UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON 8 % DE RAP MEDIANTE ENSAYO DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS.

Memoria de Titulación y Tesis de Grado presentada por

MARCELO IGNACIO AVILA CARRILLO

Como requisito parcial para optar al título de:

CONSTRUCTOR CIVIL

Profesor Guía

PROF. CARLOS WAHR DANIEL

Junio de 2017

TÍTULO DE LA TESIS

ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON 8 % DE RAP MEDIANTE ENSAYO DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS.

AUTOR

MARCELO IGNACIO AVILA CARRILLO

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Constructor Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

PROF. CARLOS WAHR DANIEL

Valparaíso, Chile, Junio de 2017

AGRADECIMIENTOS

Gracias a quienes me acompañaron en este largo camino, en particular a Alejandra Zamora, Nicolás Montalva, Pedro Belmar y Carla Valenzuela, que participaron de este trabajo de título.

Quiero dar gracias a mis padres y hermanas por su apoyo incondicional.

Finalmente quiero dar especial agradecimiento a JCP, que siempre sostuvo mis brazos cuando comenzaron a caer.

“Están los que usan siempre la misma ropa.
Están los que llevan amuletos.
Los que hacen promesas.
Los que imploran mirando al cielo.
Los que creen en supersticiones.

Y están los que siguen corriendo cuando les tiemblan las piernas.
Los que siguen jugando cuando se acaba el aire.
Los que siguen luchando cuando todo parece perdido, como si cada vez fuera la última vez.
Convencidos de que la vida misma es un desafío. Sufren. Pero no se quejan.
Porque saben que el dolor pasa.
El sudor se seca.
El cansancio termina.
Pero hay algo que nunca desaparecerá: La satisfacción de haberlo logrado.

En sus cuerpos hay la misma cantidad de músculos.
En sus venas corre la misma sangre.
Lo que los hace diferentes es su espíritu.
La determinación de alcanzar la cima.
Una cima a la que no se llega superando a los demás. Sino superándose a uno mismo.”

RESUMEN

En el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas en caliente (MAC), se relaciona el nivel de deformación (o esfuerzo) con el número de ciclos para alcanzar una condición de falla especificada (N_f). La caracterización del comportamiento a fatiga de estas mezclas, realizado a través de las curvas de fatiga, es fundamental para poder garantizar su desempeño. El objetivo de este trabajo, es presentar los resultados de los ensayos de viga a flexión cargada en cuatro puntos, a deformación controlada, realizados sobre una mezcla con betún convencional CA-24 equivalente a una Clasificación PG 64-22, mediante método Superpave.

Para esto se compararán los resultados de 3 tipos de mezclas con una granulometría consistente con una banda IV-A-12. La primera mezcla será tradicional de control, sin RAP, de la que se confeccionarán 12 probetas, con el objeto de caracterizar 4 puntos de la curva. La segunda mezcla con 8% de RAP grueso, de la cual se confeccionarán 3 probetas, necesarias para caracterizar el punto de control para 500 [µstrain]. Finalmente la tercera mezcla de control del proyecto de "Desarrollo de Materiales para Recapados Asfálticos Utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados" FONDEF D09I1174. Los 4 puntos que se busca caracterizar en los ensayos de fatiga completa son para 250, 350, 500 y 600 [µstrain], que permitirá establecer la deformación necesaria para obtener el parámetro ϵ_6, correspondiente a la deformación para un millón de ciclos. Los resultados obtenidos serán también comparados con los resultados de los ensayos de la memoria de Nicolás Montalva Gorodesky, en la que se confeccionaron 12 probetas de una mezcla con 18% de RAP. Cabe mencionar que todas las mezclas, probetas y ensayos, de ambas memorias, fueron realizados en colaboración conjunta. La confección de las 27 probetas se realizó según el procedimiento descrito por la norma AASHTO T 321-14.

Los ensayos realizados a las mezclas asfálticas en caliente elaboradas para este estudio arrojaron resultados que no alcanzaron el millón de ciclos para ninguno de los niveles de deformación ensayados, dejando imposibilitada la opción de interpolar el parámetro ε_6 (épsilon 6). Por otro lado los valores de N_{500} alcanzados son de orden de magnitud similar, por lo tanto se puede suponer que los resultados de la mezcla con 8% de RAP para fatiga completa se encontrarán en las mismas condiciones que las otras mezclas estudiadas.

El RAP se define como el pavimento asfáltico que ha cumplido su vida útil, que ha sido fresado o extraído y posteriormente triturado, y sus propiedades dependen directamente de varios factores como: el tipo de mezcla asfáltica del que proviene, la metodología empleada en su extracción, la capa de pavimento que se extrajo, o bien, del proyecto que proviene, lo que puede generar heterogeneidad en el material, lo cual puede influir en la homogeneidad de la mezcla final que se desea fabricar, sobre todo cuando el RAP se emplea en altas tasas.

La caracterización del comportamiento a fatiga de las nuevas mezclas asfálticas en caliente (MAC) con agregados de RAP son fundamentales para garantizar el desempeño de estas, por lo que este estudio, podrá ser utilizado como referencia y punto de comparación, en el diseño de mezclas que busquen respuesta al agrietamiento por fatiga.

ABSTRACT

The behavior of fatigue on hot mixtures asphalt (HMA), is related to the the deformation level (or stress) with the numbers of cycles to reach an specific fault condition (N_f). The Characteristics on the fatigue behavior for these mixtures, developed through the fatigue curves, is essential to guarantee its performance. The objective of this work was to study the results of the bending beam tests loaded in four points, controlled deformation, performed on a conventional CA-24 bitumen mixture equivalent to a PG Classification 64-22 using the Superpave method.

In order to accomplish this, was the results of 3 types of mixtures with a granulometry consistent with a band IV-A-12 will be compared. The first mixture was a traditional mixture, which was used as control, without RAP, in this mixture 12 test pieces were prepares with the aim of identify 4 points of the curve. The second mixture was a mixture with 8% of thick RAP, which 3 test pieces were prepared to identify the control point for 500 [µstrain]. Finally, the third mixture of the project "Development of Materials Used in retreads Asphalt Pavement Rehabilitation Dilapidated" FONDEF D09I1174. The 4 points that seeks to identify in full fatigue tests are 250, 350, 500 and 600 [µstrain]. The results were also compared with those obtained in the work developed by Nicolás Montalva Gorodesky, in which 12 tests of a mixture with 18% addition of RAP. It is important to note that all mixtures, test pieces and tests of both works, had been carried out in cooperation. The 27 tests were prepared according to the procedure described by AASHTO T 321-14.

In this study, the tests developed on the hot asphalt mixes produced were not reached results 1 million cycles for the deformation levels tested, making it impossible to interpolate parameter $\varepsilon 6$ (epsilon 6). On the other hand, the values of N_{500} were similar in terms of magnitude, so, it can concluded that the results of the mixture with 8% RAP for complete fatigue will be at the same conditions as the other studied mixtures.

The RAP is defined as the asphalt pavement that has reached its lifespan, which has been milled or extracted, and then ground, its properties directly depend on several factors such as: the type of asphalt mix from which it comes, the methodology used during its extraction, the pavement layer that was extracted, or the project that comes from, which can generate heterogeneity in the material, influencing the homogeneity of the final produced blend, mainly when the RAP is used in High rates.

The characteristics of the fatigue behavior of the new hot mix (HMA) with added RAP are fundamental to guarantee it´s performance. This work can be used as reference and point of comparison, on the design of mixes that tries to face the fatigue cracking problem.

GLOSARIO

MAC: Mezcla Asfáltica en Caliente.

Nf: Ciclos de Cargas Asociados a un Criterio de Falla.

ε_t: Deformación Unitaria a Tracción en la Parte Inferior de la Carpeta Asfáltica.

HMA: Hot Mix Asphalt.

Hz: Hertz.

°C: Grados Celsius.

G*: Módulo Complejo de Corte.

δ: Angulo de Fase.

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation.

ASTM: American Society for Testing Materials.

C.A.: Cemento Asfáltico.

ESALs: Equivalent Single Axles Loads (Ejes Simples Equivalentes Cargados)

Hz: Hertz.

J/m3: Joule por metro cúbico.

Kg/m3: Kilógramo por metro cúbico.

km: Kilómetro.

Km/h: Kilómetro por hora.

KPa: Kilo Pascal.

LEMCO: Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras.

LVDT: Transformador diferencial de Variación Lineal.

m: Metros.

MC: Manual de Carreteras.

min: Minutos.

mm: Milímetros.

N: Newton.

Pa: Pascal.

PG: Performance Grade (Grado de Desempeño).

RAP: Reclaimed Asphat Pavement (Asfalto reciclado)

Si: Rigidez Inicial.

μstrain: Micro Strain [mm/mm * 10^{-6}].

INDICE

1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 ANTECEDENTES GENERALES 1
1.2 OBJETIVOS 2
1.2.1 Principal 2
1.2.2 Secundarios 2
1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO 3
1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO 3
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS 4
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 5
2.1 DETERIOROS REALIZADOS POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS 5
2.2 FACTORES QUE AFECTAN A LOS ENSAYOS DE FATIGA 5
2.2.1 Fabricación de Probetas para Ensayos de Fatiga. 6
2.2.2 Modos de Carga 11
2.2.3 Variabilidad de las Mezclas Asfálticas 11
2.2.4 Carga y Condiciones ambientales 12
2.3 MÉTODO DE ENSAYE VIGA A FLEXIÓN 13
2.4 AGREGADO DE ASFALTO RECICLADO, RAP, A LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, MAC. 15
2.4.1 Tratamientos de reciclado en frío 15
2.4.2 Tratamientos del reciclado en caliente 15
3 MEZCLA ASFÁLTICA EN ESTUDIO 18
3.1 MEZCLA ASFÁLTICA 18
3.2 BETÚN ASFÁLTICO 18
3.2.1 Asfaltos Tradicionales: 19
3.3 ÁRIDOS 20
3.4 GRANULOMETRÍAS 20
3.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO 22
3.5.1 Método Marshall 22
3.5.2 Mezcla IV-A-12 con betún asfáltico tradicional PG 64-22 sin RAP y con 8 % de RAP 22
4 CONDICIONES DE LABORATORIO 23
4.1 EQUIPOS DE ENSAYOS 23
4.1.1 Máquina de Viga a Flexión de cuatro Puntos 23

