. 33. RAP en el horno*

- Una vez alcanzadas las temperaturas establecidas, se procedió a la incorporación de la emulsión asfáltica en proporción óptima del 3 % respecto al peso del RAP. La mezcla se realizó bajo condiciones controladas, como se muestra en la Figura 34.



*Fig. 34. Mezclado del RAP con emulsión.*

- Posteriormente, se realizó la compactación de las mezclas.



### 3.10 Prueba de compactación de Mezclas Asfálticas templadas con el Compactador Giratorio (ASTM D6925)

Este procedimiento experimental contempla la compactación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica en caliente mediante el uso de un compactador giratorio. Asimismo, establece criterios para evaluar la gravedad específica de las muestras en cualquier etapa del proceso de compactación. Las probetas obtenidas mediante este método permiten caracterizar tanto las propiedades físicas como volumétricas del material compactado, además de facilitar el seguimiento de la evolución de la densidad durante la compactación.

#### Equipo y herramientas

- **Compactador giratorio:** Se requiere un equipo de compactación de tipo electromecánico, electrohidráulico o electroneumático, con capacidad para operar a una velocidad de rotación de  $30 \pm 0.5$  revoluciones por minuto y mantener un ángulo interno de giro constante de  $1.16 \pm 0.02$  grados durante todo el proceso de compactación. El sistema debe permitir aplicar hasta 250 giros sobre la muestra, así como ejercer una presión de  $600 \pm 60$  kilopascales durante los primeros cinco giros, y mantener una presión de  $600 \pm 18$  kilopascales en el resto del procedimiento.
- **Moldes:** El molde utilizado para la compactación deberá estar fabricado en acero, con un espesor mínimo de 7.5 mm. Su diámetro interno debe situarse dentro del rango de 149.9 a 150.0 mm o alternativamente entre 99.9 y 100.0 mm, y contar con una altura no menor a 250 mm. Este componente debe incluir los accesorios necesarios para su operación: una base de soporte para el molde y al menos dos discos circulares complementarios.
- Se requiere una balanza con una resolución mínima de 0.1 gramos y una capacidad de pesaje no menor a 6,000 gramos, adecuada para realizar mediciones precisas durante el desarrollo de los ensayos.
- Se deberá contar con un termómetro cuya capacidad de medición cubra el intervalo de temperaturas comprendido entre 130 y 200 °C, con una resolución mínima de 0.5 °C, adecuado para verificar con precisión la temperatura del material asfáltico durante las distintas etapas del proceso.
- Se requiere un pirómetro con capacidad para medir temperaturas en el rango de 130 a 200 °C, con una resolución mínima de 0.2 °C, adecuado para verificar con precisión la temperatura tanto del agregado como de la mezcla asfáltica.



- Se deben emplear hornos con capacidad para mantener temperaturas de hasta  $204 \pm 3$  °C. Es indispensable contar con al menos dos unidades, cada una ajustada a diferentes condiciones térmicas, con el fin de garantizar temperaturas específicas para las etapas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica.
- **Misceláneos:** Se consideran como elementos complementarios los discos de papel con un diámetro de 150 mm, utilizados durante el proceso de compactación. También puede emplearse un mezclador mecánico como equipo auxiliar, dependiendo de los requerimientos específicos del procedimiento.

### Método de prueba

- Previo al inicio del procedimiento, se precalentó un horno a la temperatura establecida para el mezclado, respetando una tolerancia de  $\pm 3$  °C. Dicho intervalo térmico fue determinado con base en la viscosidad rotacional del asfalto original (sin envejecimiento), la cual se mantuvo en  $0.17 \pm 0.02$  Pa·s, asegurando así condiciones adecuadas para el desarrollo de los ensayos en laboratorio.
- Se procedió al precalentamiento de un horno, ajustándolo a la temperatura correspondiente al proceso de compactación, con una tolerancia de  $\pm 3$  °C. Este intervalo térmico fue establecido con base en la viscosidad del asfalto original (no envejecido), la cual se mantuvo en  $0.28 \pm 0.03$  Pa·s, conforme a los criterios definidos para esta etapa del procedimiento.
- Se llevó a cabo el precalentamiento de un horno, configurándolo a la temperatura requerida para la etapa de compactación, con una tolerancia de  $\pm 3$  °C. Este rango térmico fue determinado a partir de la viscosidad del asfalto original (sin envejecimiento), la cual se mantuvo dentro del valor de referencia de  $0.28 \pm 0.03$  Pa·s, conforme a los parámetros establecidos para esta fase del proceso.
- Se extrajo el molde de compactación del horno previamente ajustado a la temperatura correspondiente al proceso de compactación, asegurando que estuviera en condiciones térmicas adecuadas para su utilización inmediata.
- Se colocó un disco de papel sobre el plato inferior del molde y se aplicó un agente antiadherente en las paredes internas del mismo, con el propósito de evitar que la mezcla asfáltica se adhiriera a la superficie durante el proceso de compactación.

- Se transfirió la totalidad de la mezcla al interior del molde utilizando un recipiente adecuado, con el objetivo de evitar pérdidas de material y prevenir cualquier segregación durante el proceso de colocación.
- Se colocó un segundo disco de papel sobre la parte superior de la mezcla, con el fin de completar el confinamiento del material dentro del molde y facilitar el proceso de compactación.
- Se ingresaron los parámetros requeridos en el compactador giratorio conforme a las especificaciones del fabricante. Posteriormente, se ajustó el sistema para aplicar una presión de  $600 \pm 60$  kPa durante los primeros cinco giros, y de  $600 \pm 18$  kPa a lo largo del resto del proceso de compactación.
- Se dio inicio al proceso de compactación, activando el equipo conforme a los parámetros previamente establecidos para garantizar la correcta formación del espécimen.



*Fig. 35. Compactador Giratorio Superpave.*

- Una vez concluido el proceso de compactación, se procedió a retirar el molde del compactador, asegurando su manipulación cuidadosa para preservar la integridad del espécimen formado.
- Se permitió que las muestras permanecieran dentro del molde durante un tiempo prudente, con el fin de asegurar su enfriamiento y evitar deformaciones al momento del desmoldeo. Posteriormente, se extrajo cuidadosamente el espécimen compactado y se retiraron los discos de papel utilizados durante el proceso.
- La muestra fue colocada sobre una superficie plana y estable, permitiendo su enfriamiento a temperatura ambiente con el fin de preservar sus características físicas y evitar alteraciones estructurales posteriores al desmoldeo.



*Fig. 36. Especímenes compactados.*

- Al terminar el tiempo de curado, se obtuvieron los especímenes para realizar las siguientes pruebas de desempeño.

### 3.11 Prueba estándar para la determinación del índice de tolerancia al agrietamiento de la mezcla asfáltica utilizando la prueba de agrietamiento por tracción indirecta a temperatura intermedia (ASTM D8225).

La metodología IDEAL CT permite determinar la energía asociada a la fractura mediante la ejecución de una prueba de tracción indirecta. Esta se realiza utilizando una prensa, bajo condiciones controladas que incluyen una velocidad de carga de 50.8 mm/min y el uso de una mordaza tipo Lottman como componente de sujeción.

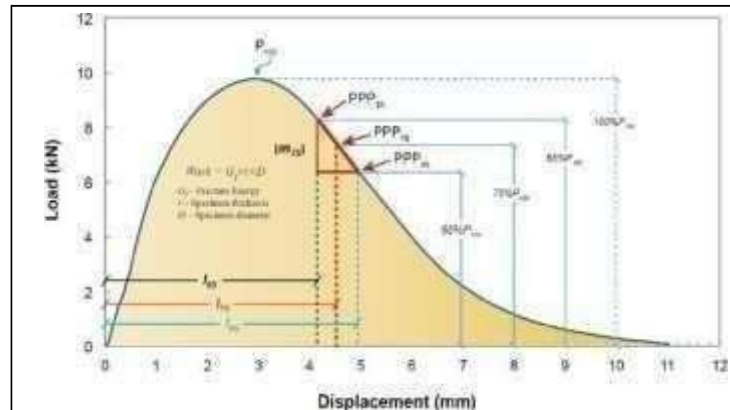


Fig. 37. Esquema del índice de tolerancia de agrietamiento.

#### Equipo y Herramientas

- Aparato de prueba: Se empleó un equipo para la evaluación del agrietamiento mediante tracción indirecta, compuesto por un sistema de carga axial, una celda de carga, dispositivos para la medición de la deformación en las muestras, y un sistema de adquisición de datos que permitió registrar los parámetros durante la ejecución del ensayo.
- Dispositivo de carga axial: El sistema de carga utilizado fue capaz de aplicar esfuerzos de compresión con una capacidad mínima de 25 kN, cumpliendo con los requerimientos necesarios para la ejecución adecuada del ensayo.
- Celda de carga: La celda de carga empleada presentó una resolución de 10 N y una capacidad mínima de 25 kN, cumpliendo con los requisitos necesarios para garantizar la precisión y confiabilidad en la medición de los esfuerzos aplicados durante el ensayo.
- Tiras de carga: Se utilizaron tiras de carga fabricadas en acero, cuya superficie cóncava presentaba un radio de curvatura equivalente al radio nominal del espécimen ensayado. Para muestras con un diámetro nominal de  $150 \pm 2$  mm, dichas franjas de carga contaron con un ancho de  $19.05 \pm 0.3$  mm.

- Dispositivo de medición de desplazamiento interno: El desplazamiento fue medido con una resolución de  $\pm 0.01$  mm, utilizando un transformador diferencial variable lineal (LVDT) o un transductor de desplazamiento equivalente, siempre que su capacidad de resolución cumpliera con los requisitos establecidos para el ensayo.
- En caso de no contar con un dispositivo interno de medición de desplazamiento, o si este no cumplía con los requisitos de precisión establecidos, se recurrió al uso de uno o más dispositivos externos, tales como transformadores diferenciales variables lineales (LVDT), para garantizar la exactitud en el registro de desplazamientos durante el ensayo.
- Se utilizó una cámara ambiental con capacidad para mantener la temperatura objetivo de acondicionamiento dentro de un margen de  $\pm 1.0$  °C, asegurando condiciones térmicas controladas para las muestras antes de iniciar el ensayo.
- Se utilizó un compactador giratorio junto con el equipo complementario necesario para la preparación de las muestras de laboratorio, conforme a los requisitos del procedimiento de ensayo.
- Se empleó una cortadora para ajustar los especímenes a las dimensiones requeridas, garantizando precisión en el corte conforme a los parámetros establecidos para el ensayo.



Fig. 38. Equipo de prueba de tensión indirecta tradicional.



Fig. 39. Equipo con tiras de carga

## Método de prueba

- Inicialmente, las muestras fueron sometidas a un proceso de acondicionamiento térmico en una cámara ambiental, manteniéndose a 25 °C durante un periodo de dos horas, conforme a lo indicado en la Figura 40.



*Fig. 40. Especímenes acondicionándose.*

- Se verificó el estado del dispositivo antes del ensayo, asegurando que todas las superficies de contacto estuvieran limpias y libres de residuos, con el fin de evitar interferencias en la transmisión de carga y garantizar la precisión del procedimiento.
- La muestra fue posicionada manualmente en el accesorio de ensayo, procurando visualmente que quedara centrada y que estableciera un contacto uniforme con la superficie de apoyo, a fin de garantizar condiciones adecuadas durante la aplicación de carga.
- A continuación, se aplicó carga a la muestra bajo control de desplazamiento lineal (LLD), utilizando una velocidad constante de 50 mm/min. El ensayo fue finalizado una vez que la carga descendió por debajo de los 100 N, conforme a lo establecido en la Figura 41.



*Fig. 41. Prueba de agrietamiento, "IDEAL CT".*

- Durante el desarrollo del ensayo, se registraron las variables de tiempo, carga y desplazamiento con una frecuencia mínima de 40 datos por segundo. La prueba fue concluida dentro de los cuatro minutos posteriores a la extracción de la muestra de la cámara ambiental, con el propósito de conservar una temperatura uniforme en el espécimen durante el procedimiento.



### **3.12 Prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324).**

El objetivo es determinar la susceptibilidad a la humedad y formación de roderas mediante el equipo de Rueda Cargada de Hamburgo en una mezcla asfáltica en caliente compactada. Así mismo, determinar la falla prematura de la mezcla debido a la debilidad de la estructura del agregado o inadecuada rigidez del asfalto.

#### **Equipo y herramientas**

- Máquina de rueda cargada de Hamburgo: Se utilizó un sistema de accionamiento eléctrico diseñado para desplazar una rueda de acero de 0.47 m de ancho y 203.2 mm de diámetro sobre la superficie del espécimen de prueba. Cada rueda aplicó una carga de  $71.6 \pm 0.45$  kg (equivalente a  $705 \pm 4.5$  N). El ensayo se ejecutó a una frecuencia de  $52 \pm 2$  pasadas por minuto, alcanzando una velocidad máxima aproximada de 30.5 cm/s en el punto central de contacto.
- Control de sistema de temperatura: El equipo contó con un sistema de control térmico capaz de regular la temperatura del agua en un rango de 25 a 70 °C, con una precisión de  $\pm 1$  °C. Además, incorporó un mecanismo de circulación mecánica que permitió mantener la temperatura estable en el interior del dispositivo durante el proceso de ensayo.
- Sistema de medición de rodera: empleó un transductor de desplazamiento tipo LVDT con un rango de medición de 0 a 20 mm, capaz de registrar la profundidad de la rodera en el centro de la trayectoria de la rueda con una precisión de  $\pm 1.27$  mm (0.5 in) y una resolución aproximada de 0.15 mm. La adquisición de datos se realizó durante al menos 400 pasadas consecutivas, sin interrupción del movimiento de la rueda, relacionando la deformación registrada con el número de pasadas correspondientes.
- Contador de paso de rueda: Se incorporó un solenoide encargado de contabilizar cada pasada de la rueda sobre el espécimen.
- Sistema de montaje del espécimen de losa: Se utilizó una estructura de acero inoxidable montada de forma rígida a la máquina de ensayo. Este sistema limitó el desplazamiento del espécimen a un máximo de 0.5 mm durante la prueba y lo mantuvo suspendido, asegurando al menos 20 mm de espacio libre en todos sus lados.

- Sistema de montaje de espécimen cilíndrico: El sistema de sujeción del espécimen estuvo conformado por dos moldes elaborados en polietileno de alta densidad o yeso blanco, los cuales fueron colocados sobre una bandeja de acero inoxidable fijada de manera rígida a la máquina de ensayo. Esta configuración permitió restringir el desplazamiento del espécimen a aproximadamente 0.5 mm, manteniendo al mismo tiempo un espacio libre mínimo de 20 mm alrededor de la muestra para facilitar la circulación uniforme del agua.

### Método de prueba

- En primera instancia, los especímenes fueron seccionados con precisión para ajustar sus dimensiones a los requerimientos del equipo de Rueda Cargada de Hamburgo (Figura 42).



*Fig. 42. Especímenes cortados.*

- Se activó el equipo y se reguló la temperatura del agua de ensayo a 50 °C. Posteriormente, los especímenes fueron colocados cuidadosamente dentro de los moldes de polietileno, los cuales se posicionaron sobre la bandeja de acero inoxidable, conforme a lo ilustrado en la Figura 43.



*Fig. 43. Especímenes en el equipo de Rueda Cargada de Hamburgo.*

- Se activó el equipo de Rueda Cargada de Hamburgo junto con el software “WheelTracker”, en el cual se ingresaron los datos correspondientes al proyecto y los parámetros de configuración del ensayo. Finalmente, se establecieron las condiciones de

prueba: una temperatura de 50 °C, una profundidad máxima de rodadura permitida de 20 mm y un límite de 20,000 pasadas.

- Los especímenes de prueba fueron sometidos a un preacondicionamiento en agua durante 30 minutos, una vez alcanzada la temperatura de ensayo de 50 °C, conforme a lo ilustrado en la Figura 44.



*Fig. 44. Pre-acondicionamiento del equipo de Rueda Cargada de Hamburgo.*

- Las ruedas fueron descendidas cuidadosamente sobre los especímenes, dando inicio al procedimiento de ensayo, conforme a lo ilustrado en la Figura 45.



*Fig. 45. Encendido de equipo de Rueda Cargada de Hamburgo*

- El equipo fue detenido al alcanzar el número máximo de 20,000 pasadas o en el momento en que se registró una deformación superior a 20 mm en el espécimen, según los criterios establecidos para la finalización del ensayo.

### **3.13 Prueba para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas (ISSN 0188-7297)**

El El propósito del procedimiento fue determinar el módulo dinámico y el ángulo de fase de



una mezcla asfáltica compactada, mediante la aplicación de una carga axial de compresión sinusoidal cíclica, bajo condiciones controladas de temperatura y frecuencia previamente establecidas.

### **Equipo y herramientas**

- Máquina de ensayo servohidráulica, diseñada para aplicar cargas de compresión controladas o tipo haversine. El equipo operó dentro de un rango de frecuencias de 0.1 a 10 Hz y fue capaz de generar niveles de esfuerzo superiores a 2800 kPa (equivalentes a 400 psi). En el caso de cargas sinusoidales, se verificó que el error estándar de la carga aplicada —definido como la diferencia entre los datos medidos y el mejor ajuste sinusoidal— se mantuviera por debajo del 10 %, conforme a los criterios de precisión establecidos.
- Cámara ambiental para regular la temperatura del espécimen de prueba conforme a los valores establecidos en el protocolo. El equipo fue capaz de mantener la temperatura dentro de un rango de -10 a 60 °C, con una resolución de  $\pm 0.5$  °C. La cámara presentó dimensiones suficientes para alojar tanto el espécimen de prueba como el de monitoreo, este último equipado con un termopar ubicado en su centro, con el fin de verificar la temperatura interna durante el ensayo.
- Placas de carga con un diámetro de  $104.5 \pm 0.5$  mm, colocadas en la parte superior e inferior del espécimen con el propósito de transferir eficazmente la carga generada por la máquina de ensayo. Estas placas fueron fabricadas en acero, chapa de acero o aluminio anodizado de alta resistencia, conforme a los requisitos de rigidez y durabilidad establecidos para el procedimiento.
- Cortadora equipada con un disco diamantado de borde continuo, diseñada para seccionar los extremos de los especímenes de prueba en un solo corte, ajustándolos con precisión a la longitud requerida para el ensayo.
- Extractora de núcleos equipada con sistema de enfriamiento y una punta de diamante, diseñada para obtener especímenes de prueba con un diámetro nominal de  $101.6 \pm 1$  mm, garantizando cortes precisos y mínimas alteraciones térmicas durante el proceso.
- Adaptadores de acero, comúnmente denominados pines, con el propósito de fijar adecuadamente los transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT) al espécimen de prueba, asegurando una correcta transmisión de movimiento durante el ensayo.

- Se empleó un dispositivo especializado para la fijación de pines, configurado para adherir tres pares de pines distribuidos a  $120^\circ$ , alineados verticalmente y con un espaciado de  $101.6 \pm 1$  mm, garantizando una colocación precisa y simétrica sobre el espécimen de prueba.
- Probeta patrón metálica con valores conocidos de módulo dinámico y ángulo de fase, utilizada como referencia para la verificación del sistema de medición. Esta probeta presentó un diámetro de 101.6 mm, una altura de 200 mm y una separación de 105 mm entre los pines, destinada a la correcta instalación de los sensores de deformación.
- Termopar con cable de conexión, destinado al monitoreo de la temperatura interna del espécimen durante el ensayo. Este dispositivo contó con un rango de medición adecuado para las condiciones térmicas establecidas y una resolución de  $0.1$  °C, lo que permitió un control preciso de la temperatura en el núcleo de la muestra.
- Vernier digital con un rango de medición de 0 a 200 mm y una resolución de 0.01 mm, empleado para realizar verificaciones dimensionales precisas en los especímenes y componentes involucrados en el ensayo.

### Método de prueba

- Los especímenes utilizados en el ensayo fueron previamente compactados, ajustándose a un contenido de vacíos de aire esperado de  $7 \pm 1$  %, conforme a los requisitos establecidos para garantizar la representatividad del material.
- Los especímenes fueron seccionados mediante una cortadora, con el objetivo de obtener muestras de ensayo con una altura de  $150 \pm 2.5$  mm, conforme a lo ilustrado en la Figura 4.



*Fig. 46. Especímenes cortados para prueba de Módulo dinámico.*

- Se determinó la volumetría de cada espécimen con el objetivo de calcular el porcentaje de vacíos de aire presentes en la mezcla, conforme a lo ilustrado en la Figura 47.



*Fig. 47. Especímenes realizándose volumetría*

- Posteriormente, se procedió a la colocación de los pines sobre los especímenes de prueba, conforme a lo ilustrado en la Figura 48, asegurando su correcta alineación para la instalación de los sensores de deformación.



*Fig. 48. Colocación de pines en espécimen.*

- Posteriormente, los especímenes fueron colocados en una cámara de temperatura con el fin de acondicionarlos adecuadamente para el ensayo (Figura 49).



*Fig. 49. Especímenes en cámara de temperatura para prueba de módulo dinámico.*

- El espécimen fue colocado dentro del aparato de carga, y los transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT) fueron montados sobre los pines previamente fijados. Se verificó que los tornillos de ajuste estuvieran firmemente apretados, con el fin de evitar cualquier desplazamiento del LVDT durante el desarrollo del ensayo, conforme a lo ilustrado en la Figura 50.
- Se realizó la conexión de los cables de los transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT) al sistema de adquisición de datos, asegurando una transmisión precisa de las señales durante el desarrollo del ensayo.



*Fig. 50. Especimen con LVDT para la prueba.*

- Se colocó una placa sobre la parte superior del espécimen, asegurando su centrado con respecto al eje del pistón de carga, con el fin de garantizar una aplicación uniforme del esfuerzo durante el ensayo.



### **3.14 Prueba para determinar la energía de fractura de mezclas asfálticas utilizando la geometría de tensión compacta en forma de disco D(CT) (AASHTOT322).**

Este procedimiento de ensayo contempló la determinación de la energía de fractura ( $G_f$ ) en mezclas asfálticas, mediante la aplicación de la geometría de tensión compacta en forma de disco. Dicha configuración consistió en una muestra circular con una muesca lateral única, sometida a carga en tensión. El parámetro  $G_f$  fue empleado como indicador de la resistencia a la fractura del material asfáltico evaluado.

El parámetro de energía de fractura es particularmente útil en la evaluación de mezclas asfálticas con aglutinantes asfálticos dúctiles, como la mezcla asfáltica modificada con polímeros, y se ha demostrado que discrimina entre estos materiales de manera más amplia que el parámetro de resistencia a la tracción indirecta (AASHTOT322).

#### **Equipos**

- Carga: El aparato de carga deberá ser capaz de mantener un desplazamiento constante de la abertura de la boca de la grieta dentro del 2 % del valor objetivo durante toda la prueba.
- Accesorios de carga que permitieron aplicar el esfuerzo a través de pasadores, los cuales rodaron libremente sobre las superficies planas de la horquilla de carga.
- Cámara: ambiental, mantendrá la muestra a la temperatura de prueba deseada. La temperatura en la cámara ambiental se monitoreará utilizando una muestra instrumentada ficticia de geometría similar a la muestra de prueba dentro de 60,5 °C durante los tiempos de acondicionamiento y prueba.
- Termómetro: con una precisión de 0,05 °C. El RTD y el controlador u otros dispositivos adecuados deberán ser rastreables por el NIST.
- Medidor de desplazamiento CMOD: para medir de la boca de la grieta en dos puntos, inicialmente con una separación de 5 mm. Los medidores deberán estar sujetos de forma segura a los puntos de calibre, pero tendrán la capacidad de soltarse sin dañarse si la muestra se rompe.
- Adquisición de datos: Se requirieron tres canales de adquisición de datos correspondientes a carga, temperatura y apertura de boca de la muesca (CMOD, por sus siglas en inglés). El sistema de adquisición empleado tuvo la capacidad de registrar información con una frecuencia mínima de 25 puntos de datos por segundo, asegurando una resolución temporal adecuada para el análisis del comportamiento del espécimen durante el ensayo.

## Método de prueba

- Las muestras de prueba fueron fabricadas con dimensiones de 150 mm de diámetro por 150 mm de altura. A partir de cada una de estas unidades compactadas, se extrajeron dos especímenes mediante corte, con el fin de obtener probetas representativas para el ensayo.
- Durante la fabricación de las muestras, se empleó un equipo provisto de caras de corte impregnadas con diamante y un sistema de refrigeración por agua, con el propósito de minimizar el daño estructural en el material durante el proceso de seccionamiento.
- El espesor objetivo establecido para las muestras compactadas en laboratorio fue de  $50 \pm 3.5$  mm, conforme a los criterios dimensionales requeridos para la ejecución del ensayo.
- La muesca de arranque fue elaborada a lo largo del diámetro de la muestra, con una profundidad de 61.5 mm, conforme a las especificaciones geométricas requeridas para el ensayo de fractura.
- La superficie plana ubicada en la boca de la grieta, con punta redondeada, fue cortada con un ángulo de  $90 \pm 5^\circ$ , extendiéndose hasta la muesca, conforme a las especificaciones geométricas requeridas para la configuración del ensayo.
- Los orificios de carga fueron realizados con un ángulo de  $90 \pm 5^\circ$  respecto a las caras paralelas de la muestra, conforme a las especificaciones geométricas requeridas para garantizar una correcta alineación durante la aplicación del esfuerzo.
- El diámetro objetivo para las muestras compactadas en laboratorio fue de  $150 \pm 10$  mm. Las mediciones correspondientes se realizaron en un mínimo de dos puntos distribuidos a lo largo de los 60.5 mm más cercanos alrededor de la circunferencia de cada muestra, y posteriormente se promediaron, conforme a lo ilustrado en la Figura 51.



*Fig. 51. Especímen en Prueba de Energía de Fractura D(CT).*

### 3.15 Método de prueba para determinar la vida a la fatiga de mezclas asfálticas sujetas a flexión repetida (ASTM D7460-10).

El propósito de este ensayo fue determinar la vida a la fatiga de mezclas asfálticas compactadas en laboratorio, con dimensiones de 380 mm de longitud, 50 mm de altura y 63 mm de ancho. Las probetas fueron sometidas a esfuerzos de flexión cíclica hasta alcanzar la condición de falla estructural.

#### Equipo y herramientas

- Máquina de ensayo, de tipo servo-hidráulico o servo-neumático, con capacidad para aplicar carga a compresión controlada en un rango de 0 a 5 kN, con una resolución de 2 N y una precisión de 5 N. Asimismo, el equipo permitió operar en frecuencias comprendidas entre 5 y 10 Hz, con una resolución de 0.005 Hz y una precisión de 0.01 Hz, cumpliendo con los requisitos técnicos del procedimiento de fatiga.
- Cámara ambiental con capacidad de medición en el rango de -10 a 25 °C, una resolución de 0.25 °C y una precisión de  $\pm 0.5$  °C. Durante el ensayo, la cámara mantuvo la temperatura del espécimen en  $20 \pm 0.5$  °C.

- Se utilizó un sistema de carga automatizado, controlado por computadora, que respondió en cada ciclo a las instrucciones emitidas por el procesador de datos y el módulo de control

El equipo de carga utilizado presentó la capacidad de: 1) aplicar esfuerzos sinusoidales repetitivos dentro de un intervalo de frecuencias de 5 a 10 Hz; 2) mantener los especímenes bajo flexión en cuatro puntos, permitiendo rotación libre y desplazamiento horizontal en todos los puntos de aplicación y reacción; y 3) inducir el retorno del espécimen a su posición original al concluir cada pulso de carga, asegurando condiciones de ensayo estables, controladas y reproducibles.