4.1.2 Compactador de Rodillo 25
4.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS 26
4.2.1 Mezclado de los áridos con Bitumen Asfáltico. 26
4.2.2 Compactación de la Mezcla Asfáltica. 27
4.2.3 Comprobación de Compactación de la Mezcla Asfáltica. 29
4.3 CONDICIONES DE ENSAYE 30
4.3.1 Ecuaciones utilizadas en el ensayo de fatiga. 30
5 ANALISIS DE RESULTADOS. 32
5.1 Propiedades de diseño, volumétricas y medidas geométricas de las probetas. 33
5.1.1 Mezcla Asfáltica IV-A-12 sin RAP con Asfalto Tradicional CA 24. 33
5.1.2 Mezcla Asfáltica IV-A-12 con 8% de RAP con Asfalto Tradicional CA 24. 33
5.1.3 Resumen propiedades mezclas asfalticas. 34
5.2 Resultados de los ensayos a fatiga. 34
5.2.1 Mezcla Asfáltica IV-A-12 sin RAP con Asfalto Tradicional CA 24. 34
5.2.2 Mezcla Asfáltica IV-A-12 con 8% de RAP con Asfalto Tradicional CA 24. 37
5.2.3 Mezcla Asfáltica IV-A-12 con 18% de RAP con Asfalto Tradicional (PG 64-22) Memoria Nicolás Montalva. 37
5.2.4 Mezcla Asfáltica IV-A-12 Asfalto Tradicional (PG 64-22) Proyecto FONDEF "Desarrollo de Materiales para Recapados Asfálticos Utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados" 39
5.3 COMPARACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SEMEJANTES. 40
6 CONCLUSIONES 42
7 Bibliografía 43
8 ANEXO 45
8.1 GRANULOMETRÍAS 45
8.1.1 Mezcla Asfáltica en Caliente de Agregado ¾" sin RAP 45
8.1.2 Mezcla Asfáltica en Caliente de Agregado ¾" con 8% de RAP 47
8.2 CEMENTO ASFÁLTICO 49
8.2.1 Cemento asfáltico CA 24: 49
8.3 ENSAYOS DE FATIGA A FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS. 50
8.3.1 Propiedades de Vigas Ensayadas a Fatiga a Flexión en Cuatro Puntos. 50
8.3.2 RESULTADOS ENSAYOS DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS. 55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Equipo Marshall 7
Figura 2.2. Compactador Giratorio. 8
Figura 2.3. Probeta compactada. 8
Figura 2.4. Compactador de rodillo. 9
Figura 2.5. Probeta compactada con rodillo. 10
Figura 2.6. Probetas compactadas con rodillo y desmoldadas. 10
Figura 2.7. Tipos de pulso de carga [Tangella et al., 1990] [6]. 13
Figura 2.8. Tipos de ensayos de fatiga en mezcla asfáltica 14
Figura 2.9. Condiciones de carga del equipo de fatiga para viga a flexión. 14
Figura 3.1. Granulometría IV-A-12 21
Figura 4.1. Equipo de fatiga en 4 puntos y cámara de acondicionamiento. 24
Figura 4.2. Equipo de fatiga en 4 puntos 24
Figura 4.3. Equipo compactador de rodillo. 25
Figura 4.4. Equipo compactador de rodillo. 25
Figura 4.5. Compactación de la mezcla asfáltica mediante rodillo. 27
Figura 4.6. Dimensiones Probetas AASHTO T321-14. 28
Figura 4.7. Probetas cortas según AASHTO T321 -14 28
Figura 4.8. Secado de Probetas elaboradas. 29
Figura 5.1. Curva de Fatiga IV-A-12 sin RAP (PG 64-22) 36
Figura 5.3. Curva de Fatiga Mezcla IV-A-12 con 18% de RAP 38
Figura 5.2. Curva de Fatiga Mezcla IV-A-12 (PG 64-22) 39
Figura 5.4. Curva de Fatiga Mezcla 0% de RAP, 18% de RAP y Proyecto FONDEF. 40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Factores que afectan la rigidez y la respuesta a la fatiga en mezclas asfálticas. 12

Tabla 2-2. Terminología inglesa y española de los procedimientos de reciclado en caliente in situ. 17

Tabla 3-1. Propiedades del cemento asfáltico tradicional. 19

Tabla 3-2. Características del cemento asfáltico tradicional. 20

Tabla 3-3. Comparación Bandas a utilizar con Banda IV-A-12. 21

Tabla 3-4. Diseño Mezcla Asfáltica 3/4" con Asfalto tradicional CA24 y sin agregado de RAP. 22

Tabla 3-5. Diseño Mezcla Asfáltica 3/4" con Asfalto tradicional CA24 con 8% de RAP. 23

Tabla 5-1. Geometría y propiedad volumétrica de las Probetas 33

Tabla 5-2. Geometría y propiedad volumétrica de las Probetas 33

Tabla 5-3. Características de las mezclas asfálticas. 34

Tabla 5-4. Resultados de Ensayo de Fatiga 35

Tabla 5-5. Datos graficados en curva de fatiga. 36

Tabla 5-6. Resumen Mezcla IV-A-12 sin RAP (PG 64-22) 37

Tabla 5-7. Resultados de Ensayo de Fatiga Mezcla IV-A-12 con 8% de RAP 37

Tabla 5-8. Resumen Mezcla IV-A-12 con agregado 18% de RAP 38

Tabla 5-9. Resumen Mezcla IV-A-12 Asfalto Tradicional (PG 64-22) Proyecto FONDEF 39

Tabla 5-10. Comparación datos de mezcla y curvas de fatiga. 41

Tabla 8-1. Materiales utilizados para obtener la mezcla de áridos para la MAC sin RAP. 45

Tabla 8-2. Materiales utilizados para obtener la mezcla de áridos. 46

Tabla 8-3. Masa de áridos utilizados en MAC sin agregado de RAP. 46

Tabla 8-4. Materiales utilizados en MAC sin agregado de RAP. 46

Tabla 8-5. Materiales utilizados para obtener la mezcla de áridos para la MAC con 8% de RAP. 47

Tabla 8-6. Materiales utilizados para obtener la mezcla de áridos. 47

Tabla 8-7. Masa de áridos utilizados en MAC con 8% de agregado de RAP. 48

Tabla 8-8. Materiales utilizados en MAC con 8% de agregado de RAP. 48

Tabla 8-9. Propiedades Betún 49

Tabla 8-10. Propiedades Betún Tradicional 49

Tabla 8-11. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC con 8% de agregado de RAP ensayadas a una deformación de 500 [µstrain]. 50

Tabla 8-12. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una a una deformación de 500 [µstrain]. 51

Tabla 8-13. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una a una deformación de 250 [µstrain]. 52

Tabla 8-14. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una a una deformación de 350 [µstrain]. 53

Tabla 8-15. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una a una deformación de 600 [µstrain]. 54

Tabla 8-16. MAC 8% RAP a 500 [µstrain]. 55

Tabla 8-17. MAC sin agregado de RAP a 500 [µstrain]. 56

Tabla 8-18. MAC sin agregado de RAP a 250 [µstrain]. 57

Tabla 8-19. MAC sin agregado de RAP a 350 [µstrain]. 58

Tabla 8-20. MAC sin agregado de RAP a 600 [µstrain]. 59

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

El aumento constante del parque automotriz ha llevado a un continuo crecimiento en la construcción de las obras viales, exigiendo una mayor precisión y rigurosidad en su construcción, haciendo necesaria la búsqueda e implementación de nuevas formas y procesos de diseño, construcción y mantención acorde a los estándares de calidad exigidos. En esta búsqueda el reciclaje de materiales es una alternativa que nos permite la reutilización de materiales, reducción de costos de pavimentación, ahorro de importación y extracción de materia prima, disminución de los tiempos de intervención y reducción de volumen de botaderos.

Los suministros de asfalto reciclado (RAP) provienen del fresado de pavimento asfáltico, trozos de demolición de pavimentos asfálticos y excesos de producción.

En los pavimentos asfálticos el tráfico vehicular es el principal responsable de las cargas y deformación cíclicas que afectan su desempeño, propagándose desde su parte inferior hasta la superficie. Estos efectos son más evidentes en estados avanzados de su vida de servicio, donde el betún se ve afecto al envejecimiento, rigidización y fragilización. El principal ensayo utilizado para el estudio de estos efectos es el ensayo de fatiga, ya que es el esfuerzo más común al que son sometidos los pavimentos.

Los efectos de fatiga se presentan esencialmente de dos maneras. El agrietamiento con origen en su parte inferior hacia la superficie, asociado a la tracción provocada por las deformaciones en el fondo de la capa asfáltica y el agrietamiento con el origen en la superficie hacia parte inferior, el cual se encuentra asociado a una distribución no uniforme de las presiones de contacto horizontales y verticales, entre otros factores. Los antecedentes disponibles en Chile afirman que sus efectos se presentan en su mayoría en forma de fatiga proveniente de grietas que inician en el fondo de la capa asfáltica y suben.

Con el objeto de garantizar el desempeño de las nuevas mezclas asfálticas en caliente (MAC) con agregados de RAP, es necesaria la caracterización de su comportamiento a fatiga, donde el ensayo más adecuado para ilustrar este fenómeno corresponde al ensayo de vigas sometidas a flexión en cuatro puntos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Principal

Como objetivo principal de este estudio, se pretende caracterizar el comportamiento al desempeño con respecto del deterioro por fatiga, de una mezcla asfáltica en caliente (MAC), tradicional de control sin agregado de RAP, y obtener el parámetro N_{500} para una mezcla asfáltica en caliente con un 8% de agregado de RAP, mediante ensayos de laboratorio realizados en las dependencias del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras, LEMCO, perteneciente a la Universidad Técnica Federico Santa María, que permitan la obtención del parámetro N_{500} de esta MAC.

1.2.2 Secundarios

- Confeccionar probetas con la mezcla asfáltica a analizar según lo indica la norma AASHTO T321-14 [1].

- Comprobar, según el Manual de Carreteras (sección 8.302.38) [2], el porcentaje de vacíos presentes en la mezcla, estableciendo un rango de 4 a 6% de vacíos.

- Llevar a cabo ensayos de fatiga por cada mezcla asfáltica bajo distintas condiciones en el Equipo de Fatiga de 4 puntos.

- Obtener el parámetro N_{500}, el cual corresponde al número de ciclos obtenidos al aplicar una deformación de 500 [μstrain].

- Estimar el parámetro ϵ6 (épsilon 6), el cual corresponde a la deformación para la cual se obtiene un millón de ciclos de la MAC de control sin RAP, de la MAC con 8% de RAP y de la MAC con 18% de RAP.

- Analizar los resultados obtenidos, y entregar el reporte que indica la norma AASHTO T321-14 [1].

- Comparar los resultaros obtenidos en fatiga completa bajo la norma AASHTO T321-14 [1] de la MAC de control sin RAP y de la MAC con 18% de RAP.

- Clasificar mediante el parámetro N_{500} las MAC de control sin RAP, con 8% de RAP y con 18% de RAP.

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO

En el presente estudio se dan a conocer los resultados y análisis, a partir de ensayos de fatiga de 4 puntos, llevados a cabo según la normativa AASHTO T321-14 “Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending” [1], de tres mezclas asfálticas en caliente, las cuales están confeccionadas con betumen tradicional, con una granulometría consistente con una banda granulométrica IV-A-12, una será de una mezcla de control normal y las otras dos tendrán un agregado de RAP de un 8% y un 18%.

Los resultados son comparados con los obtenidos en el proyecto de "Desarrollo de Materiales para Recapados Asfálticos Utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados” FONDEF, presentes en la memoria de tesis de Esteban Marín [3].

Se presentarán las características de los materiales usados y parámetros volumétricos de diseño relevantes, pero el procedimiento de diseño (Marshall) utilizado para las tres mezclas, no forma parte de esta investigación.

Los ensayos de viga a flexión cargada en cuatro puntos presentan condiciones de cargas a deformación controlada, pre-establecida al 50% de la rigidez inicial, con onda de carga tipo sinusoidal a 10 [Hz] y 20 [°C], cumpliendo los parámetros presentes en la norma AASHTO T321-14 [1]. Estas condiciones representan el tránsito de vehículos a 90 [Km/h].

Fue necesario el uso del equipo hidráulico de flexión de cuatro puntos multi-dimensión, Cooper HYD-4PT, junto con el equipo compactador de rodillo Roller Compactor Multi Purpose CRT-RCMP-1111-01, para el desarrollo de la investigación.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Como metodología de trabajo se presenta:

a) Estudio Bibliográfico

Recopilación de memorias y tesis relacionadas con los ensayos de fatiga y la caracterización de este deterioro, así como de las normas y manuales necesarios para realizar este trabajo. Selección de documentos relacionados con el RAP y materiales requeridos en este estudio.

b) Ensayos de laboratorio

La elaboración de las probetas utilizadas en los ensayos de fatiga, según AASHTO T 321-14 [1], ajustando la cantidad de mezcla hasta obtener el porcentaje de vacíos solicitado, para su posterior ensayo en el Equipo de Fatiga de 4 puntos. Los ensayos serán realizados en las dependencias del Laboratorio LEMCO, perteneciente al Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María, Casa Central, Valparaíso. En este lugar se dispone del Equipo de Fatiga de 4 Puntos y el Compactador de Rodillo utilizados en este trabajo.

c) Análisis de Resultados

Análisis de datos obtenidos a través de los ensayos de fatiga, los que fueron utilizados para la caracterización de las distintas MAC con agregado de RAP.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente estudio se encuentra estructurado en 8 capítulos, los cuales se detallan a continuación:

Capítulo 1: Introducción.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica.

En este capítulo se presentan los estudios de fatiga en mezclas asfálticas en caliente, donde se incluyen los ensayos que permiten replicar esta condición de falla y las características de estos ensayos. Se realiza una revisión del proceso de fabricación, de los factores que condicionan los ensayos y las normas asociadas a éstos.

Capítulo 3: Mezcla asfáltica en Estudio.

En este capítulo se describen los distintos materiales utilizados en la elaboración de la mezcla asfáltica. Se presenta el RAP, sus características, propiedades y procedencia. También se detallan características del diseño.

Capítulo 4: Condiciones de laboratorio.

En este capítulo se describe el procedimiento, los equipos requeridos en la elaboración de las probetas, y las condiciones bajo las cuales son llevados a cabo los ensayos: temperatura, carga, frecuencia, tipo de pulso de carga, etc.

Capítulo 5: Análisis de Resultados.

En esta sección se presentan los resultados en los ensayos de fatiga, junto los parámetros de evaluación. Con la información obtenida se realiza la caracterización y las curvas de desempeño de la mezcla. Los resultados son comparados con otras mezclas de interés.

Capítulo 6: Conclusiones

Se presentan las conclusiones y comentarios basados en este estudio.

Capítulo 7: Referencias

Capítulo 8: Anexos

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta revisión bibliográfica se presentan los principales tópicos de fatiga en mezclas asfálticas en caliente, donde se incluyen los ensayos que permiten replicar esta condición de falla y las características de estos ensayos. Se realiza una revisión del proceso de fabricación, de los factores que condicionan los ensayos y las normas asociadas a éstos.

2.1 DETERIOROS REALIZADOS POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los pavimentos se ven expuestos a diversas condiciones que alteran su vida de servicio, donde la carga del tránsito vehicular y las condiciones ambientales, climáticas y de temperatura, son los principales factores que dañan la carpeta asfáltica, siendo el agrietamiento por fatiga uno de las principales fallas y la más común en Chile.

El agrietamiento por fatiga en carpetas asfálticas se presenta principalmente por la combinación de cargas de tráfico y factores ambientales y son consideradas un deterioro estructural mayor. Se genera principalmente bajo las huellas de los vehículos, donde las cargas pesadas son aplicadas o en zonas de grandes cambios de temperatura.

El agrietamiento por fatiga comienza comúnmente desde la base de la carpeta y se transmite a la parte superior de la carpeta, apareciendo como una fisura longitudinal. En etapas avanzadas con efectos extremos de fatiga se puede presentar la “piel de cocodrilo”, conocida así por su patrón de grietas.

El agrietamiento por fatiga puede aparecer debido a una mala compactación o una deficiente adherencia entre las capas, por cargas extremadamente pesadas, envejecimiento del asfalto, un drenaje insuficiente o por efectos del hielo-deshielo.

Esta falla genera problemas de irregularidad en el pavimento (IR), pérdida de capacidad estructural e infiltración de agua a la subestructura, reduciendo significativamente la vida de servicio del pavimento.

Con el fin de reducir los efectos del agrietamiento por fatiga y extender la vida útil del pavimento, es necesario un buen diseño de la carpeta asfáltica, lo que requiere estimaciones adecuadas de las exigencias del tráfico y cargas, condiciones climáticas y del terreno donde será instalado.

2.2 FACTORES QUE AFECTAN A LOS ENSAYOS DE FATIGA

La elección del ensayo de fatiga y los resultados obtenidos de éste, se encuentran condicionados por diversos factores, tales como la elaboración y proceso de compactación de las probetas, los equipos utilizados y las condiciones ambientales, existiendo métodos de ensaye que permitirán recrear mejor las condiciones presentes en terreno que otros. Estos factores los podemos resumir en: Metodología de Fabricación de Probetas, Modos de Carga, Influencia de la Variabilidad de las Mezclas Asfálticas y la Influencia de las Variables de Carga y Condiciones ambientales.

En esta sección se describen los procedimientos de construcción de las probetas y los métodos de cargas utilizados en los ensayos.

2.2.1 Fabricación de Probetas para Ensayos de Fatiga.

La extracción de testigos resulta ser el método de obtención de probetas más representativas, pero este método puede resultar inconveniente producto del tamaño y forma de éstos, además de las alteraciones que esta intervención podría generar sobre la vida de servicio de la carpeta asfáltica. Motivo por el cual se ha trabajado en la fabricación de probetas que sean prácticamente un duplicado del pavimento in-situ, en términos de composición, densidad y propiedades de diseño de la mezcla asfáltica estudiada. Los principales métodos de compactación son: Compactación Estática, Compactación por Impacto, Compactación por Amasado, Compactación Giratoria y Compactación con Rodillo.

2.2.1.1 Compactación Estática

Procedimiento que implica la colocación de la mezcla asfáltica en un molde con determinadas dimensiones, para luego aplicar una carga estática, de manera gradual y de compresión. Es un método simple, pero con la desventaja en la orientación de las partículas de los agregados, que no se asemejan a las obtenidas en terreno, por lo que no recrea de manera precisa la compactación in situ.

2.2.1.2 Compactación por Impacto

En este método, la mezcla asfáltica es introducida en un molde, donde posteriormente es compactada por la aplicación de cargas de impacto repetitivas, mediante la acción de un martillo que impacta por caída libre desde una altura fija. La ventaja de este método de compactación es la gran cantidad de energía que puede ser aplicada mediante un equipo de bajo costo, maniobrable y transportable, que permite la fabricación de probetas en terreno y laboratorio. La gran cantidad de energía transferida, es a la vez su mayor desventaja, debido a que puede ocasionar la fractura de las partículas pétreas y la ruptura de la película de asfalto que rodea al agregado, induciendo un mejor desempeño al ahuellamiento que las mezclas in situ. El equipo más característico empleado para esta compactación es por medio del Martillo Marshall, que se muestra en la Figura 2.1. Equipo disponible en las dependencias del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras, de la Universidad Técnica Federico Santa María

Figura 2.1. Equipo Marshall

2.2.1.3 Compactación por Amasado

La compactación se lleva a cabo por medio de cargas repetitivas de un pisón considerablemente más pequeño con respecto a la probeta compactada. La magnitud de la carga aplicada por el pisón va aumentando gradualmente con cada aplicación, para luego mantenerse por un periodo corto de tiempo y finalmente liberar la carga. Esta compactación tiene la ventaja de reproducir la orientación de las partículas de manera similar a la obtenida en terreno.

2.2.1.4 Compactación Giratoria

La mezcla asfáltica es compactada en una probeta cilíndrica, sometiéndola a movimientos giratorios mientras se mantiene la presión en los extremos de la probeta por medio de dos émbolos de caras paralelas. Este método entrega resultados de compactación similares a los obtenidos en terreno, pero sólo pueden ser fabricadas probetas cilíndricas, la que es su principal desventaja. Equipo disponible en las dependencias del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras, de la Universidad Técnica Federico Santa María Figura. En la Figura 2.2 se observa el equipo y en la Figura 2.3 se presenta la probeta compactada resultante del procedimiento.

Figura 2.2. Compactador Giratorio.

Figura 2.3. Probeta compactada.

2.2.1.5 Compactación con rodillo.

Este método de compactación simula de manera real las condiciones a las que son sometidas las probetas en terreno, donde su principal ventaja es la orientación de las partículas del agregado y densidad de la mezcla asfáltica fielmente recreada. El alto costo del procedimiento y equipo especializado que se requiere hacen de ésta su principal desventaja. Existen equipos alternativos más pequeños, manteniendo las ventajas de este método de compactación. Equipo disponible en las dependencias del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras, de la Universidad Técnica Federico Santa María En la Figura 2.4 se observa el equipo y en las Figura 2.5 y 2.6 se presenta la probeta compactada resultante del procedimiento.

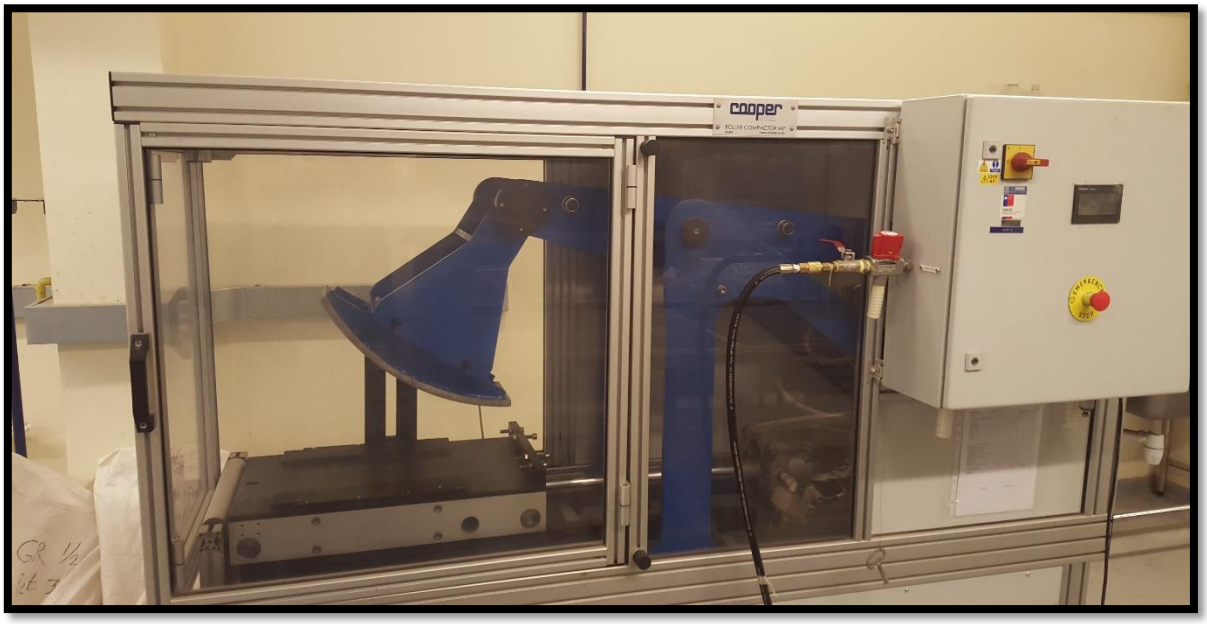

Figura 2.4. Compactador de rodillo.