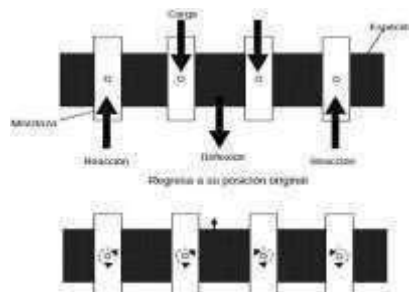


Fig. 52. Carga y movimiento del equipo de Fatiga Fuente: ASTM D7460-10.



- El sistema de control y adquisición de datos utilizado fue capaz de, durante cada ciclo de carga, medir la deflexión de la viga, calcular la deformación inducida en el espécimen y ajustar la carga aplicada por el equipo de carga, de modo que se mantuviera un nivel constante de deformación en cada ciclo. Adicionalmente, el sistema registró los ciclos de carga, las cargas aplicadas y las deflexiones correspondientes, y calculó y almacenó parámetros como el esfuerzo máximo a tensión, la deformación máxima a tensión, el ángulo de fase, la rigidez, la energía disipada y la energía disipada acumulada, conforme a los intervalos definidos por el usuario.
- La medición de la deflexión se realizó mediante un sensor de desplazamiento tipo LVDT, con un rango de medición de 2.5 mm, resolución de 0.002 mm y precisión de 0.005 mm.
- Se utilizó una cortadora equipada con un disco diamantado de borde continuo, capaz de realizar el corte de los especímenes de prueba en una sola pasada, asegurando que se alcanzara la longitud requerida sin comprometer la integridad del material.
- Se empleó un termopar como sensor de temperatura, con un rango de medición adecuado para las condiciones térmicas del ensayo y una precisión de 0.1 °C. Este dispositivo permitió monitorear la temperatura interna de la mezcla, asegurando el control térmico requerido durante el procedimiento experimental.
- Se utilizó un vernier digital con un rango de medición de 0 a 200 mm y una resolución de 0.01 mm, adecuado para realizar mediciones dimensionales precisas en los especímenes de prueba durante las etapas de preparación y verificación.
- Se utilizó un flexómetro con un rango de medición mínimo de 1000 mm y una resolución de 1 mm, adecuado para determinar con precisión la longitud de las vigas empleadas en los ensayos.
- Se utilizó un taladro equipado con una broca cuyo diámetro fue ligeramente mayor al del cable del termopar, con el fin de facilitar su inserción sin generar daños en el sensor ni comprometer la integridad del espécimen.
- Se empleó una balanza con capacidad máxima de 15,000 g y una resolución de 0.1 g, adecuada para realizar pesajes precisos durante la preparación y caracterización de los especímenes de prueba.
- Se utilizó un compactador de amasado que empleó una serie de placas de acero alineadas verticalmente para consolidar mezclas asfálticas moldeadas en placas planas y rectangulares, con espesores y densidades previamente definidos.

## Método de prueba

- Las vigas requeridas para la ejecución del ensayo fueron obtenidas a partir de losas fabricadas con mezclas asfálticas. Para ello, se empleó un compactador electromecánico lineal de rodillo, modelo Controls 77-PV41C05, el cual permitió moldear las losas con las dimensiones y características necesarias para su posterior corte y evaluación (ver Figura 53)



*Fig. 53. Compactador lineal*



*Fig. 54. Colocación de mezcla asfáltica en el compactador lineal.*

- Inicialmente, la mezcla asfáltica fue colocada en el molde del compactador, como se muestra en la Figura 54, con el fin de proceder a su conformación bajo las condiciones establecidas para el proceso de compactación.
- La carga y el desplazamiento del rodillo del compactador fueron medidos directamente mediante un transductor lineal.
- Una vez alcanzada la altura objetivo, se dio por concluido el proceso de compactación, conforme a los parámetros establecidos para la conformación de las losas (ver Figura 55).



*Fig. 55. Resultado de la compactación lineal para prueba de Fatiga.*

- Una vez finalizado el proceso de compactación, se procedió al corte de las losas con el fin de obtener las vigas requeridas para la ejecución de la prueba, conforme se muestra en las Figuras 56 y 57.



*Fig. 56. Vigas cortadas*



*Fig. 57. Especímenes para equipo de Fatiga.*

- Se prepararon las vigas a evaluar con dimensiones de 380 mm de longitud, 63 mm de ancho y 60 mm de altura, conforme a las especificaciones del ensayo (ver Figura 58).



*Fig. 58. Geometría para equipo de Fatiga.*

- La altura, el ancho y la longitud de cada espécimen fueron medidos con una aproximación de 0.01 mm en tres puntos distintos a lo largo de su longitud. Para cada dimensión, se calculó el promedio de las tres mediciones y se registraron los resultados, asegurando precisión en la caracterización geométrica de las muestras.
- Se colocaron el espaciador y el espécimen en el marco de carga, estableciendo un espaciamiento entre las mordazas de 119 mm medido de centro a centro.



- Se aplicó presión suficiente a las mordazas para asegurar la fijación del espécimen durante el ensayo. Se recomendó que dicha presión se mantuviera dentro del rango de 300 a 500 kPa, con el fin de garantizar estabilidad sin inducir deformaciones no deseadas.
- El sensor de deformación (LVDT) fue conectado al sistema de adquisición de datos y ajustado a cero antes del inicio del ensayo, con el fin de garantizar mediciones precisas y confiables durante la aplicación de carga.
- El espécimen fue acondicionado a una temperatura de  $20 \pm 0.5$  °C durante un periodo de dos horas. Para verificar el momento en que se alcanzó la temperatura especificada de ensayo, se empleó un espécimen de monitoreo. Posteriormente, se configuró el archivo de prueba con los parámetros correspondientes: deformación cíclica tipo haversine en el rango de 250 a 750  $\mu\epsilon$ , frecuencia de carga de 10 Hz y los intervalos de ciclos de carga definidos para el registro y cálculo de los resultados del ensayo.
- La rigidez inicial del espécimen fue determinada en el ciclo 50 del ensayo. Este valor se consideró como una estimación representativa de la rigidez original del material y se utilizó como parámetro de referencia para identificar el punto de falla. Se definió como falla una reducción igual o superior al 50 % respecto a dicha rigidez inicial.
- Una vez seleccionados los parámetros de prueba correspondientes, se dio inicio al ensayo. Los componentes de registro fueron activados y gestionados de forma que los resultados obtenidos en los intervalos definidos de los ciclos de carga pudieran ser monitoreados y registrados de manera continua y precisa.
- Se verificó que el sistema estuviera operando de manera adecuada antes de iniciar el ensayo, con el fin de garantizar la correcta ejecución de los procedimientos.
- El ensayo fue concluido una vez que el espécimen presentó una reducción superior al 50 % en su rigidez inicial. Para que el procedimiento se considerara válido, el espécimen debió resistir un mínimo de 10 000 ciclos de carga, correspondientes al nivel de deformación seleccionado, antes de alcanzar dicha reducción en rigidez (ver Figura 59).
- El ensayo fue ejecutado considerando distintos niveles de deformación, comprendidos en el rango de 250 a 750  $\mu\epsilon$ , con el propósito de evaluar el comportamiento del material bajo condiciones de carga cíclica variable.



*Fig. 59. Prueba de Fatiga en Viga de 4 Puntos.*



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Clasificación del cemento asfáltico según su Grado de Desempeño (PG).

En esta sección se muestra el resultado de la clasificación PG del cemento asfáltico del residuo del RAP de acuerdo con la norma N·CMT·4·05·004/18 (ver Tabla 10).

Tabla 10. Clasificación de acuerdo con el Grado de Desempeño.

Pruebas	Método de Prueba	Especificación N·CMT·4·05·004/18	Temp. de Prueba (°C)	Material asfáltico extraído del RAP
<b>Reología en Original</b>				
G*Sen $\delta$ ; kPa	ASTM D7175	Mín 1.0	82.0	13.90
			88.0	7.82
			94.0	4.38
			109.6	1.00
$\delta$ , Ángulo de Fase; Grados	ASTM D7175	-	82.0	62.40
			88.0	64.80
			94.0	67.50
			109.6	74.30
<b>Reología después del RTFO</b>				
G*Sen $\delta$ ; kPa	ASTM D7175	Mín. 2.2	82.0	31.60
			88.0	17.30
			94.0	9.48
			108.9	2.20
$\delta$ , Ángulo de Fase; Grados	ASTM D7175	-	82.0	57.60
			88.0	59.80
			94.0	62.30
			108.9	68.37
<b>Reología después del PAV</b>				
G*Sen $\delta$ ; kPa	ASTM D7175	Máx. 5000.0	45.0	1270.0
			42.0	1750.0
			39.0	2370.0
			31.8	5000.0
$\delta$ , Ángulo de Fase; Grados	ASTM D7175	-	45.0	43.80
			42.0	41.90
			39.0	40.00
			31.8	35.50
Valor "S"; MPa	ASTM D6648	Máx. 300.0	0.0	76.50
			-6.0	139.00
			-3.3	67.80
Valor "m"	ASTM D6648	Mín. 0.300	0.0	0.317
			-6.0	0.287
			-3.3	0.300

Por lo tanto, el cemento asfáltico se clasifica como un **PG 109.6 – 3.3**.

## 4.2 Resultados de Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo (HWT)

En esta sección se muestran los resultados de la Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo (HWT), de acuerdo con la norma AASHTO T324.

### ❖ Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión convencional ECM 65-110.

Tabla 11. Resultados de Rueda Cargada de Hamburgo en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión convencional ECM 65-110

Espécimen	DATOS			RESULTADO		ESPECIFICACIÓN	
	Gravedad Específica neta, Gmm	Densidad Máxima, Gmm	% Vacíos de Aire	Deformación	No. pasadas	Deformación Máxima	No. de pasadas
Izquierdo	2.231	2.405	7.2%	9.6	20000	10 mm	20,000
Derecho	2.236		7.0%	10.5	20000		
Promedio	2.233		7.1%	10.1	20000		

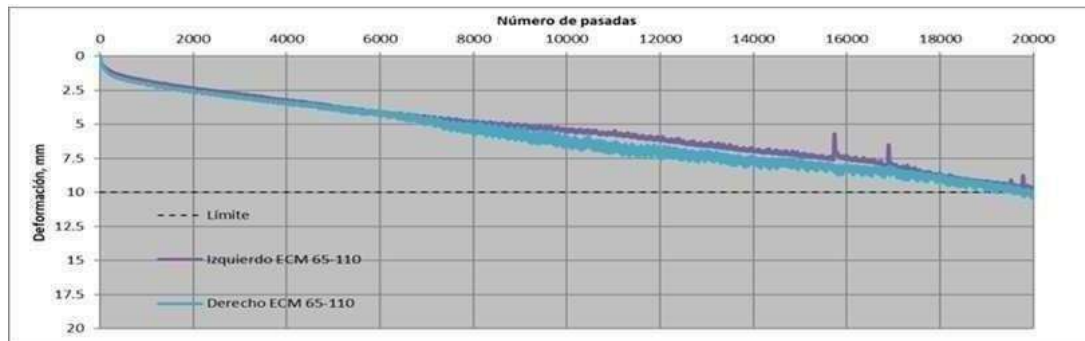


Fig. 60. Deformación (mm) en función del número de pasadas en Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo



Fig. 61. Especimen izquierdo y derecho de la Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo

Deformación promedio total: 10.1 mm.

❖ *Mezcla Templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P*

Tabla 12. Resultados de Rueda Cargada de Hamburgo en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P.

Especímen	DATOS			RESULTADO		ESPECIFICACIÓN	
	Gravedad Específica neta, Gmb	Densidad Máxima, Gmm	% Vacíos de Aire	Deformación	No. pasadas	Deformación Máxima	No. de pasadas
Izquierdo	2.241		6.8%	8.5	20000		
Derecho	2.239	2.405	6.9%	10.9	20000	10 mm	20,000
Promedio	2.240		6.9%	9.7	20000		

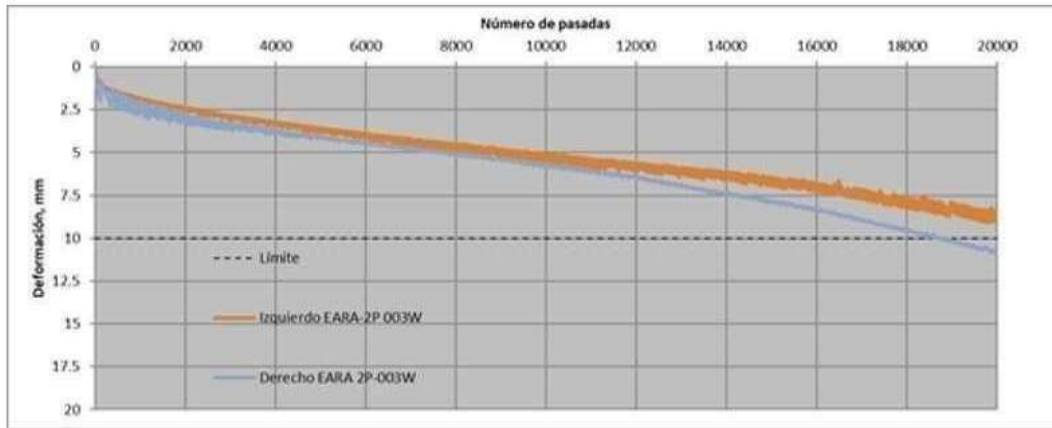


Fig. 62. Deformación (mm) en función del número de pasadas en Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo.



Fig. 63. Especímen izquierdo y derecho de la Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo

Deformación promedio total: 9.7 mm.