Figura 2.5. Probeta compactada con rodillo.

Figura 2.6. Probetas compactadas con rodillo y desmoldadas.

2.2.2 Modos de Carga

La fatiga está asociada al deterioro que se produce en un material como resultado de la aplicación de cargas cíclicas, de magnitud muy inferior a la resistencia máxima soportable de dicho material. El agrietamiento por fatiga en las mezclas asfálticas es uno de los deterioros más frecuentes en los pavimentos flexibles. En este contexto, el tránsito vehicular y las tensiones térmicas como resultado de las variaciones de temperatura, corresponden a las cargas cíclicas a las que se ve sometido el pavimento flexible, dando lugar a un continuo agrietamiento y rotura de la estructura de pavimento.

Estas respuestas y comportamientos de la mezcla asfáltica se intentan recrear en laboratorio, representando los esfuerzos a los que es sometida la estructura del pavimento mediante métodos estandarizados. En los ensayos de laboratorio las probetas son sometidas a una serie de cargas cíclicas, manteniendo constante la tensión, deformación o desplazamiento aplicado, hasta alcanzar el estado de falla de la mezcla. Las mezclas van perdiendo carga hasta llegar a un 50% de su carga inicial, considerado como el límite de fallo por fatiga. Habitualmente se hace uso de dos modos de carga en los ensayos de fatiga, por esfuerzo constante (esfuerzo controlado) o deformación constante (deformación controlada). En el modo de carga de esfuerzo controlado, éste es mantenido constante, mientras la probeta va aumentando su deformación con cada ciclo y a su vez pierde resistencia. En el modo de carga de deformación constante, la probeta es sometida a una deformación constante mientras el esfuerzo va disminuyendo con cada ciclo y a su vez pierde resistencia.

La vida a fatiga obtenida por el ensayo a esfuerzo controlado es menor que la obtenida por el ensayo a deformación controlada [SHRP A-404, 1994] [4]. Además, mezclas asfálticas más rígidas tienen mejor desempeño bajo el modo de carga de esfuerzo controlado y peor bajo el modo de carga de deformación controlada [SHRP A-404, 1994] [4].

2.2.3 Variabilidad de las Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas y su comportamiento se encuentran condicionadas por numerosos factores, muchos de los cuales se encuentran determinados en el diseño de la mezcla asfáltica, como el tipo de betún, granulometría, temperatura y propiedades volumétricas. Si bien estos parámetros deben ser controlados, son siempre susceptibles a variaciones, y se ven reflejadas en el desempeño a la fatiga y su vida de servicio en la Tabla 2.1, [Tangella et al., 1990] [5].

Tabla 2-1. Factores que afectan la rigidez y la respuesta a la fatiga en mezclas asfálticas.

Factor	Cambio en el factor	Efectos debido a cambio en el factor		
		En la rigidez	En la vida a la fatiga en ensayos a esfuerzo controlado	En la vida a la fatiga en ensayos a deformación controlada
Viscosidad del asfalto (rigidez)	Incremento	Incremento[1]	Incremento[1]	Incremento
Contenido de asfalto	Incremento	Incremento	Incremento	Incremento[2]
Granulometría	Abierta a densa	Incremento	Incremento	Incremento[3]
Contenido de vacíos de aire	Disminución	Incremento	Incremento	Incremento[3]
Temperatura	Disminución[4]	Incremento	Incremento	Incremento

[1] Alcanza un nivel óptimo por sobre el requerido para estabilidad.

[2] No hay datos significativos. Condiciones conflictivas en el aumento de rigidez y la reducción en la deformación de asfalto hacen que esto sea especulativo.

[3] No hay datos significativos

[4] Los enfoques limitan.

2.2.4 Carga y Condiciones ambientales.

Tipo, duración del pulso de carga y la temperatura de ensayo en laboratorio, son las variables de carga y condiciones ambientales que tienen implicancia directa en el desempeño de la vida a fatiga de la MAC. Por otro lado el tiempo de carga y el espesor de la carpeta asfáltica, se relacionan a su vez con la velocidad del tránsito vehicular.

Se busca recrear y representar de la forma más fehaciente los efectos sobre las carpetas asfálticas, esto es magnitud, frecuencia y duración, mediante la aplicación de un pulso de carga adecuado. Los tipos de pulsos de carga cíclicos dinámicos más utilizados son el haversine y el sinusoidal, los cuales se presentan en la Figura 2.7.

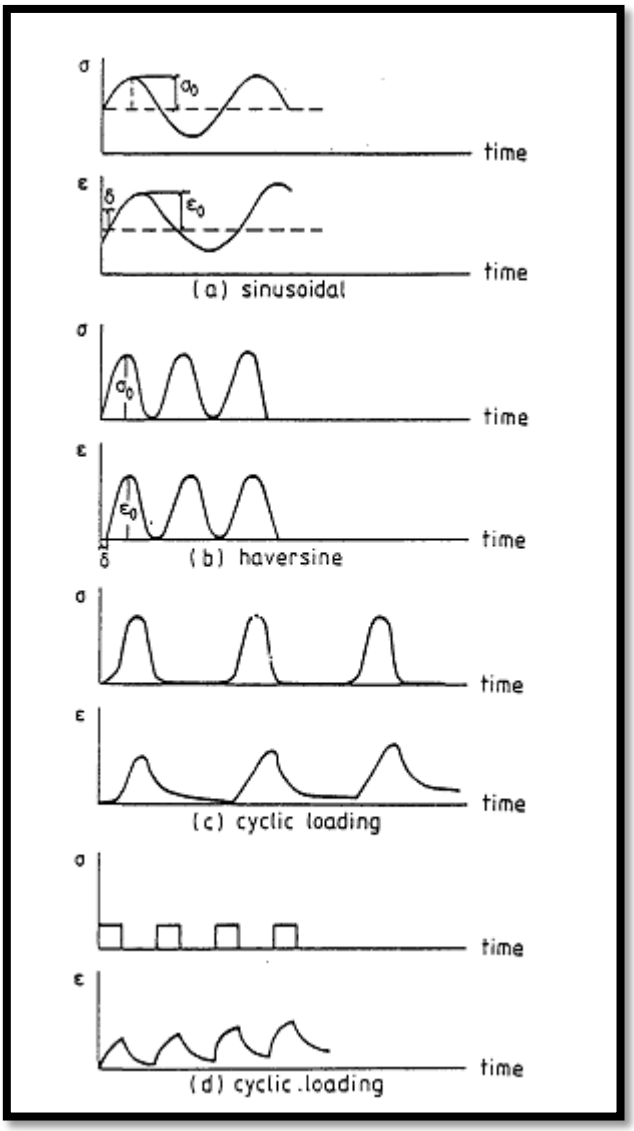

Figura 2.7. Tipos de pulso de carga [Tangella et al., 1990] [5].

2.3 MÉTODO DE ENSAYE VIGA A FLEXIÓN

Se busca recrear en laboratorio los esfuerzos a los que es sometida la mezcla asfáltica, con diferentes tipos de probetas para ensayos a flexión de dos, tres o cuatro puntos de apoyo, presentados en la Figura 2.8.

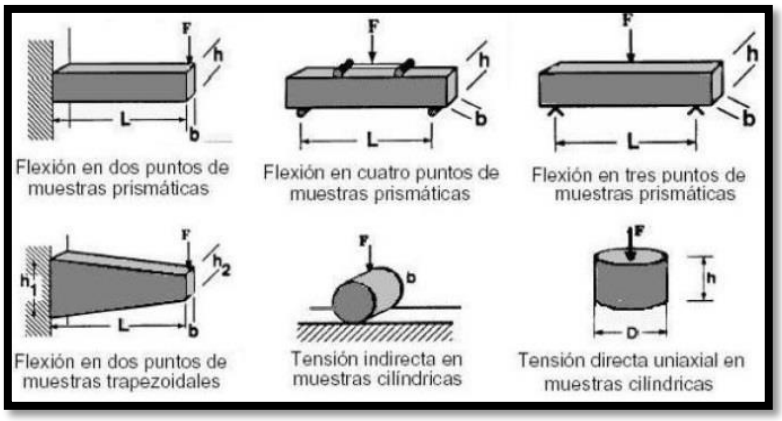

Figura 2.8. Tipos de ensayos de fatiga en mezcla asfáltica

En los ensayos de flexión se induce una deformación o esfuerzo cíclico por acción de una carga vertical aplicada en el centro de vigas rectangulares, hasta alcanzar el estado de falla de las probetas. Existen diferentes tipos de ensayos de viga a flexión, donde la carga se aplica de manera repetida o sinusoidalmente en el punto central o en el tercio central de la probeta, vigas empotradas sometidas a cargas sinusoidales rotatorias; y vigas en voladizo trapezoidales sometidas a cargas o deformaciones sinusoidales.

El método de ensaye más utilizado es el de la viga simplemente apoyada en 3 y 4 puntos. Este ensayo utiliza cargas en su tercio central en sentido vertical y perpendicular al eje longitudinal de la probeta. Se debe garantizar rotación y traslación libre en todos los puntos de carga y reacción, como se muestra en la Figura 2.9.

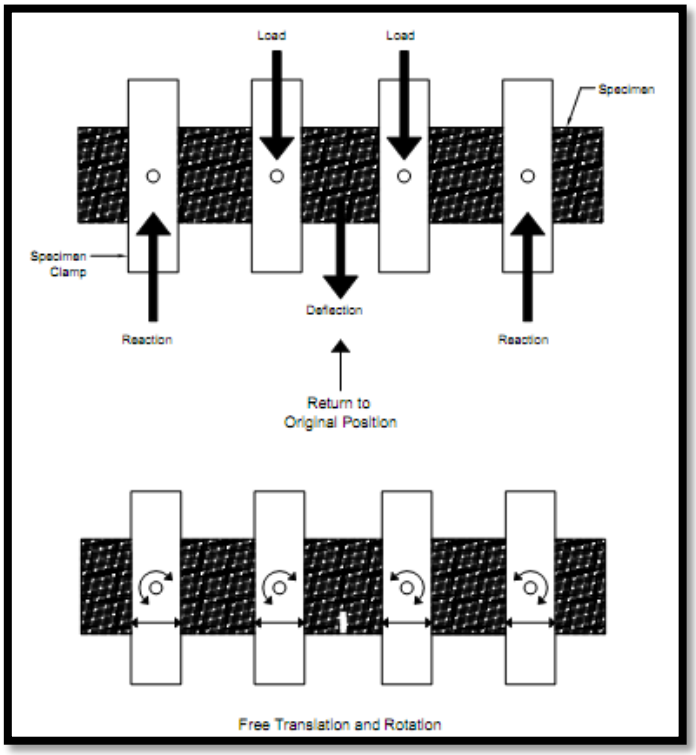

Figura 2.9. Condiciones de carga del equipo de fatiga para viga a flexión.

2.4 AGREGADO DE ASFALTO RECICLADO, RAP, A LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, MAC.

El pavimento asfáltico reciclado o en inglés *Reclaimed Asphalt Paviment, RAP,* son materiales de pavimento asfáltico extraídos y/o procesados de nuevo, conformado por cemento asfáltico y materiales pétreos. Los suministros de asfalto reciclado (RAP) provienen del fresado de pavimento asfáltico, trozos de demolición de pavimentos asfálticos y excesos de producción, entre otros.