❖ *Mezcla en frío 100% RAP y 3% Emulsión EARA 2P*

Tabla 13. Resultados de Rueda Cargada de Hamburgo en Mezcla en frío 100% RAP en frío 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P

Especimen	DATOS			RESULTADO		ESPECIFICACIÓN	
	Gravedad Específica neta, Gmb	Densidad Máxima, Gmm	% Vacíos de Aire	Deformación	No. pasadas	Deformación Máxima	No. de pasadas
Izquierdo	2.216	2.405	7.9%	18.5	12920	10 mm	20,000
Derecho	2.222		7.6%	17.0	8980		
Promedio	2.219		7.7%	17.7	10950		

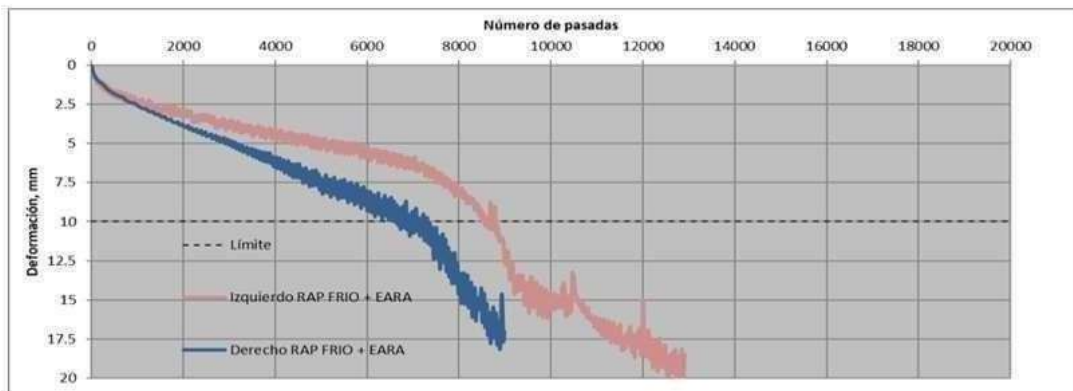


Fig. 64. Deformación (mm) en función del número de pasadas en Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo.



Fig. 65. Especimen izquierdo y derecho de la Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo

Deformación promedio total: 17.7 mm.

❖ Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión EARA 2P + 1% Ca(OH)<sub>2</sub>

Tabla 14. Resultados de Rueda Cargada de Hamburgo en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P + 1% Ca(OH)<sub>2</sub>

Especímen	DATOS			RESULTADO		ESPECIFICACION	
	Gravedad Específica neta, Gmb	Densidad Máxima, Gmm	% Vacíos de Aire	Deformación	No. pasadas	Deformación Máxima	No. de pasadas
Izquierdo	2.227	2.402	7.3%	6.4	20000	10 mm	20,000
Derecho	2.225		7.4%	6.7	20000		
Promedio	2.226		7.3%	6.6	20000		

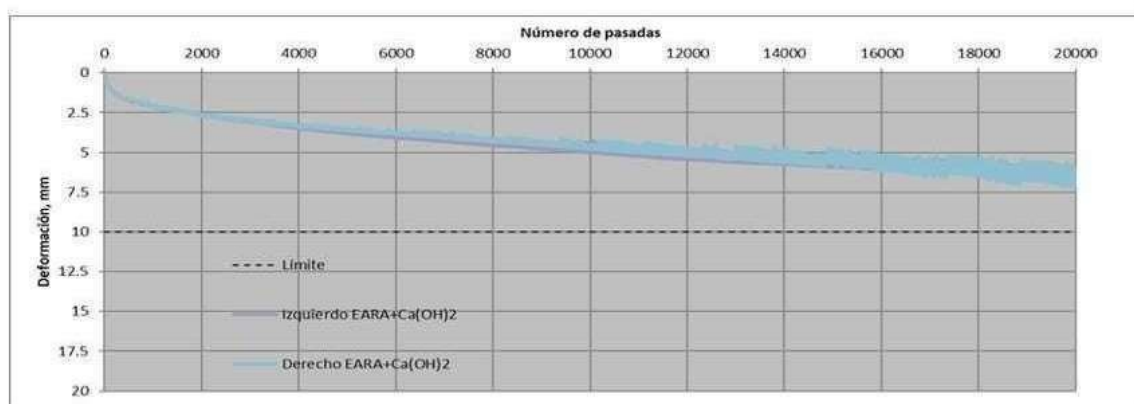


Fig. 66. Deformación (mm) en función del número de pasadas en Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo

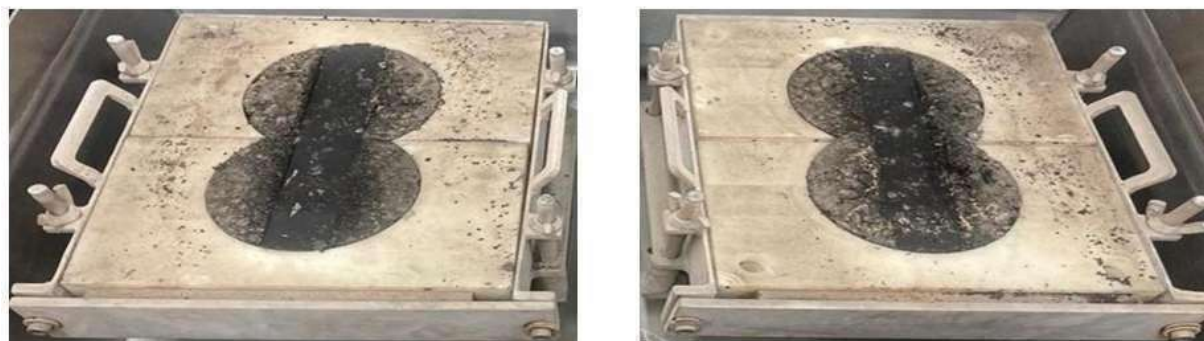


Fig. 67. Especímen izquierdo de la Prueba de Rueda Cargada de Hamburgo.

Deformación promedio total: 6.6 mm.

A continuación, se muestra la Figura 68, con el resumen de los resultados de la prueba de Rueda Cargada de Hamburgo.

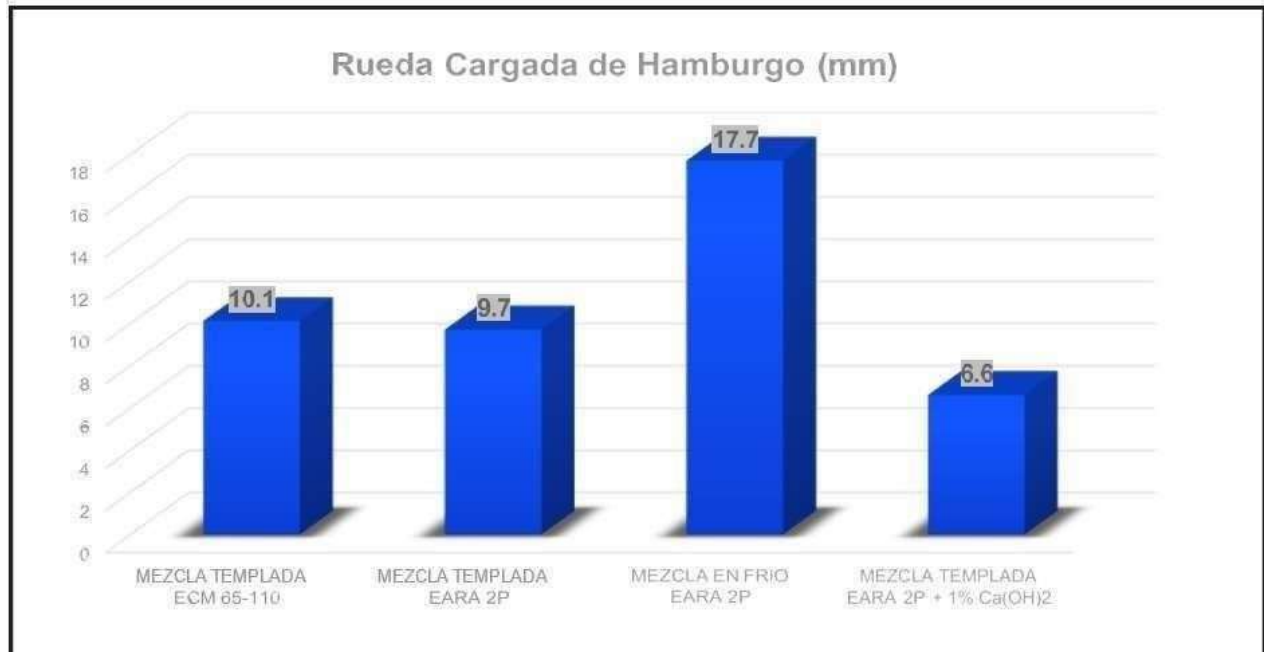


Fig. 68. Resultados de prueba de Rueda Cargada de Hamburgo.

### 4.3 Resultados de Prueba de Índice de Agrietamiento (IDEAL – CT)

En esta sección se muestran los resultados de la Prueba de índice de Agrietamiento (IDEAL-CT) de acuerdo de la norma ASTM D8225.

❖ *Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión ECM 65-110.*

Tabla 15. Resultados de Índice de Agrietamiento (IDEAL-CT) en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión convencional ECM 65-110.

ID Espécimen	%V.a	Espesor (B) mm	Carga Pico kN	Desplazamiento pico mm	Pendiente post-pico 75% N/mm	Gr J/m <sup>2</sup>	IDEAL-CT index	IDEAL CT INDEX Promedio	IDEAL-CT COV %
IDEAL-CT 1	7.11%	64.00	12.95	2.20	-3511.80	5,243	35.36	34.10	8.48%
IDEAL-CT 2	6.97%	63.00	13.93	2.17	-3694.70	5,767	36.38		
IDEAL-CT 3	7.26%	64.00	13.44	2.36	-3673.10	5,231	34.13		
IDEAL-CT 5	7.22%	64.00	12.15	1.82	-3148.60	4,420	29.13		
IDEAL-CT 6	7.03%	63.00	13.45	2.18	35.49	5,450	35.49		

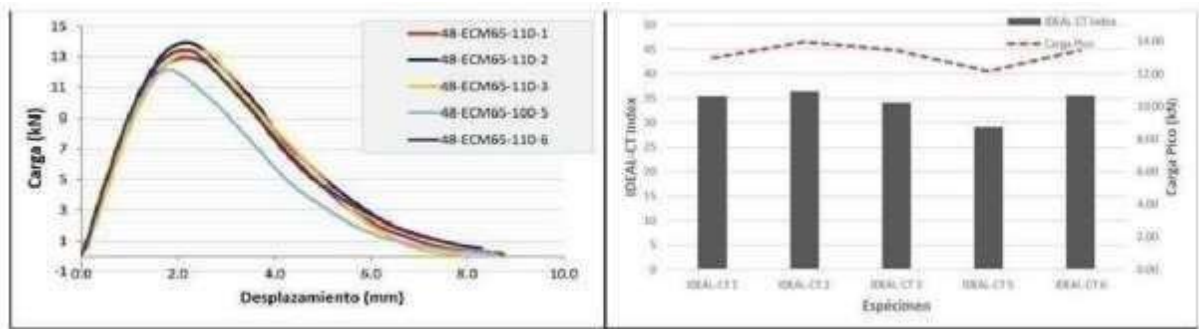


Fig. 69. Desplazamiento en función de la carga (kn) y Valor de IDEAL-CT Index



Fig. 70. Especímenes después de ensaye

INDEX CT promedio: 33.10.

❖ Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión EARA 2P

Tabla 16. Resultados de Índice de Agrietamiento (IDEAL-CT) en Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P.

ID Espécimen	%Va	Espesor (B) mm	Carga Pico kN	Desplazamiento pico mm	Pendiente post-pico 75% N/mm	Gr J/m <sup>2</sup>	IDEAL-CT index	IDEAL CT INDEX Promedio	IDEAL-CT COV %
IDEAL-CT 1	6.83%	64.00	10.98	2.07	-2074.80	5,316	66.35	48.07	21.92%
IDEAL-CT 2	7.28%	63.00	10.93	2.24	-2407.00	4,787	47.87		
IDEAL-CT 4	6.66%	63.00	11.73	2.74	-3598.60	5,594	41.99		
IDEAL-CT 5	6.67%	64.00	11.64	2.36	-3432.40	5,577	42.51		
IDEAL-CT 6	6.68%	63.00	11.97	2.72	-3894.80	5,920	41.61		

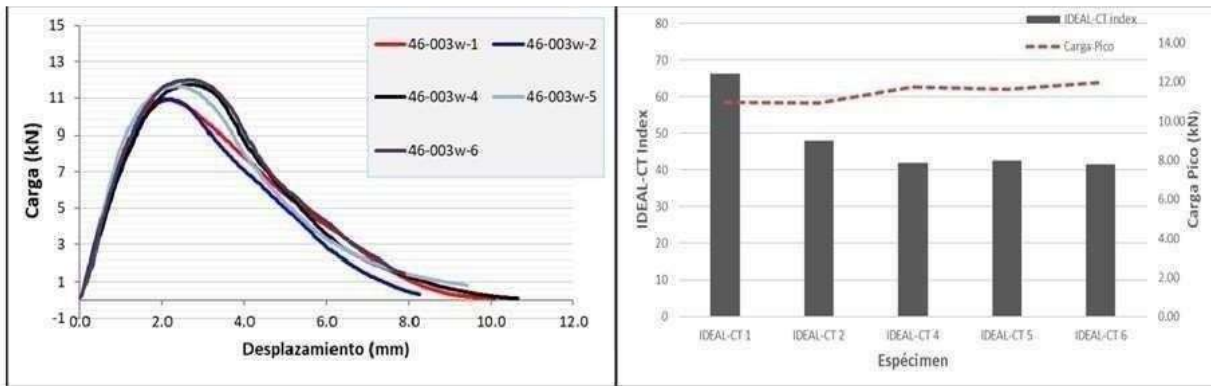


Fig. 71. Desplazamiento en función de carga y Valor de IDEAL-CT



Fig. 72. Especímenes después del ensaye.

INDEX CT promedio: 48.07.