La extracción y reutilización del pavimento asfáltico es una alternativa que nos permite:

- Reducción de costos de pavimentación.
- Ahorro de importación y extracción de materia prima.
- Disminución de los tiempos de intervención.
- Reducción de volumen de botaderos.

Existen distintas técnicas de reciclaje que serán presentadas a continuación.

2.4.1 Tratamientos de reciclado en frío

Un reciclado en frío tiene las ventajas de ahorrar energía, no degradan los ligantes asfalticos y son procedimientos de bajo costo comparados con los reciclados en caliente. Estos métodos se basan en la reutilización de los materiales defectuosos del pavimento y la adición de otros elementos.

2.4.1.1 Tratamientos in situ en frío con cemento.

Procedimiento basado en el fresado en frío de un cierto grosor del pavimento envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico, como el cemento (utilizado normalmente). El nuevo material se extiende y compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos.

2.4.1.2 Tratamientos in situ en frío con emulsiones bituminosas.

Esta técnica, reutiliza la totalidad de los materiales extraídos del pavimento envejecido. El procedimiento usual y básico consiste en el fresado en frío de cierto espesor del pavimento, este material se mezcla con una proporción determinada de emulsión y otros aditivos. El nuevo material se extiende y se compacta, seguido del curado de la capa reciclada y por último la extensión de una capa delgada de rodadura a base de mezcla caliente.

2.4.2 Tratamientos del reciclado en caliente

Las técnicas de reciclado de asfalto en caliente se dividen en reciclado en caliente realizado in situ y realizado en planta. Estas técnicas serán explicadas a continuación.

2.4.2.1 Tratamientos en caliente aplicados in-situ.

Consiste en conservación y reutilización del material bituminoso original, el que es mezclado in-situ, con o sin aporte de materiales nuevos, y posteriormente extendido y compactado, conformando la nueva capa asfáltica. Estos tratamientos son aplicables para las correcciones de las capas superficiales, producto del envejecimiento del ligante, desgaste de los áridos, pérdida de textura, etc. Si bien algunas técnicas permiten el aporte de una cierta capacidad de refuerzo, el espesor de estos tratamientos se limita a unos 8 [cm] como máximo, motivo por el cual su campo de aplicación está más bien dirigido a la renovación de las características superficiales y no trata de corregir problemas de insuficiencia estructural.

Los tratamientos in-situ requieren de equipos especiales que permitan elevar la temperatura de la superficie de la carpeta asfáltica facilitando la disgregación del material, entre 120°C y 160°C, para posteriormente hacer uso de la escarificadora o fresadora. El material disgregado es mezclado con betún blando y/o con agentes rejuvenecedores, a la vez que puede o no existir la adición de árido nuevo. A continuación se procede por la extensión y compactación del material mediante equipos convencionales, la cual se debe realizar lo más rápido posible evitando que la temperatura de la mezcla baje, ya que representa el mayor punto crítico de la operación.

Los principales tratamientos utilizados actualmente se explican a continuación según la terminología inglesa.

- *Reforming*

Consiste en devolver el perfil a una calzada bituminosa mediante calentamiento y escarificación, dándole posteriormente la forma deseada y compactando sin extraer ni adicionar ningún material.

- *Regripping*

Se trata del reforming acompañado de la incorporación de áridos mezclados o no con ligante para modificar alguna de sus características superficiales como, por ejemplo, la mejora de la rugosidad. La técnica de termoreperfilado se utiliza para corregir pequeños deterioros en la superficie del pavimento o como tratamiento previo de un refuerzo posterior, de manera que se obtenga una adherencia óptima entre las capas antiguas y las nuevas.

- *Repaving*

Consiste en devolver el perfil a una calzada bituminosa por calentamiento, escarificación (sacando eventualmente una parte de los materiales), nivelación, colocación de una nueva capa delgada de mezcla bituminosa y compactación. Este método, equivalente a la termoregeneración, es aplicado para corregir problemas de regularidad longitudinal o transversal, pérdida de material superficial, superficies deslizantes o permeables, con las ventajas derivadas de disponer de una nueva rodadura. A veces va precedida de la eliminación por fresado de los 2-3 [cm] superiores que se aportarán de material nuevo con el objetivo de mantener la rasante.

- *Remixing*

Se trata de la mejora de las propiedades de la capa superficial de un firme mediante calentamiento, escarificación (se extrae eventualmente una parte de los materiales), mezcla con las correcciones necesarias de la formulación (por aportación de áridos mezclados o no con ligante, de ligante o de mezcla bituminosa) y eventualmente la adición de un agente rejuvenecedor de ligante. La mezcla total es colocada en la obra y finalmente compactada.

- *Rejuvenating*

Es el mismo procedimiento que el remixing pero con la única aportación de un agente rejuvenecedor. Estos métodos de termoreciclado intentan solventar problemas de envejecimiento del ligante o defectos de la mezcla, aplicándose para espesores de 4 a 8 [cm].

A continuación en la Tabla 2.2 se presenta la equivalencia de terminología inglesa a española del reciclado en caliente in situ.

Tabla 2-2. Terminología inglesa y española de los procedimientos de reciclado en caliente in situ.

Terminología inglesa	Terminología española
Reforming	Termoreperfilado
Regripping	
Repaving	Termoregeneración
Remixing	Termoreciclado
Rejuvenating	

Estos tratamientos requieren de operaciones muy complejas, lo que conlleva el uso de grandes máquinas especializadas muy costosas y limita su uso a las autopistas. Las altas temperaturas y las emisiones de humo sugieren riesgos para los trabajadores, que deben ser considerados.

2.4.2.2 Reciclaje en caliente en planta.

El reciclado en planta de pavimentos asfálticos consiste básicamente en retirar el material de las capas asfálticas deterioradas mediante el fresado o demolición, o mezclas nuevas no utilizadas, como consecuencia de excedentes o por no cumplir con las especificaciones de proyectos, y su transporte a una central de fabricación en la que es acopiado, caracterizado y eventualmente procesado, hasta cumplir con condiciones de tamaño y humedad, entre otras.

Posteriormente es mezclado en caliente con áridos vírgenes, betún nuevo y/o agentes rejuvenecedores, en las proporciones adecuadas, para producir nuevas mezclas en caliente capaces de cumplir con los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad exigidos. Esta mezcla bituminosa compuesta en parte de material reciclado, es colocada y compactada en obra como si se tratara de una mezcla convencional.

Es de suma importancia respetar los principios generales aplicados a las técnicas de reciclado en caliente en planta:

1. Las mezclas obtenidas por reciclado deben cumplir con los mismos requisitos que las mezclas convencionales equivalentes. Esto es un parámetro limitativo en el contenido de RAP a adicionar debido a la falta de regularidad de éste.
2. Las características del bitumen asfáltico final de la mezcla deben estar en el rango o próximas a las del bitumen asfáltico que serían aplicables en la mezcla equivalentes con áridos nuevos. Esto implica la utilización de betunes nuevos con mayor penetración o con agentes rejuvenecedores a medida que aumenta la proporción de RAP en la mezcla o bien el bitumen del RAP se encuentre muy envejecido. Asimismo, al aumentar la proporción de RAP, deberá disminuir la de bitumen asfáltico a añadir, con el objeto de mantener un contenido total de asfalto adecuado.
3. Un mezclado eficaz debe ser capaz de entregar a la mezcla homogeneidad, por lo que el RAP debe alcanzar una temperatura elevada que permita una fluidificación de bitumen, su mezcla con el nuevo bitumen y la integración de éstos con los áridos.
4. El sobrecalentamiento de los áridos, equipos y de todos los materiales involucrados debe ser registrado, para evitar un envejecimiento adicional producto de la transferencia de calor en la mezcla.

3 MEZCLA ASFÁLTICA EN ESTUDIO

En esta sección se describen los materiales utilizados en la elaboración de la mezcla asfáltica mediante el método Marshall.

3.1 MEZCLA ASFÁLTICA

Tanto el diseño de la mezcla asfáltica, como los materiales fueron proporcionados por la empresa ASFALCURA S.A., y es la misma utilizada en la memoria de Nicolás Montalva Gorodesky [6]. Las características de la mezcla como el porcentaje de asfalto, dosificación de áridos y porcentaje de vacío serán presentadas a continuación.

3.2 BETÚN ASFÁLTICO

Generalmente se utilizan dos tipos de betunes asfálticos en la elaboración de las MAC, los betunes tradicionales y betunes modificados con algún tipo de polímero. La clasificación tradicional, entrega una especificación según la viscosidad de éste y requiere de un gran número de ensayos, entre ellos los de punto de ablandamiento, viscosidad, Frass, etc.

También es posible realizar una clasificación por grado de desempeño PG, por sus siglas en inglés Performance Grade, según la norma AASHTO M 320 [7] “Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder”, la cual representa las condiciones

del pavimento mediante una doble numeración (PG XX-YY). El primer parámetro (XX) corresponde a la temperatura promedio más alta registrada en el pavimento en el periodo de siete días consecutivos. El segundo parámetro (YY) corresponde a la temperatura mínima registrada en el pavimento. Los betunes asfálticos son sometidos a distintos ensayos reológicos, a diferentes temperaturas y a diferentes niveles de envejecimiento, con el objeto de prever el real impacto sobre el desempeño del pavimento.

En este estudio realizado a las tres mezclas se usó como ligante un betún asfáltico tradicional, CA-24, con porcentajes de asfalto de 5% y de 4,75% para las mezclas sin RAP y 8% de RAP respectivamente.

3.2.1 Asfaltos Tradicionales:

El original de los asfaltos tradicionales es generalmente como resultado de procesos de destilación del petróleo. Las características de estos asfaltos dependerán directamente de las operaciones de la refinería y de la composición química que posea el petróleo. Es posible aumentar la rigidez y disminuir la susceptibilidad térmica mediante un proceso de soplado, donde se someten a temperaturas entre 240°C y 320°C para transformar los elementos de su estructura molecular.

La clasificación PG del bitumen tradicional y los valores de la temperatura intermedia y baja del bitumen recuperado, después de haber sido mezclado con el agregado de RAP para los distintos porcentajes, se muestran en la Tabla 3.1 y en la Tabla 3.2 Se presentan los valores de distintos ensayos que caracterizan el bitumen tradicional original.

Tabla 3-1. Propiedades del cemento asfáltico tradicional.

LIGANTE	GRADO XX	GRADO YY	INTERMEDIA
Bitumen original	64	-22	21,6
Bitumen recuperado 8% RAP	-	-22	21
Bitumen recuperado 18% RAP	-	-16	21,8

Tabla 3-2. Características del cemento asfáltico tradicional.

Ligante Original		
Ensayo Propiedad	**Resultados del Ensayo**	**Criterio**
Punto de Inflamación	317 [°C]	230 [°C] mín.
Viscosidad rotacional 135°C	0,493 [Pa·s]	3 [Pa·s] máx.
Reómetro dinámico de corte G*/Send@64°C	1,71 [kPa]	1,00 [kPa] mín.
RFTO- Ligante Envejecido		
Ensayo Propiedad	**Resultados del Ensayo**	**Criterio**
Pérdida de masa	0,01%	1,00% máx.
Reómetro Dinámico de Corte G*/Send@64°C	3,58 [kPa]	2,20 [kPa] mín.
PAV - Envejecimiento del ligante		
Ensayo Propiedad	**Resultados del Ensayo**	**Criterio**
Reómetro Dinámico de Corte G*Send@25°C	4940 [kPa]	5000 [kPa] máx.
Reómetro de Flexión Stiffness@-12°C	142,03 [MPa]	300 [MPa] máx.
Reómetro de Flexión Valor m @-12°C	0,368	0,300 mín.