❖ Mezcla en frío 100% RAP y 3% Emulsión EARA 2P

Tabla 17. Resultados de Índice de Agrietamiento (IDEAL -CT) en Mezcla en frío 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P.

ID_Espécimen	%Va	Espesor (B)	Carga Pico	Desplazamiento pico	Pendiente post-pico 75%	Gr.	IDEAL-CT index	IDEAL CT INDEX Promedio	IDEAL-CT COV
		mm	kN	mm	N/mm	J/m <sup>2</sup>			%
IDEAL-CT 1	7.53%	64.00	7.98	1.96	-1932.90	3,540	47.34		
IDEAL-CT 2	6.99%	63.00	8.77	2.09	-1726.90	4,339	63.39	48.44	22.99%
IDEAL-CT 3	7.81%	64.00	7.31	2.13	-1690.80	3,129	46.61		
IDEAL-CT 5	7.62%	64.00	7.42	2.21	-2289.50	3,230	36.43		

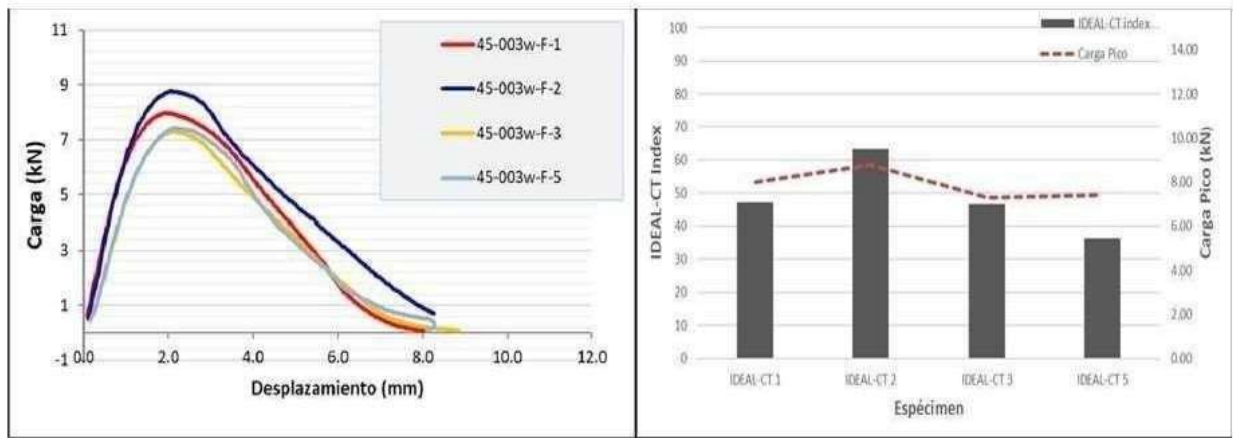


Fig. 73. Desplazamiento en función de la Carga (kn) y Valor de IDEAL-CT Index



Fig. 74. Especímenes después del ensaye.

INDEX CT promedio 34.10.

❖ Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión EARA 2P+ 1% Ca(OH)<sub>2</sub>

Tabla 18. Resultados de Índice de Agrietamiento (IDEAL-CT) en Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P+1% Ca(OH)<sub>2</sub>

ID_Espécimen	%V <sub>a</sub>	Espesor (B) mm	Carga Pico kN	Desplazamiento pico mm	Pendiente post-pico 75% N/mm	Gr J/m <sup>2</sup>	IDEAL-CT index	IDEAL CT INDEX Promedio	IDEAL-CT COV %
IDEAL-CT 1	7.56%	64.00	10.29	2.14	-2260.00	4,548	49.82	40.58	14.75%
IDEAL-CT 2	7.30%	63.00	9.33	2.92	-2878.80	3,733	34.18		
IDEAL-CT 3	7.12%	64.00	10.02	2.19	-2777.40	4,268	37.44		
IDEAL-CT 4	6.95%	62.00	10.97	2.26	-2620.70	4,723	42.61		
IDEAL-CT 6	7.20%	63.00	11.00	2.14	-2745.50	4,504	38.84		

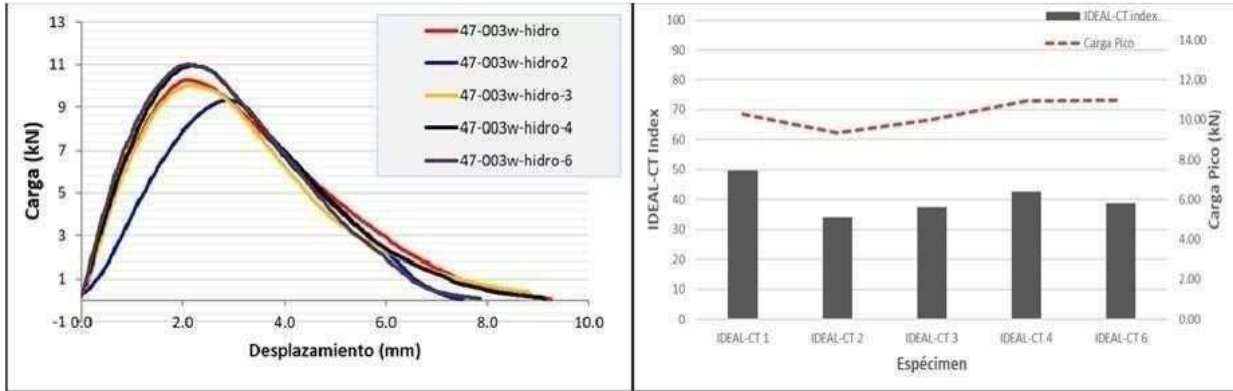


Fig. 75. Desplazamiento en función de la Carga (kn) y Valor de IDEAL-CT Index



Fig. 76. Especímenes después del ensaye.

INDEX CT promedio: 40.58.

A continuación, se muestra la Figura 77, con el resumen de los resultados de la prueba de IDEAL CT en las distintas mezclas asfálticas.

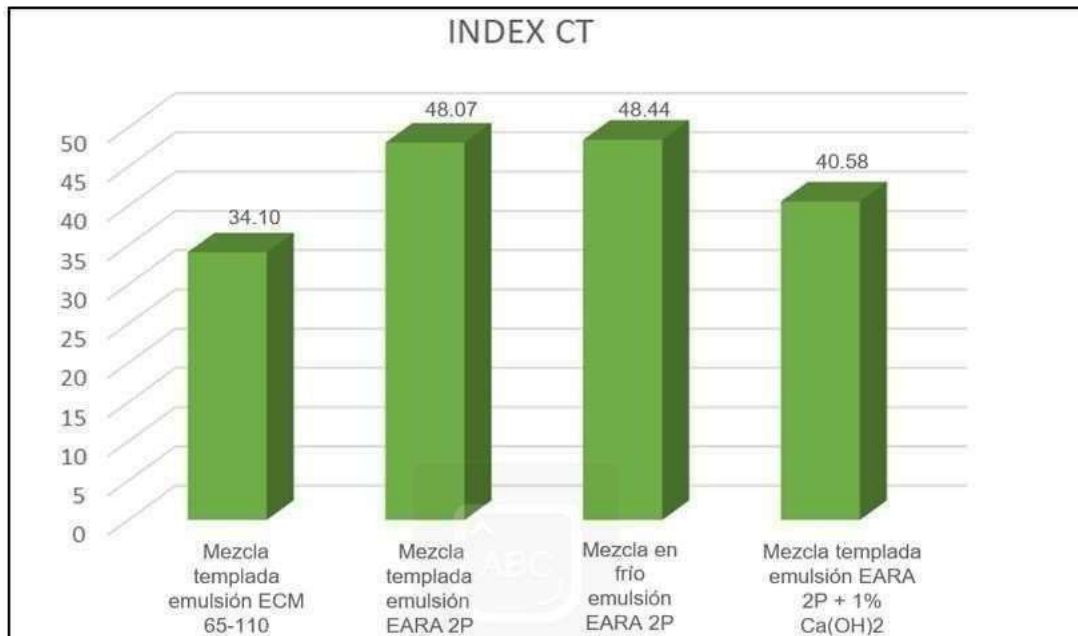


Fig. 77. Resultados de la prueba de IDEAL-CT

#### 4.4 Resultados de Prueba de Módulo Dinámico Puntual (20°C y 10 Hz)

En esta sección se muestran los resultados de la prueba Módulo dinámico puntal a una temperatura de 20°C y a una frecuencia de 10 Hz, de acuerdo con la norma AASHTO T 342.

❖ *Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión convencional ECM-65-100.*

Tabla 19. Resultados de Módulo Dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión convencional ECM 65-110.

ID ESPÉCIMEN	Módulo Dinámico			Ángulo de Fase			Deformación recuperable promedio (50<me<150)	Deformación no recuperable promedio (me<1,500)
	E*  (MPa)	Promedio  E*	C.V.	f (Grados)	Promedio f	Desv. Est.		
		MPa	%		(Grados)	(Grados)		
164MD_1	6,706	6,820	1.6	15.12	15.0	0.2	67.3	198
164MD_2	6,832			15.13			65.6	214
164MD_3	6,921			14.74			63.8	168



Fig. 78. Últimos ciclos de ensaye



Fig. 79. Especímenes después de la prueba.

Módulo dinámico promedio: 6,820 MPa.

❖ Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P.

Tabla 20. Resultados de Módulo Dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión convencional ECM-65-110

ID ESPÉCIMEN	Módulo Dinámico			Ángulo de Fase			Deformación recuperable promedio (50<me<150)	Deformación no recuperable promedio (me<1,500)
	E'  (MPa)	Promedio  E'	C.V.	f (Grados)	Promedio f	Desv. Est.		
		MPa	%		(Grados)	(Grados)		
162MD_1	4,404			18.28			76.1	324
162MD_2	3,955	4,283	6.7	18.77	18.1	0.7	84.2	396
162MD_3	4,488			17.31			75.1	285

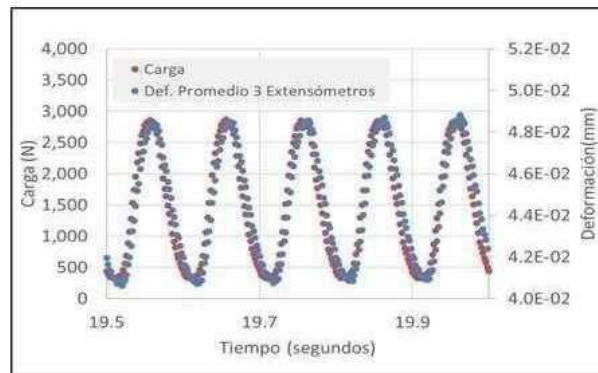


Fig. 80. Últimos ciclos de ensaye



Fig. 81. Especímenes después de la prueba

Módulo dinámico promedio: 4,283 MPa.

❖ Mezcla en frío 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P

Tabla 21. Resultados de Módulo Dinámico en Mezcla en frío 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P

ID ESPÉCIMEN	Módulo Dinámico			Angulo de Fase			Deformación recuperable promedio (50<me<150)	Deformación no recuperable promedio (me<1,500)
	E*  (MPa)	Promedio  E*	C.V.	f (Grados)	Promedio f	Desv. Est.		
		MPa	%		(Grados)	(Grados)		
161MD_1	2,067			19.24			124.1	533
161MD_2	2,021	2,070	2.4	19.03	19.1	0.2	126.1	704
161MD_3	2,121			18.92			123.1	589

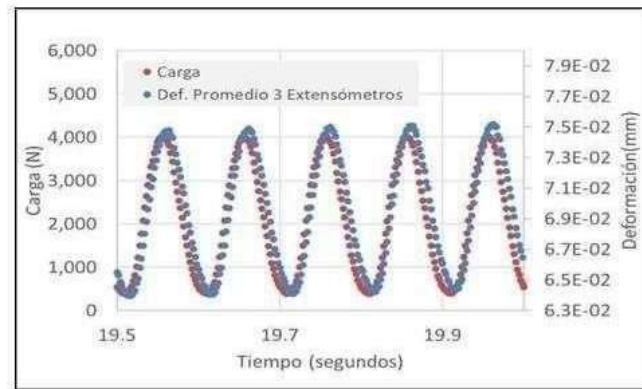


Fig. 82. Últimos ciclos del ensaye



Fig. 83. Especímenes después de la prueba

Módulo dinámico promedio: **2,070 MPa.**

❖ Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P + 1% Ca (OH)<sub>2</sub>

Tabla 22. Resultados de Módulo Dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% Emulsión modificada EARA 2P+1% Ca(OH)<sub>2</sub>

ID ESPÉCIMEN	Módulo Dinámico			Ángulo de Fase			Deformación recuperable promedio (50<me<150)	Deformación no recuperable promedio (me<1,500)
	E*  (MPa)	Promedio  E*	C.V.	f (Grados)	Promedio f	Desv. Est.		
		MPa	%		(Grados)	(Grados)		
171MD_1	4,116			17.71			83.3	326
171MD_2	3,601	4,106	12.2	17.51	17.7	0.2	93.0	357
171MD_3	4,601			17.88			73.5	298



Fig. 84. Últimos ciclos de ensaye.



Fig. 85. Especímenes después de la prueba.

Módulo dinámico promedio: 4,106 MPa.

A continuación, se muestra la Figura 86, la cual presenta un resumen de los resultados de la prueba de Modulo Dinámico a 20°C y 10 Hz de las distintas mezclas asfálticas.



Fig. 86. Resultados de prueba de Módulo Dinámico a 20°C y 10 Hz.

Tabla 23. Resumen de los resultados de pruebas de desempeño.

Mezcla asfáltica	Temp. de Comparación	% de Emulsión	Rueda Cargada de Hamburgo (mm)	INDEX-CT	Módulo dinámico (Mpa)
100% RAP y ECM 65-100	Templada	3	10.1	34.10	6820
100% RAP y EARA 2P	Templada	3	9.7	48.07	4283
100% RAP Y EARA 2P	Frío	3	17.7	40.58	2070
100% RAP y EARA 2P + Ca(OH) <sub>2</sub>	Templada	3	6.6	48.44	4106

En dicha Tabla, se analizaron los resultados de las pruebas de desempeño y se decidió seguir con las dos mezclas asfálticas con resultados más favorables para la realización de las siguientes pruebas de desempeño.

En este caso, fue la mezcla asfáltica templada 100% RAP y emulsión modificada EARA 2P y la mezcla asfáltica 100% RAP y EARA 2P + 1% de Ca(OH)<sub>2</sub>.

#### 4.5 Resultados de prueba de Energía de Fractura (DCT)

En esta sección se muestran los resultados de la prueba de la determinación de la energía de fractura de mezclas asfálticas utilizando la geometría de tensión compacta en forma de disco (D<sub>CT</sub> por sus siglas en inglés: *Disk-Shaped Compact Tension*), de acuerdo con la norma ASTM D7313-20.

❖ *Mezcla templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P.*

Tabla 24. Resultados de Energía de Fractura (DCT) en Mezcla Templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P

Espécimen	Va (%)	Espesor (B) mm	W-a mm	Área bajo la curva mm-kN	Carga Pico kN	Gr J/m <sup>2</sup>	Gr Promedio J/m <sup>2</sup>	Gr COV %
63DCT-1	5.49	49.56	83.22	3.406	2.72	826	859	26.8%
63DCT-3	5.57	49.92	84.32	4.646	2.91	1,104		
63DCT-4	5.45	49.4	83.78	2.681	2.92	649		

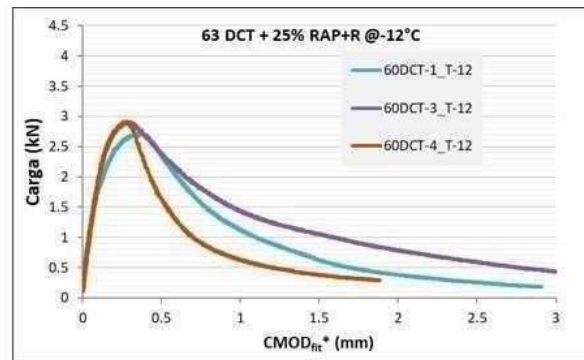


Fig. 87. Resultados de carga (kN).

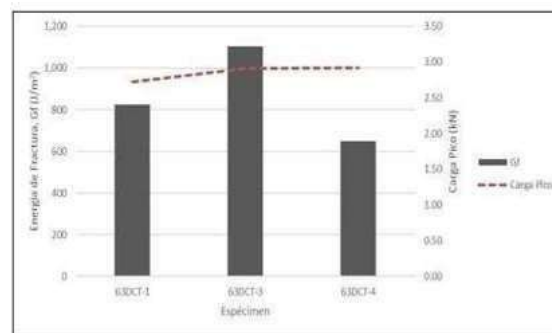


Fig. 88. Resultados de Energía de Fractura (Gf/m<sup>2</sup>)



Fig. 89. Espécimen DCT, Plano de Falla y Agrietamiento

Energía de Fractura (Gf) promedio: **859 J/m<sup>2</sup>**

Tabla 25. Resultados de Energía de Fractura (DCT) en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P+1% Ca (OH)<sub>2</sub>

ID	Espécimen	Va (%)	Espesor (B) mm	W-a mm	Área bajo la curva mm-kN	Carga Pico kN	Gr J/m <sup>2</sup>	Gr Promedio J/m <sup>2</sup>	Gr COV %
64DCT-1		5.70	50.58	83.60	2.945	2.65	696		
64DCT-2		5.65	49.95	83.38	2.525	2.91	606	620	11.4%
64DCT-4		5.36	50.39	83.11	2.333	2.58	557		

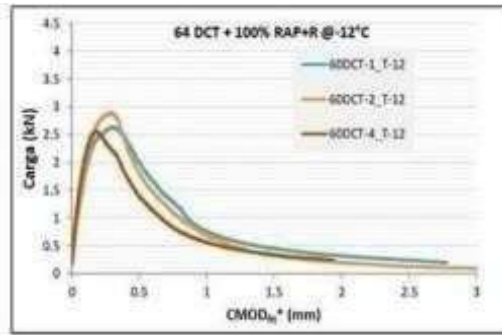


Fig. 90. Resultados de carga (kN)

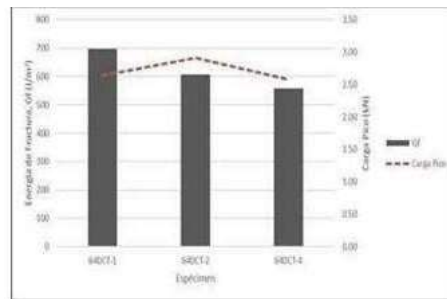


Fig. 91. Resultados de Energía de Fractura (Gf/m<sup>2</sup>)



Fig. 92. Especimen en DCT, Plano de falla y Agrietamiento

Energía de Fractura (Gf) promedio: **620 J/m<sup>2</sup>**.

A continuación, se muestra la Figura 93, con el resumen de los resultados de la prueba de la determinación de la energía de fractura de mezclas asfálticas utilizando la geometría de tensión compacta en forma de disco ( $D_{CT}$ ).



Fig. 93. Resultados de prueba de Energía de fractura  $G_f$  (J/m<sup>2</sup>)

#### 4.6 Resultados de la curva maestra del módulo dinámico

En esta sección se muestran los resultados de la prueba de la curva maestra del módulo dinámico, de acuerdo con la norma AASHTO T 342.

❖ Mezcla templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P

Tabla 26. Resultados de curva maestra del módulo dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P

ESPECIMEN	162-M.T-1		162-M.T-2		162-M.T-3		[E*]	[E*]	$\delta$	$\delta$	
	Temp. (°C)	Frecuencia (Hz)	[E*] (MPa)	$\delta$ (Grados)	[E*] (MPa)	$\delta$ (Grados)	[E*] (MPa)	$\delta$ (Grados)	Promedio MPa	C.V. %	Promedio (Grados)
-10	25	18,211	3.2	16,261	2.9	15,921	2.8	16,798	7.4	3.0	0.2
	10	17,085	5.1	15,741	5.4	15,044	4.9	15,957	6.5	5.1	0.3
	5	16,458	5.9	14,994	6.3	14,381	5.8	15,278	7.0	6.0	0.3
	1	14,675	7.4	13,223	7.9	12,819	7.2	13,573	7.2	7.5	0.4
	0.5	13,918	8.0	12,456	8.4	12,162	7.7	12,845	7.3	8.0	0.4
	0.1	12,153	9.2	10,710	9.9	10,641	9.0	11,168	7.6	9.4	0.5
4	25	10,882	8.1	10,639	8.0	11,107	7.1	10,876	2.2	7.7	0.5
	10	9,833	10.3	9,551	10.3	10,008	9.4	9,798	2.4	10.0	0.5
	5	9,068	11.6	8,732	11.6	9,218	10.6	9,006	2.8	11.3	0.6
	1	7,320	14.2	6,962	14.2	7,481	13.0	7,255	3.7	13.8	0.7
	0.5	6,598	15.3	6,243	15.3	6,769	14.0	6,537	4.1	14.8	0.8
	0.1	5,039	17.7	4,775	17.7	5,292	16.2	5,036	5.1	17.2	0.9
20	25	5,294	16.4	4,814	16.1	5,384	14.7	5,164	5.9	15.7	0.9
	10	4,404	18.3	3,955	18.8	4,488	17.3	4,283	6.7	18.1	0.7
	5	3,774	20.0	3,367	20.5	3,879	18.9	3,674	7.4	19.8	0.8
	1	2,520	24.5	2,165	25.0	2,636	23.2	2,440	10.0	24.2	0.9
	0.5	2,088	25.9	1,800	26.3	2,227	24.6	2,038	10.7	25.6	0.9
	0.1	1,361	27.8	1,188	28.0	1,485	26.3	1,345	11.1	27.4	0.9
37	25	2,303	9.3	1,908	12.1	2,120	13.0	2,110	9.4	11.5	2.0
	10	1,756	24.6	1,486	24.2	1,682	23.0	1,641	8.5	23.9	0.8
	5	1,420	26.2	1,108	27.3	1,279	25.7	1,269	12.3	26.4	0.8
	1	741	30.9	617	30.7	730	29.4	696	9.9	30.3	0.8
	0.5	544	32.6	456	32.4	538	30.9	513	9.6	32.0	0.9
	0.1	319	33.7	275	32.6	328	31.6	307	9.2	32.6	1.0
54	25	1,126	11.3	1,009	10.8	1,056	7.9	1,064	5.6	10.0	1.8
	10	867	23.0	774	21.4	827	21.0	823	5.7	21.8	1.0
	5	556	24.8	509	24.3	565	23.9	543	5.6	24.3	0.5
	1	315	27.7	292	26.2	331	26.0	313	6.2	26.6	0.9
	0.5	288	25.1	274	26.5	256	25.4	273	5.8	25.7	0.7
	0.1	215	23.6	199	22.4	222	21.6	212	5.6	22.5	1.0

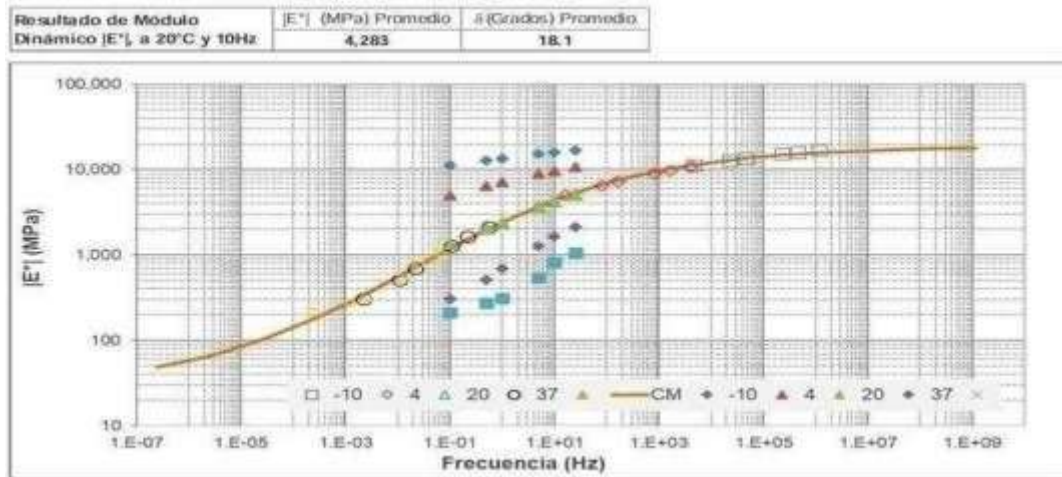


Fig. 94. Curva maestra a una temperatura de referencia de 20°C.

❖ Mezcla templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P+1% Ca(OH)<sub>2</sub>

Tabla 27. Resultados de curva maestra del módulo dinámico en Mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P+1% Ca(OH)<sub>2</sub>

Temp. (°C)	Frecuencia (Hz)	171-MT-1		171-MT-2		171-MT-3		E*		δ	
		E*  (MPa)	δ (Grados)	E*  (MPa)	δ (Grados)	E*  (MPa)	δ (Grados)	Promedio (MPa)	C. V. (%)	Promedio (Grados)	Desv. Est. (Grados)
-10	25	15,654	3.6	14,043	3.4	18,598	3.8	16,098	14.4	3.6	0.2
	10	14,593	5.5	12,965	5.3	17,520	5.7	15,026	15.4	5.5	0.2
	5	13,997	6.3	12,356	6.1	16,960	6.5	14,438	16.2	6.3	0.2
	1	12,435	7.7	10,926	7.5	15,031	8.2	12,797	16.2	7.8	0.3
	0.5	11,774	8.2	10,327	8.1	14,280	8.8	12,127	16.5	8.4	0.4
	0.1	10,244	9.5	8,947	9.3	12,337	10.3	10,509	16.3	9.7	0.5
4	25	9,469	8.9	9,262	8.0	11,412	8.2	10,048	11.8	8.3	0.5
	10	8,179	11.2	8,237	10.2	9,831	10.7	8,749	10.7	10.7	0.5
	5	7,454	12.5	7,549	11.5	9,076	12.1	8,026	11.3	12.0	0.5
	1	5,876	15.2	6,049	14.1	7,321	14.9	6,415	12.3	14.7	0.6
	0.5	5,265	16.3	5,444	15.1	6,583	16.1	5,764	12.4	15.8	0.7
	0.1	4,051	18.4	4,179	17.3	4,976	18.4	4,402	11.4	18.0	0.6
20	25	4,949	15.2	4,417	14.8	5,578	15.3	4,981	11.7	15.1	0.3
	10	4,116	17.7	3,601	17.5	4,601	17.9	4,106	12.2	17.7	0.2
	5	3,501	19.4	3,086	19.2	3,965	19.6	3,517	12.5	19.4	0.2
	1	2,365	23.6	2,069	23.0	2,703	24.0	2,379	13.3	23.5	0.5
	0.5	1,981	24.7	1,744	24.1	2,263	25.3	1,996	13.0	24.7	0.6
	0.1	1,350	26.1	1,205	25.4	1,530	26.4	1,362	11.9	26.0	0.5
37	25	2,082	17.5	2,023	19.5	2,418	21.1	2,174	9.8	19.4	1.8
	10	1,627	22.5	1,590	22.5	1,879	22.3	1,699	9.3	22.4	0.1
	5	1,337	23.5	1,303	23.6	1,528	23.4	1,390	8.7	23.5	0.1
	1	762	27.6	717	28.1	857	28.4	779	9.2	28.0	0.4
	0.5	579	29.0	559	29.6	669	29.0	602	9.8	29.2	0.4
	0.1	354	28.5	344	29.9	395	29.5	364	7.4	29.3	0.7
54	25	1,017	22.5	1,016	20.1	1,147	19.9	1,060	7.1	20.8	1.5
	10	800	20.4	792	20.5	893	19.8	828	6.8	20.3	0.4
	5	629	22.0	608	21.8	681	21.8	639	5.9	21.9	0.1
	1	351	23.2	314	23.6	366	24.0	343	7.7	23.6	0.4
	0.5	301	24.2	262	24.3	312	24.4	292	9.0	24.3	0.1
	0.1	226	20.9	200	21.4	232	21.7	219	7.7	21.3	0.4