3.3 ÁRIDOS

Los áridos utilizados para este estudio fueron suministrados por la empresa ASFALCURA S.A., provienen de la misma fuente y sus características se presentan en el Anexo 8.1.

3.4 GRANULOMETRÍAS

La granulometría a utilizar fue proporcionada por la empresa ASFALCURA S.A. y se encuentra dentro de los parámetros de una banda granulométrica IV-A-12.

La banda granulométrica IV-A-12 es una de las bandas más utilizadas en nuestro país, corresponde a una del tipo semidensa, el tipo de granulometría más utilizado en pavimentos asfálticos, una de las más económicas y fáciles de producir, y mediante una buena compactación se pueden obtener mezclas durables.

A continuación se presenta la banda IV-A-12 y las Mezclas utilizadas para su comparación, en Tabla 3.3, además las bandas granulométricas en la Figura 3.1.

Tabla 3-3. Comparación Bandas a utilizar con Banda IV-A-12

Porcentaje que pasa en peso					
Tamiz		Mezcla Sin RAP	Mezcla 8% RAP	Banda Especificada	
mm	ASTM			IV-A-12	
25	**1"**	100	100	100	100
20	**3/4"**	100	100	100	100
12,5	**1/2"**	88	88	80	95
10	**3/8"**	76	76	70	85
5	**N°4**	53	52	43	58
2,5	**N°8**	34	34	28	42
0,63	**N°30**	17	16	13	24
0,315	**N°50**	13	12	8	17
0,16	**N°100**	9	9	6	12
0,08	**N°200**	6	6	4	8

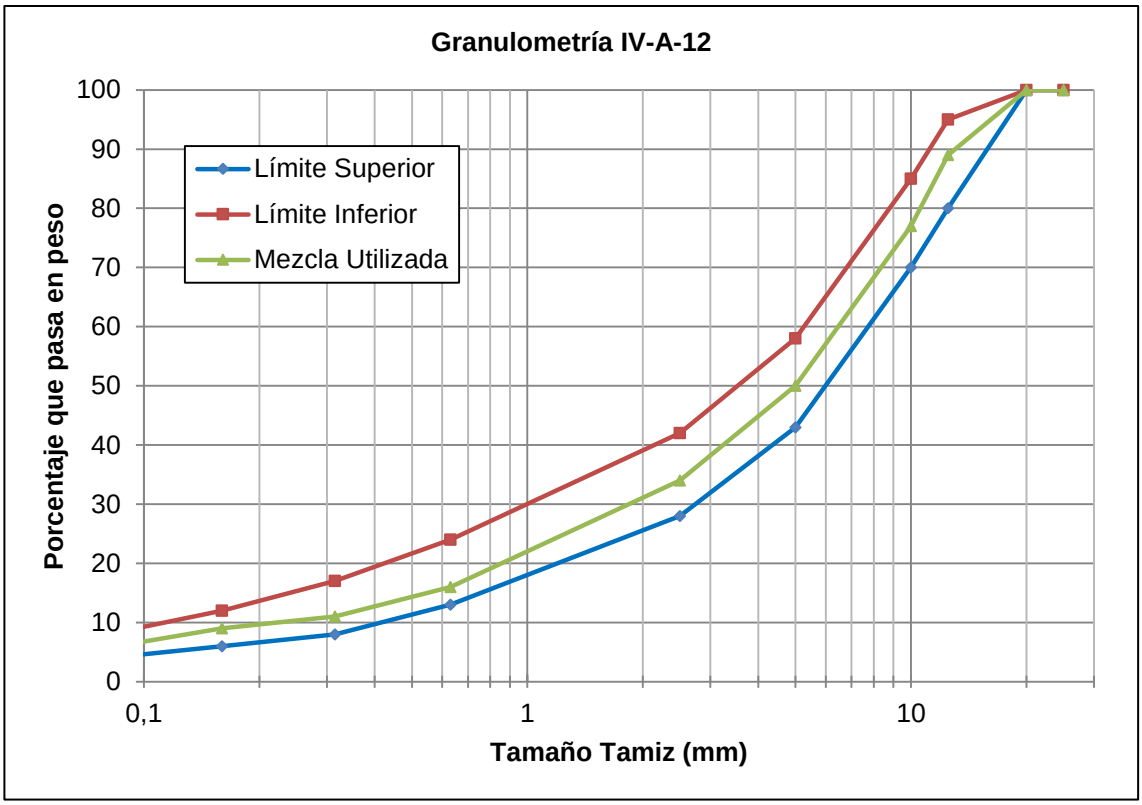

Figura 3.1. Granulometría IV-A-12

3.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

3.5.1 Método Marshall

Técnica de diseño inventada por Bruce Marshall y normalizada por US Army Corps of Engineers, catalogado como ASTM D 1559 -1998 [8]**.**

El método Marshall corresponde a un conjunto de experimentos de laboratorio dirigidos al adecuado diseño de una mezcla asfáltica. Esto se realiza mediante el estudio de estabilidad, fluencia, densidad y vacíos de la mezcla.

Una de las principales virtudes de este método es la importancia que le da a las propiedades de densidad/vacío de la mezcla asfáltica. Con esto se puede asegurar una proporción volumétrica de los componentes de la mezcla, dentro de los rangos adecuados para garantizar una mezcla durable. Sin embargo, este método se realiza con una compactación de laboratorio mediante impacto, que no simula lo que le ocurre a la mezcla en condiciones reales de compactación en terreno.

3.5.2 Mezcla IV-A-12 con betún asfáltico tradicional PG 64-22 sin RAP y con 8 % de RAP

El diseño de las mezclas asfálticas fue provisto por la empresa ASFALCURA S.A. y hecho mediante el método Marshall. Ambos cumplen con bandas granulométricas consistentes con las bandas IV-A-12. La clasificación del betún asfáltico proporcionado corresponde a un PG 64-22, cumpliendo de este modo el grado de performance para varios sectores de la zona central de nuestro país. **[16]**

En el diseño de las mezclas se consideró un 5% de vacíos, lo que fue exigido en todas las probetas con una tolerancia de ±1%.

El diseño de las mezclas asfálticas considera porcentajes de asfalto de 5% y de 4,75% para las mezclas sin RAP y 8% de RAP respectivamente.

Las características de las mezclas se presentan en las Tablas 3.4 y 3.5.

Tabla 3-4. Diseño Mezcla Asfáltica 3/4" con Asfalto tradicional CA24 y sin agregado de RAP.

Característica de la mezcla	
Densidad máxima de la mezcla [kg/m^3]	2477,0
Porcentaje de Asfalto respecto de la Mezcla (%)	5
Porcentaje de Vacíos (%)	5
Densidad de Diseño [kg/m3]	**2353**

Tabla 3-5. Diseño Mezcla Asfáltica 3/4" con Asfalto tradicional CA24 con 8% de RAP.

Característica de la mezcla	
Densidad máxima de la mezcla [kg/m^3]	2518,5
Porcentaje de Asfalto respecto de la Mezcla (%)	4,75
Porcentaje de Vacíos (%)	5
Densidad de Diseño [kg/m^3]	**2393**

La dosificación para el diseño se presenta en los anexos 8.1.1.1 y 8.1.2.1.

4 CONDICIONES DE LABORATORIO

En esta sección se describe de forma breve el procedimiento de elaboración de las probetas, se presentan los equipos utilizados en la caracterización de las mezclas asfálticas a fatiga y por último, las condiciones de ensayo.

4.1 EQUIPOS DE ENSAYOS

4.1.1 Máquina de Viga a Flexión de cuatro Puntos

Equipo servo-hidráulico controlado digitalmente Figura 4.1, que ensaya vigas de mezclas asfálticas apoyadas en cuatro puntos, que puede operar en dos modos de carga, esfuerzo controlado y deformación controlada. La onda de carga aplicada es del tipo sinusoidal. Posee tres LVDT (Linear Variable Differential Transformer) que hacen posible las mediciones de deformaciones y cuenta además con cámara térmica, que hace posible el acondicionamiento térmico necesario para los ensayos y está condicionado para realizar ensayos bajo diversas especificaciones técnicas [AASHTO T 321-14; UNE-EN 1297-24, 2007].

Figura 4.1. Equipo de fatiga en 4 puntos y cámara de acondicionamiento.

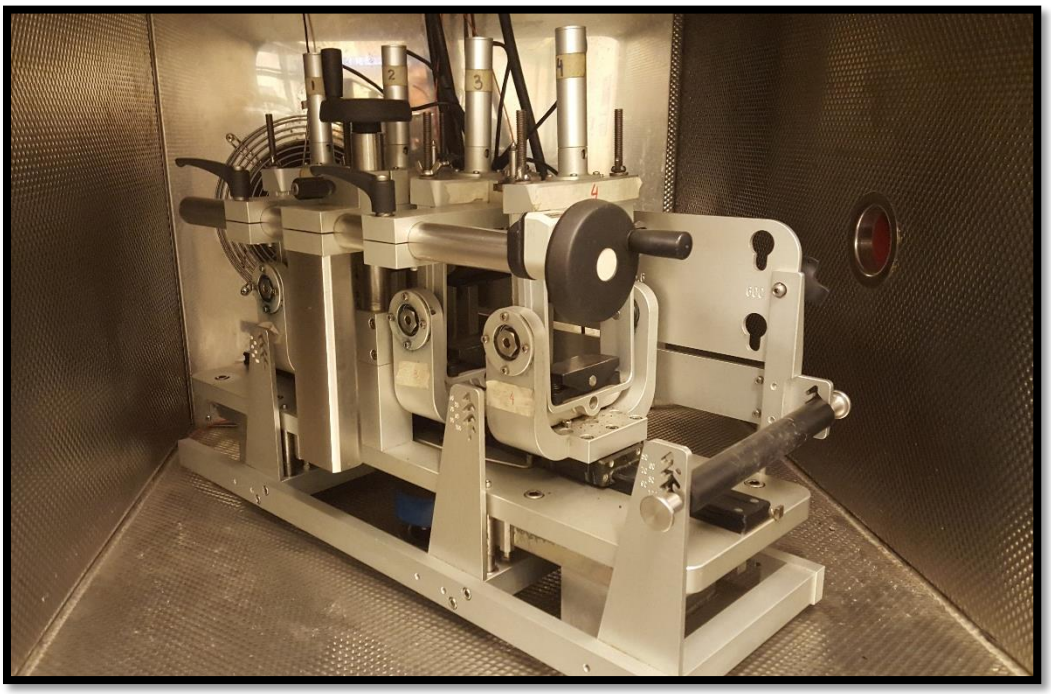

Figura 4.2. Equipo de fatiga en 4 puntos

4.1.2 Compactador de Rodillo

Compactador del tipo rueda rodante, con resultados muy semejantes a los obtenidos en terreno. Es operado digitalmente a través de un tablero táctil, donde es ingresada la rutina de compactación (ciclos de carga y magnitud) deseada. El compactador de rodillo aplica una carga móvil sobre un molde de dimensiones 500x380x100 [mm]. Equipo se presenta las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5.

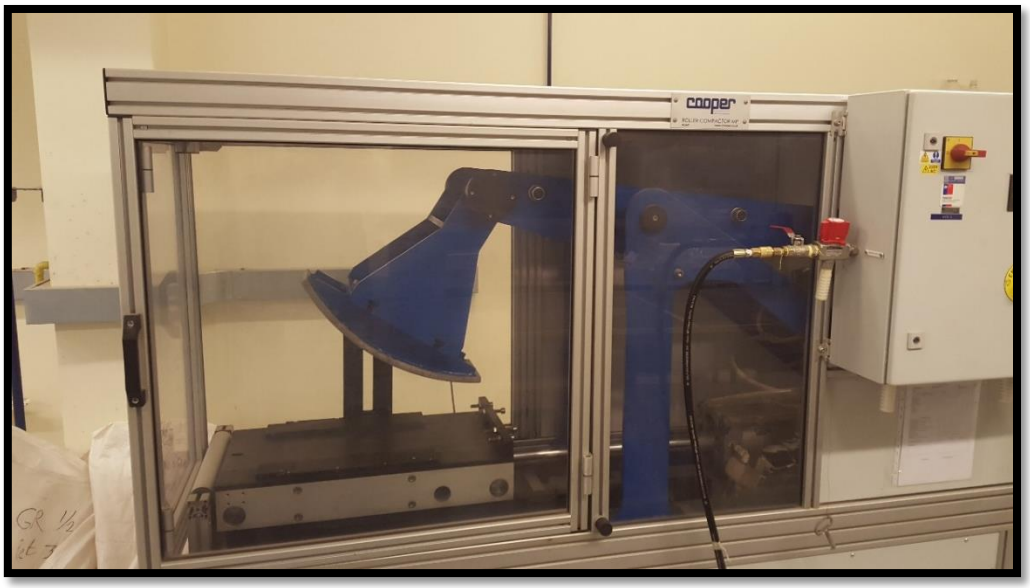

Figura 4.3. Equipo compactador de rodillo.

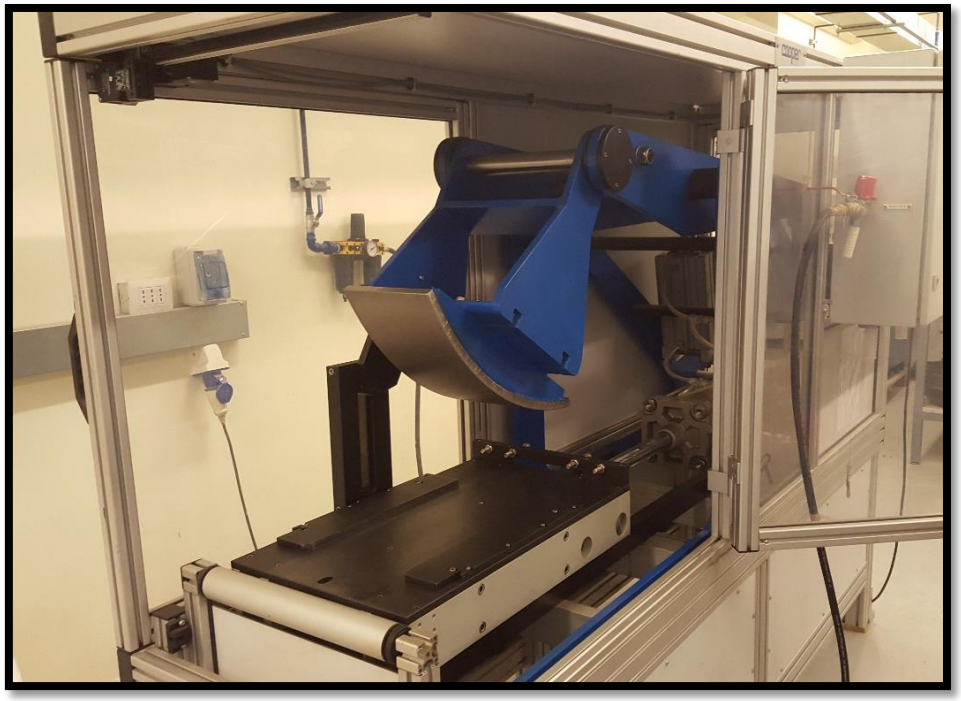

Figura 4.4. Equipo compactador de rodillo.

4.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS

4.2.1 Mezclado de los áridos con Bitumen Asfáltico.

Es necesario conocer las características de los equipos empleados y del diseño de las MAC para efectos de cálculo de la cantidad de material a compactar, ya que son requeridas las dimensiones del molde del rodillo compactador (500mm x 180mm x 90mm), la densidad máxima de la mezcla sin compactar (DMM) y el porcentaje de vacíos asociado al diseño. Con la densidad de diseño y el volumen del molde se obtiene la cantidad de material requerida en cada probeta. Por otro lado, mediante la relación de contenido de betún asfáltico con respecto al peso de la mezcla, se consiguen las masas de áridos y betún asfáltico a ser empleados en cada probeta [9].

Los áridos y el RAP son dosificados, posteriormente ingresados al horno para el proceso de secado a temperaturas de 135 °C y 130 °C respectivamente, hasta alcanzar masa constante. Para este proceso los áridos y RAP son ingresados al horno en pailas a la hora de cierre del laboratorio, hasta el día siguiente.

La mañana siguiente el asfalto es ingresado al horno junto con los áridos, momento en el que se sube la temperatura de los hornos hasta la temperatura de mezclado, la cual es indicado por el diseño y proporcionada por la empresa ASFALCURA S.A. En la práctica la temperatura de los hornos es elevada al máximo de lo que permite el diseño, para de este modo evitar caídas de temperatura y asegurar una buena homogeneización de la mezcla.

La temperatura del asfalto es controlada periódicamente hasta alcanzar la temperatura de mezclado ideal indicada por el diseño. Una vez que el asfalto adquiere la temperatura ideal es retirado del horno al igual que las pailas con áridos y RAP. En primer lugar se procede con la incorporación de los áridos y RAP, los que son mezclados en una misma paila, colocada sobre una balanza y tarada. Posteriormente es vertido el bitumen asfáltico, controlando cuidadosamente que la cantidad de asfalto adicionada sea la calculada según el método del contenido de asfalto con respecto a la mezcla [9].

Con el bitumen asfáltico, áridos y RAP en una misma paila se procede al mezclado, proceso realizado de manera manual y hasta lograr la incorporación del árido con el asfalto. El resultado es una mezcla homogénea, de aspecto negro, con áridos cubiertos completamente por asfalto.

Cuando ya se tiene el árido completamente mezclado con el asfalto, se reingresa la mezcla en el horno. A partir de este momento se da paso a un acondicionamiento de la mezcla a 135 °C por 4 horas, correspondiente a un envejecimiento superpave a corto plazo, de acuerdo a lo indicado en AASHTO R30 – 2002 [10]. La mezcla es retirada del horno y mezclada cada hora. Este procedimiento simula el envejecimiento provocado por el transporte y colocación de la mezcla en terreno. El acondicionamiento favorece la homogeneización de las mezclas en laboratorio.

Terminado el proceso de acondicionamiento, la temperatura del horno es elevada a 145 °C, durante alrededor de 40 minutos, tiempo que le toma a la mezcla alcanzar la temperatura de mezclado óptima.

4.2.2 Compactación de la Mezcla Asfáltica.

La compactación es realizada con un equipo compactador de rodillo Cooper, Roller Compactor Multi Purpose CRT-RCMP-1111-01, el cual está equipado con un molde de dimensiones 500mm x 180mm x 90mm. Al momento de la compactación es importante prevenir las caídas de temperatura, por lo cual el molde es ingresado al horno al momento de iniciar el proceso de acondicionamiento de la mezcla y permanece en el horno hasta efectuar la compactación.

El molde es retirado cuando la mezcla alcanza la temperatura de compactación, al que se le aplica desmoldante. Esto es seguido por el llenado del molde con la mezcla asfáltica. El molde es sujetado con un perno de seguridad en el equipo compactador, se coloca un papel bañado con desmoldante en la parte superior del molde con la mezcla asfáltica y se aplica desmoldante en la superficie del rodillo, esto para evitar desprendimientos de la mezcla producidos por la adhesión de la mezcla en el rodillo (Figura 4.6). Una vez asegurado el molde y cerradas las compuertas se ejecuta la compactación.

Todos los procesos aquí descritos deben ser realizados de manera rápida y coordinados, ya que la mezcla es muy susceptible a la pérdida de temperatura, en especial durante el proceso de compactación.

Una vez finalizado el ciclo de compactación programado es retirado el molde y dejado enfriar hasta la mañana siguiente, para realizar su desmolde.

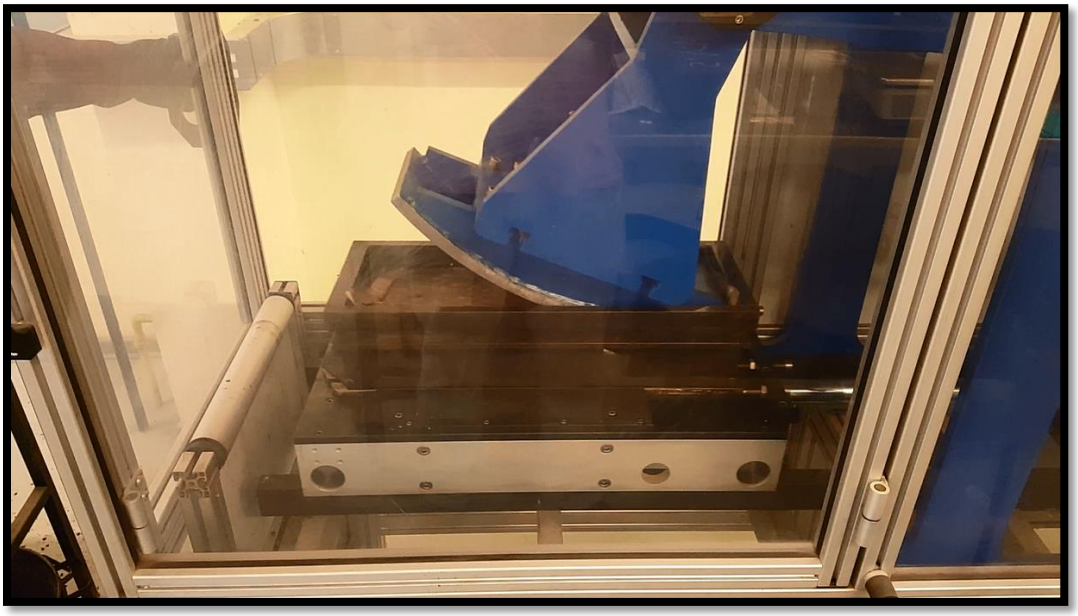

Figura 4.5. Compactación de la mezcla asfáltica mediante rodillo.

De la loseta resultante son extraídas mediante corte dos probetas de dimensiones 50mm x 63mm x 380mm ± 6 mm como indica la norma AASHTO T 321-14 (Figura 4.6). El proceso de corte requiere de líquido refrigerante para evitar los daños producidos por el calor de fricción. Las probetas cortadas se presentan en la Figura 4.7.