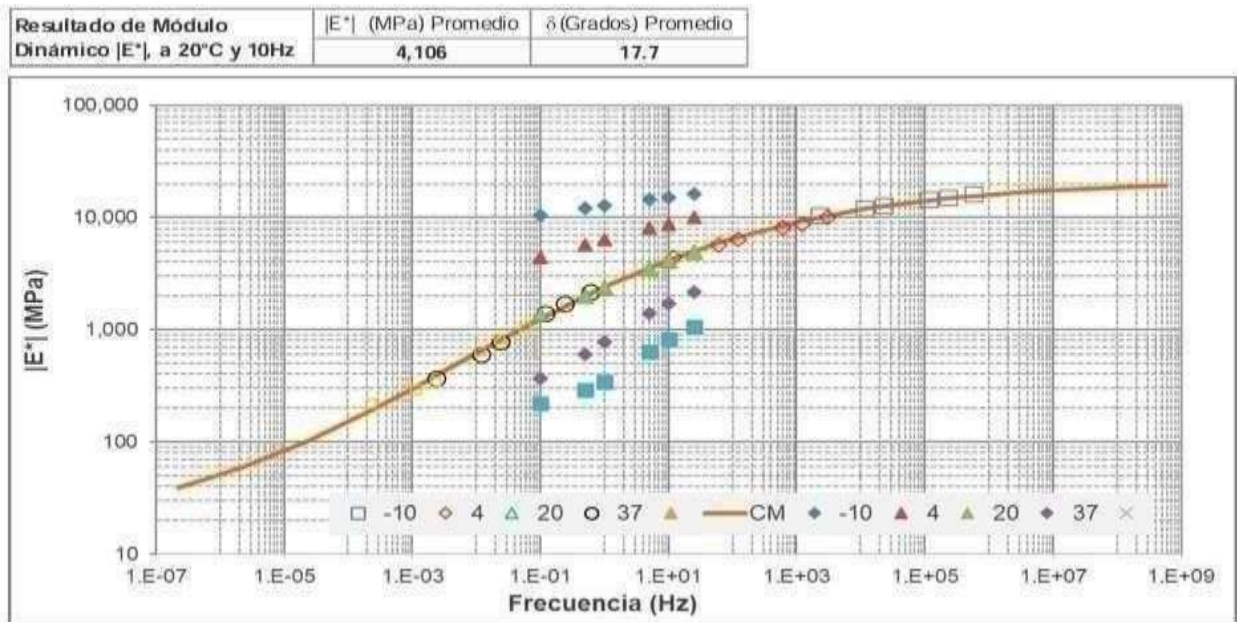


Fig. 95. Curva maestra a una temperatura de referencia de 20°C.

A continuación, se muestra un gráfico con el resumen de los resultados de la prueba de la curva maestra del módulo dinámico de las mezclas:

- ❖ *Mezcla templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P;*
- ❖ *Mezcla templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P + 1%  $\text{Ca(OH)}_2$ .*

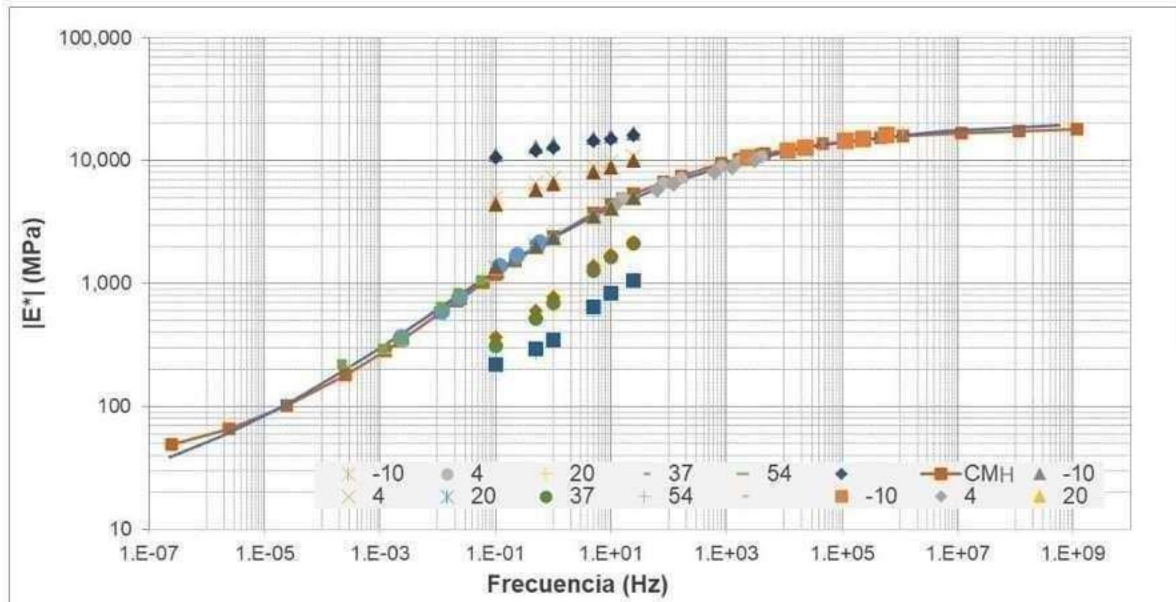


Fig. 96. Resultados de las curvas maestras a una temperatura de referencia de 20°C.

#### 4.7 Resultados de la prueba de resistencia a la fatiga en vigas a flexión en cuatro puntos

En esta sección se presentan los resultados de la prueba de resistencia a la fatiga en vigas a flexión en cuatro puntos en mezclas asfálticas, de acuerdo con la norma AASHTO T-321.

❖ *Mezcla templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P.*

Tabla 28. Resultados de Fatiga en mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA 2P

Especimen	Deformación promedio ( $\mu\text{m}$ )	Esfuerzo inicial (kPa)	Rigidez Inicial (MPa)	Ciclos a la falla, Nf
93 EARA 2 500	500	1,174	2,347	2.45 E+05
93 EARA 10 500	500	1,546	3,090	2.61 E+05
93 EARA 11 400	400	1,209	3,024	2.21 E+06
93 EARA 12 400	400	1,015	2,543	1.50 E+06
93 EARA 3 300	300	775	2,581	9.36 E+06
93 EARA 5 300	300	657	2,194	8.78 E+06

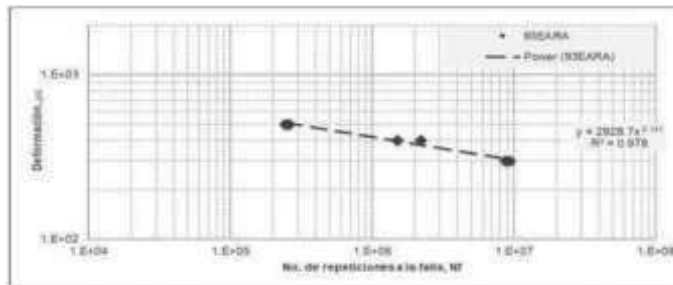


Fig. 97. Ley de Fatiga obtenida



Fig. 98. Especímenes para prueba de Fatiga.

Tabla 29. Especificaciones de Fatiga para el diseño de acuerdo con la NCAT

ESPECIFICACIÓN DE FATIGA PARA EL DISEÑO			ESPECIFICACIÓN BASADA EN DESEMPEÑO DE DISEÑO PARA LAS EVALUACIONES DE CAMPO (Repeticiones mínimas para Nivel de Confianza de 95%)		
Límite de Resistencia a Fatiga (NCHRP Reporte No. 646)	Resultado	Recomendación	Nivel de Deformación, $\mu\text{m}$	400	600
	214	$\geq 180 \mu\text{m}$	No. ciclos a la falla, Nf	1,139,613	36,363

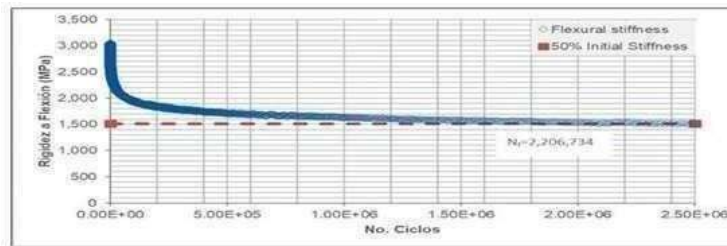


Fig. 99. Reducción de rigidez para número de ciclos a la falla.



Fig. 100. Ensayo de Fatiga.

❖ Mezcla templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P + 1% Ca(OH)<sub>2</sub>

Tabla 30. Resultados de Fatiga en mezcla templada 100% RAP y 3% de Emulsión modificada EARA + 1% Ca(OH)<sub>2</sub>

Especimen	Deformación promedio (μ <sub>2</sub> )	Esfuerzo inicial (kPa)	Rigidez Inicial (MPa)	Ciclos a la falla, Nf
94_EARA_3_300	300	775	2,581	7.65.E+06
94_EARA_4_300	300	881	2,917	5.52.E+06
94_EARA_1_400	400	1,281	3,200	1.00.E+06
94_EARA_2_400	400	1,015	2,543	1.21.E+06
94_EARA_3_500	500	1,554	3,108	3.17.E+05
94_EARA_6_500	500	1,533	3,065	2.23.E+05

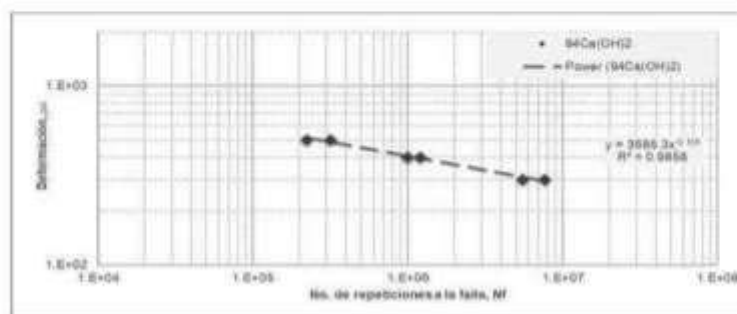


Fig. 101. Ley de Fatiga obtenida.



Fig. 102. Especímenes para prueba de Fatiga.

Tabla 31. Especificaciones de Fatiga para el diseño de acuerdo con la NCAT

ESPECIFICACIÓN DE FATIGA PARA EL DISEÑO			ESPECIFICACIÓN BASADA EN DESEMPEÑO DE DISEÑO PARA LAS EVALUACIONES DE CAMPO (Repeticiones mínimas para Nivel de Confianza de 95%)		
Límite de Resistencia a Fatiga (NCHRP Reporte No. 646)	Resultado	Recomendación	Nivel de Deformación, $\mu\epsilon$	400	600
	198	$\geq 180 \mu\epsilon$	No. ciclos a la falla, $N_f$	950,757	49,503

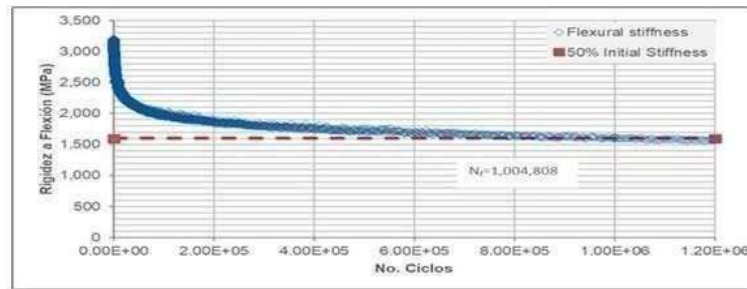


Fig. 103. Reducción de rigidez para números de ciclos a la falla



Fig. 104. Ensayo de Fatiga

A continuación, se muestra un gráfico con el resumen de los resultados de la prueba de Fatiga de las mezclas:

- ❖ Mezcla templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P
- ❖ Mezcla templada 100% RAP y Emulsión modificada EARA 2P + 1% Ca(OH)<sub>2</sub>

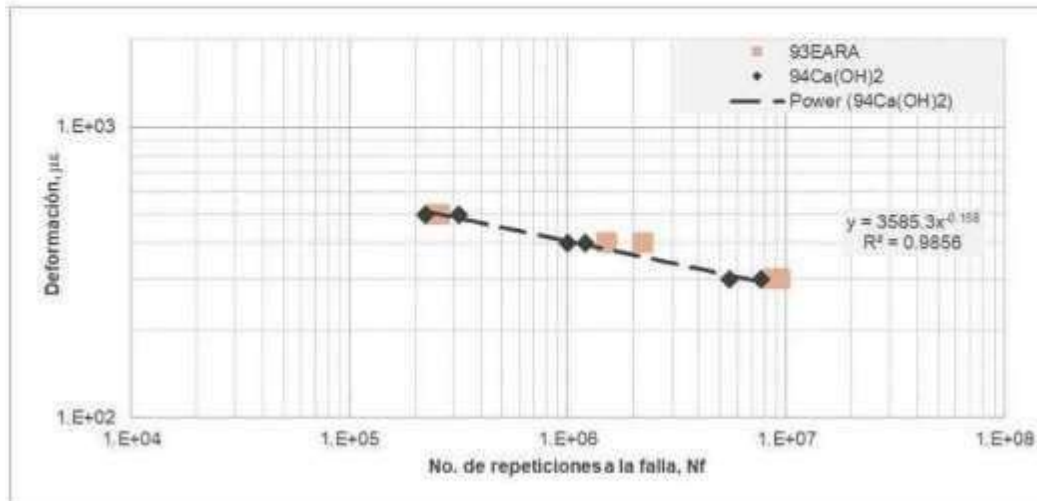


Fig. 105. Resultados de número de ciclos a la falla ( $N_f$ ) en la prueba de Fatiga en viga de cuatro puntos.



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a la conciencia ambiental se han desarrollado nuevos métodos para la producción de mezclas asfálticas. Las mezclas asfálticas templadas son aquellas que se producen a una temperatura menor a la convencional sin dejar en cuenta sus propiedades, tales como el procedimiento de la compactación, el porcentaje de vacíos, la facilidad de transporte y la manejabilidad con la incorporación de mezcla asfáltica reciclada.

Además de ofrecer beneficios al medio ambiente puesto que al tener que calentar la mezcla asfáltica a una menor temperatura en su elaboración hay un ahorro en el consumo de combustible y así, una reducción de emisiones de diversos gases, entre ellos, el dióxido de carbono que es el responsable del calentamiento global.

En esta investigación, las mezclas asfálticas templadas con 100% RAP y emulsiones asfálticas convencional y modificadas mostraron una buena adhesividad entre las partículas, condiciones favorables de mezclado, compactación, buena manejabilidad y apariencia.

- La mezcla templada con emulsión EARA 2P +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  obtuvo menor deformación en la Rueda Cargada de Hamburgo y mejora en la adherencia asfalto-agregado.
- Las mezclas templadas con emulsión EARA 2P obtuvieron un valor mayor de INDEX-CT en comparación con la mezcla de emulsión ECM-65-110.
- La mezcla templada con emulsión ECM-65-110 obtuvo una rigidización excesiva en el módulo dinámico en comparación con las mezclas templadas de emulsión EARA 2P.
- Las mezclas templadas con emulsión EARA 2P cumplieron con el valor especificado de energía de fractura en la prueba de D(CT).
- Las Curvas Maestras del Módulo Dinámico de las mezclas templadas con emulsión EARA 2P y EARA 2P +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  obtuvieron un valor similar.
- Las mezclas templadas con emulsión EARA 2P y EARA 2P +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  obtuvieron un valor de Límite de Resistencia a la Fatiga (FEL) dentro de la especificación usado en México.

En cuanto a los resultados de manejabilidad, se logró el mezclado y compactación de la mezcla asfáltica templada a menores temperaturas, logrando un equilibrio entre las propiedades de rigidez y flexibilidad.

De acuerdo con las propiedades mecánicas, se muestra que las mezclas asfálticas templadas son adecuadas para soportar las solicitaciones del tráfico, además, debido al tiempo



de enfriamiento para la alcanzar la temperatura ambiente, nos permiten la circulación del tránsito en menor tiempo en comparación a una mezcla asfáltica en caliente.

Se concluye, que la temperatura de producción en una mezcla asfáltica es importante y presenta uno de los desafíos más importantes en la ingeniería de caminos. Las mezclas asfálticas templadas constituyen una buena elección entre las mezclas en caliente y en frío, tanto a nivel trabajabilidad como medioambiental, por lo tanto, se convierte en una alternativa eficaz para un pavimento.



## 6. REFERENCIAS

- Abad Quito, H.E. (2016). Análisis comparativo del reciclado con asfalto espumado y la técnica convencional en la conservación periódica de la carretera Conococha Huaraz 2010-2011. Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo, Perú.
- Alkins, A.E., Lane, B., & Kazmierowski, T. (2008). Sustainable pavements: environmental, economic, and social benefits of in situ pavement recycling. *Transportation research record*, 2084(1), 100-103. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3141/2084-11>
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) T 313-12. Método de prueba estándar para determinar la rigidez a la fluencia por flexión del aglomerante asfáltico utilizando el reómetro de haz de flexión (BBR)
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Método de prueba estándar para determinar la energía de fractura de mezclas asfálticas utilizando la geometría de tensión compacta en forma de disco D(CT) (AASHTOT322).
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Método de prueba estándar para determinar la energía de fractura de mezclas asfálticas utilizando la geometría de tensión compacta en forma de disco D(CT) (AASHTOT322).
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Método de prueba para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas (ISSN 0188-7297)
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324).
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (1991). Annual book of ASTM standards. ISBN, 0803116683, 9780803116689; 720 páginas.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM D 5404 – 03 Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator”.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM D6925-15. Método de prueba estándar para la preparación y determinación de la densidad relativa de muestras de mezcla asfáltica mediante el compactador giratorio Superpave
- American Society for Testing and Materials (ASTM), Método de prueba estándar para la determinación del índice de tolerancia al agrietamiento de la mezcla asfáltica utilizando la prueba de agrietamiento por tracción indirecta a temperatura intermedia (ASTM D8225).
- American Society for Testing and Materials (ASTM), Método de prueba para determinar la viga a la fatiga de mezclas asfálticas sujetas a flexión repetida (ASTM D7460-10)
- Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) (2013). Asociación Mexicana del Asfalto. Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. México.
- Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB) (2014). *Mezclas templadas con emulsión bituminosa*. Monografía de revista técnica ATEB, España.
- Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB) (2020). *Producción de Mezclas templadas con emulsión bituminosa*. Monografía de revista técnica ATEB, España.



- Asphalt Institute (AI) (2003). SP-1 Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specifications and Testing, Asphalt Institute.
- Contreras Ortega, R. (2014). Comparación técnico-económica y ecológica del reciclado *in-situ*, empleando asfalto espumado, con métodos convencionales de mantenimiento periódico de pavimentos flexibles. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.
- Copeland, A. (2011). Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice (No. FHWA-HRT-11-021). United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development, and Technology. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40918>
- Fabela, G. (1999). Proceso de remoción de carpetas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Publicación Técnica No. 121, Querétaro, Qro.
- Farinango, D. (2014). Análisis comparativo de costos entre el pavimento rígido y pavimento flexible, Quito, Quito, Ecuador.
- Federal Highway Administration (FHWA) (1995). Pavement Recycling Executive Summary and Report, Report No. FHWA-SA-95-060, Washington, DC.
- Federal Highway Administration (FHWA) (2016). User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-97-148, Washington, DC.
- Frederick, G., & Tario, J. D. (2009). Quantify the Energy and Environmental Effects of Using Recycled Asphalt and Recycled Concrete for Pavement Construction. Phase I Final Report, New York State Energy Research and Development Authority, New York. <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/trans-r-and-d-repository/C-08-02%20Final%20Report%209-8-09.pdf>
- Garnica, P. (2005). Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte, Safandila, Querétaro.
- Goyer, S., Dauvergne, M., Wendling, L., Gaudefroy, V., y Ropert, C. (2012). Environmental data of cold mix using emulsified bitumen for a better selection of road materials. En ISAP 2012: Environmental data of cold mix using emulsified bitumen for a better selection of road materials (pp. 12p-tabl).
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2002). M·MMP·4·05·025/02. Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. 4. Materiales para Pavimentos. 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. 025. Módulo Reológico de Corte Dinámico.
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2002). N·CMT·4·05·003/02. Características de los materiales 4. Materiales para Pavimentos 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas 003. Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras.
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2005). N·CMT·4·05·004/05. Características de los materiales. 4. Materiales para Pavimentos. 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas 004. Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG.
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2005). NOM N·CMT·4·05·001/05. Características de los materiales 4. Materiales para Pavimentos 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas 001. Calidad de Materiales Asfálticos.
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2020). Manual de Ensayo de Laboratorio. Mezclas asfálticas en Caliente Parte III. (MAC-III)



- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2021). N·CMT·4·02·003/21. Características de los materiales. 4. Materiales para Pavimentos. 02. Materiales para Subbases y Bases. 003. Materiales para Bases Tratadas.
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2022). M·MMP·4·05·027/22. Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. 4. Materiales para Pavimentos. 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. 027. Envejecimiento del Cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO).
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2022). M·MMP·4·05·028/22. Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. 4. Materiales para Pavimentos. 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. 028. Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV).
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2022). N·CMT·4·05·003/02. Características de los materiales 4. Materiales para Pavimentos 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas 003. Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras.
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2022). N·CMT·4·05·005/22. Características de los materiales 4. Materiales para Pavimentos 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas 001. Calidad de Materiales Asfálticos.
- León P. (2010). Característica morfológica de agregados para concreto para mediante el análisis de imágenes. Pontificia Universidad Javeriana. Bogota, Colombia.
- Lesme, B. (2015). Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas tibias (mezclas templadas) empleando emulsiones súper-estabilizadas. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, 82 pp.
- Mendoza-Sánchez, J.F., y Trejo-Trejo, J.A. (2015). El concepto sustentabilidad aplicado a los pavimentos asfálticos. 9º Congreso Mexicano del Asfalto, AMAAC, Cancún, México.
- Merseguer-Sánchez, V., Molina-Moreno, V., López-Martínez, G., Nuñez-Cacho U.P. (2021), Economía Circular: Fundamentos y Aplicaciones. Thomson Reuters Aranzadi, Primera Edición, España.
- Monsalve, L., Giraldo, L., Maya, J. (2012). Diseño de Pavimento Flexible y Rígido, Quindío, Armenia, Colombia.
- Muench, S. T., y Van Dam, T. J. (2014). Pavement Sustainability: [techbrief] (No. FHWA-HIF-14-012). United States. Federal Highway Administration. (antes Administration, F. H. (2014). Pavement Sustainability. FHWA-HIF-14-012).
- Peña, E. (2007). Análisis Comparativo del diseño de mezclas asfálticas MDC-2 con asfalto original y modificado con polímeros por los métodos Marshall y Superpave. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Porot L. (2008), Mezclas Asfálticas a más Bajas Temperaturas. XXXV Reunión del Asfalto. Rosario, Argentina: Comisión Permanente del Asfalto.
- Práctica estándar para la recuperación de asfalto de la solución mediante el evaporador rotatorio”.
- Rico A., Téllez R., Garnica P. (1998). Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías, Diseño y Tendencias, Publicación Técnica No. 104, Sanfandilla, Qro.
- Rondón, H. (2009). Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos flexibles: el estado del conocimiento, Rev. Ing. Univ. Medellín vol.8 no.14 Medellín Jan./June 2009, Medellín, Colombia.



Solorio R., Garnica P., Hernández R., (2018). Un protocolo para la Gestión de Activos Carreteros en México. Instituto Mexicano del Transporte. NOTAS núm. 175, artículo 3. México.

Yin, 2021. NCHRP 20-07, NAPA IS-143, NAPA Balanced Mix Design Resource Website.

### 6.1 PÁGINAS WEB CONSULTADAS:

- <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- <https://www.asfaltia.com/actividad/productos/mezclas-templadas/>
- <https://www.unifort.es/pavimentos/asfalto/>
- <https://www.tensar.co.uk/resources/articles/what-are-the-function-of-layers-in-a-flexible-pavement>



CURRICULUM VITAE

**Nombre completo:** Daniela Escoboza Arredondo  
**Estudios:** Ingeniería Civil

---

**DATOS DE IDENTIFICACIÓN**

Sexo: Femenino

Edad: 28 años

---

**OBJETIVO PROFESIONAL**

Aplicar aptitudes y ofrecer los conocimientos a nivel personal y profesional, trabajando arduamente con integridad, honestidad y compromiso

---

**ANTECEDENTES ACADÉMICOS**

**Institución:** Universidad Autónoma de Sinaloa  
**Carrera:** Licenciatura Ingeniería Civil

Año de inicio y término: 2015-2020

**Actualmente:** Universidad Autónoma de Chihuahua

2022-2024

**Carrera:** Maestría en Vías Terrestres

- 
- Realización de Intercambio de Movilidad Nacional en Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en *Ciudad de México* en un semestre de la licenciatura. 2018
  - Tesis de Licenciatura "Evaluación del comportamiento a la fatiga de un asfalto modificado Con microfibras de poliacrilonitrilo" realizada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. 2021
  - Estancia en Ergon Asfaltos México en el estudio de "Evaluación De Mezclas Templadas con alto contenido de Pavimento Asfáltico Reciclado para capas de pavimento" para Tesis de Maestría. 2023

---

## **ANTECEDENTES LABORALES**

Puesto: Residente de Obra (Prácticas profesionales) (2020– 2021)

Actividades: Residente de obra, lectura de planos Empresa: Structural Viviendas S.A de C.V

Puesto: Personal de Geotecnia (2022)

Actividades: Clasificación de suelos, Sondeos al suelo, Extracción de corazones de mezcla asfáltica Empresa: Laboratorio y Consultoría S.A. de C.V.

Puesto: Laboratorista en Ergon Asfaltos México (practicante de maestría) (2023)

Actividades: Pruebas de Laboratorio mediante Protocolo Amaac hasta Nivel 4 en mezclas asfálticas y Clasificación por grado de desempeño (PG) a asfaltos mediante norma SCT 2018.

Puesto: Ingeniera de Proyectos en Grupo Caduma Consultores (2024 – Actualmente)

Actividades: Realización de Estudios de Impacto Vial, Ingeniería de Transporte y Diseño de Pavimentos asfálticos e hidráulicos.

---

## **CURSOS Y ASISTENCIAS**

*"Curso de presupuesto de Obra en Neodata"* en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México (UNAM) (2019)

*"Gestión de Vialidades por estándares de desempeño"* Curso en línea AMIVTAC Guanajuato (2024)

*\*Asistencia en el Congreso Internacional del Asfalto AMAAC en la ciudad de Cancún, Quintana Roo. (2023)*

*\*Asistencia en Seminario Internacional de Puentes en la Ciudad de Nuevo Vallarta, Nayarit (2024).*

---

## **DIPLOMADOS**

*Diplomado de "Mezclas Asfálticas" en Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) en 2020.*

---

## **PROGRAMAS**

Opus, Office, Autocad, PaveXpress, IMTPave, PTV Vissim, PTV Vistro.

---

## **IDIOMAS**

Español e Inglés intermedio-alto nivel B2 (Diplomado de Inglés y Español en la Universidad Autónoma de Chihuahua).