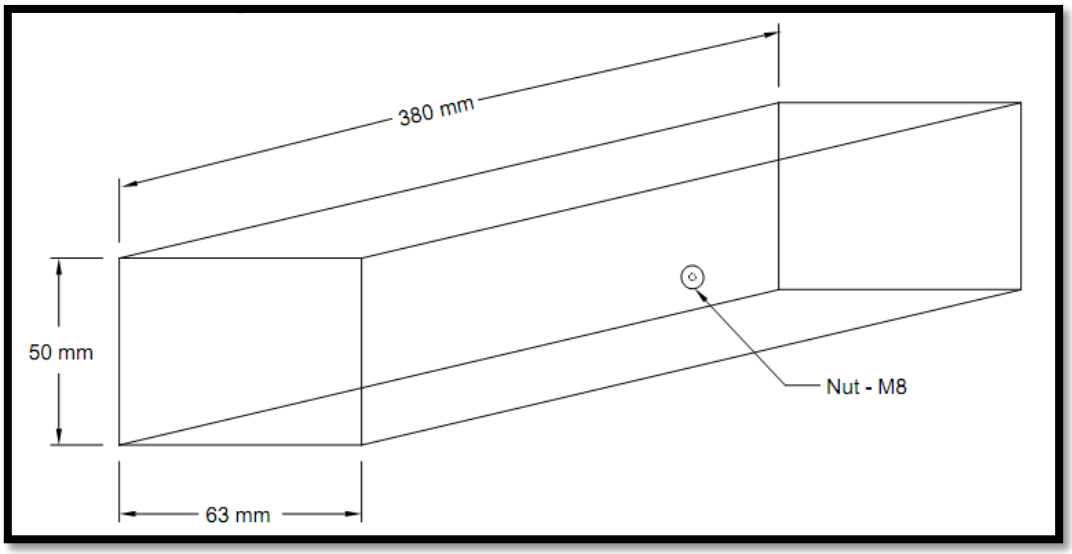

Figura 4.6. Dimensiones Probetas AASHTO T321-14.

Figura 4.7. Probetas cortas según AASHTO T321 -14

Una vez dimensionadas las probetas son secadas en horno a 50°C ± 5°C por 12 horas y hasta alcanzar masa constante Figura 4.8, como indica en Manual de Carreteras Vol. 8.302.38 [2] .

Figura 4.8. Secado de Probetas elaboradas.

4.2.3 Comprobación de Compactación de la Mezcla Asfáltica.

Al momento del dimensionamiento de las probetas es también extraído un testigo con el que se determina la densidad real de la mezcla, como indica el Manual de Carreteras Vol. 8.302.38 [2]. Esto asegura que las probetas finalmente ensayadas cuenten con las características de compactación y porcentaje de vacíos exigidos por el diseño.

El testigo es rebajado unos mm en cada uno de sus lados, para dejar lisas todas sus caras. El testigo también debe ser secado en horno a 50°C ± 5°C por 12 horas y hasta alcanzar masa constante, como indica en Manual de Carreteras Vol. 8.302.38 [2].

Con el testigo seco a masa constante se determina la masa por pesada al aire ambiente en condiciones seca, sumergido en agua y saturada superficialmente seca. Con estos datos se procede a calcular la densidad real de la probeta:

$$G = \frac{A}{\frac{B-c}{\rho w}} x\ 1.000(\frac{kg}{m^3}) \qquad (4\text{-}1)$$

Donde:

A: Masa de la probeta en el aire (g)

B: Masa de la probeta en el aire con superficie seca (g)

C: Masa de la probeta en agua (g)

Una vez verificado que se cumple con la densidad de diseño se asegura que las probetas son aptas para realizar el ensayo de fatiga.

4.3 CONDICIONES DE ENSAYE

Mediante la aplicación de cargas cíclicas el ensayo de fatiga permite recrear los efectos producidos por el tránsito de los vehículos sobre el pavimento asfáltico. Las probetas son sometidas a deformaciones controladas de 250 [µs], 300 [µs], 400 [µs] y 500 [µs], mientras van perdiendo rigidez hasta llegar a un 50% de su rigidez inicial, considerado como el límite de fallo por fatiga.

Los ensayos realizados a fatiga fueron ejecutados con las siguientes condiciones de acuerdo a la norma AASHTO T321-14 [1].

- Modo de ensayo: Deformación controlada;
- Tipo pulso de carga: Sinusoidal;
- Temperatura: 20 [°C];
- Frecuencia: 10 [Hz]; y
- Criterio de Falla: reducción de un 50% de la rigidez inicial.

4.3.1 Ecuaciones utilizadas en el ensayo de fatiga

En esta sección se describen todas las ecuaciones empleadas en el ensayo de fatiga, las cuales han sido extraídas de la norma AASHTO T321-14 [1].

Una vez alcanzado el 50% de la rigidez inicial, se detiene el ensayo y el software controlador entrega los siguientes parámetros por cada ciclo de carga alcanzado por la probeta:

- Rigidez flexural;
- Esfuerzo aplicado;
- Carga aplicada;
- Deformación (deflexión);
- Energía disipada;
- Energía disipada acumulada;
- Ángulo de fase.

Relaciones establecidas por la norma AASHTO T321-14 [1]

Esfuerzo máximo de tracción (Pa):

$$\boldsymbol{\sigma_t = (0,357 \cdot P)/(b \cdot h)^2} \qquad \textbf{Ecuación 4-1}$$

En donde:

P: Carga aplicada por el actuador, en Newton;

b: Ancho promedio de la probeta, en metros; y

h: Altura promedio de la probeta, en metros.

Deformación máxima de tracción (m/m):

$$\boldsymbol{\varepsilon_t = (12 \cdot \delta \cdot h)/(3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2)}$$ **Ecuación 4-2**

δ: Deflexión máxima ubicada en el centro de la viga o probeta, en metros;

a: Espacio entre las abrazaderas internas, 0,357/3 [m], (0,119 [m]); y

L: Longitud de la probeta medida a partir de las abrazaderas externas, 0,357 [m].

Rigidez flexural (Pa):

$$\boldsymbol{S = \sigma_t/\varepsilon_t}$$ **Ecuación 4-3**

Ángulo de fase (°):

$$\boldsymbol{\varphi = 360 \cdot f \cdot s}$$ **Ecuación 4-4**

En donde:

f: Frecuencia de carga, en [Hz]; y

s: Tiempo transcurrido entre P_{max} y δ_{max}, en segundos.

Energía disipada (J/m^3) por ciclo:

$$\boldsymbol{D = \pi \cdot \sigma_t \cdot \varepsilon_t \cdot \sin(\varphi)}$$ **Ecuación 4-5**

Energía disipada acumulada (J/m^3):

$$\boldsymbol{\sum_{i=1}^{i=n} Di}$$ **Ecuación 4-6**

En donde:

D_i: Energía disipada en el ciclo de carga i.

5 ANALISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga para las mezclas asfálticas estudiadas, sin RAP y la mezcla con 8 % de RAP, como también las características de las probetas ensayadas. Los resultados primeramente obtenidos corresponden a los ciclos de cargas como respuesta para cada nivel de deformación ε_t elegido como criterio de falla. A partir de esta información se generan datos y resultados complementarios, como las curvas de fatiga y los indicadores asociados a la caracterización de las mezclas. Todo esto basado en la correlación existente para la deformación unitaria de la tracción en la fibra más alejada del eje neutro de una viga a flexión y la vida a fatiga que representa.

La curva de fatiga, con la que se busca caracterizar el comportamiento del material asfáltico estudiado se generó mediante la ejecución de repetidos ensayos de fatiga a distintos niveles de deformación ε_t, en “µstrain” [mm/mm x 10-6] y la representación de los ciclos de falla para cada nivel.

Los indicadores utilizados son los siguientes:

Nf: Cantidad de ciclos de carga asociados a la reducción del 50% de la rigidez inicial para un nivel de deformación ε_t determinado;

ε_6: Nivel de deformación asociada a un millón de repeticiones de carga (10^6 ciclos) que causan la reducción de la rigidez en un 50%;

N_{500}: Cantidad de ciclos de carga que causan la falla para un nivel de deformación ε_t de 500 µstrain (mm/mm x 10^{-6}). Este valor adquiere relevancia debido a que es un nivel de deformación relativamente grande, el cual puede ser reproducido en recapados asfálticos, específicamente cuando es construido sobre pavimentos de hormigón [11].

Los resultados y datos obtenidos de los ensayos serán comparados con mezclas de similares características y que resultan ser de interés. La primera es la “Mezcla IV-A-12 con 18 % de RAP con Asfalto Tradicional”, ensayada y estudiada en la memoria de Nicolás Montalva [6]**.** El estudio de esta mezcla asfáltica resulta de gran valor, al ser ejecutada bajo las mismas condiciones de ensaye y parámetros de control en la elaboración de las probetas. La información obtenida resulta ser significativa en la caracterización del desempeño del RAP para los diseños de mezcla y su comportamiento a fatiga.

Son también de interés los resultados obtenidos por las mezclas ensayadas a fatiga en el proyecto FONDEF, "Desarrollo de Materiales para Recapados Asfálticos Utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados”, fabricada con asfalto tradicional y banda granulométrica similares a las de este estudio.

Las propiedades de las probetas, las características de la mezcla y los resultados obtenidos de sus ensayos se encuentran disponibles en el Anexo 8.3.

5.1 Propiedades de diseño, volumétricas y medidas geométricas de las probetas.

Para la selección de las probetas se debe en primer lugar controlar el porcentaje de asfalto y de vacíos de acuerdo al diseño. Se ha debido excluir aquellas probetas que no han cumplido con las características esperadas o por ser datos extremos, atípicos y no resultan ser representativos

5.1.1 Mezcla Asfáltica IV-A-12 sin RAP con Asfalto Tradicional CA 24.

Fueron elaboradas 14 probetas con la mezcla IV-A-12 sin RAP, con 5% de asfalto y un 5% de vacíos, de las cuales se han seleccionado 12 como representativas, y se han descartado 2 probetas.

En la Tabla 5.1 se presentan las propiedades volumétricas y medidas geométricas requeridas en los ensayos.

Tabla 5-1. Geometría y propiedad volumétrica de las Probetas

Probeta	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]	Vacíos [%]
M1V3P1	0,400	0,064	0,053	4,32
M1V3P2	0,399	0,064	0,054	4,32
M1V4P1	0,397	0,064	0,055	4,13
M1V4P2	0,389	0,064	0,053	4,13
M1V5P1	0,400	0,065	0,053	4,02
M1V5P2	0,399	0,064	0,054	4,02
M1P2	0,385	0,065	0,053	4,26
M1V7P2	0,399	0,062	0,053	4,01
M1P4	0,384	0,068	0,054	4,41
M1V6P1	0,400	0,064	0,054	4,11
M1V6P2	0,400	0,063	0,053	4,11
M1V7P1	0,404	0,064	0,054	4,01

5.1.2 Mezcla Asfáltica IV-A-12 con 8% de RAP con Asfalto Tradicional CA 24.

Fueron elaboradas 4 probetas con la mezcla IV-A-12, con un agregado de 8% de RAP, 4,75% de asfalto y un 5% de vacíos, donde se seleccionaron los 3 mejores resultados y que son considerados representativos.

En la Tabla 5.5 se presentan las propiedades volumétricas y medidas geométricas requeridas en los ensayos.

Tabla 5-2. Geometría y propiedad volumétrica de las Probetas

Probeta	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]	Vacíos [%]
M2P6	0,385	0,066	0,052	4,09
M2P7	0,399	0,066	0,054	4,65
M2P8	0,400	0,062	0,051	4,65

5.1.3 Resumen propiedades mezclas asfálticas.

A continuación en la Tabla 5.3 se describen y resumen las características de todas las mezclas asfálticas estudiadas.

Tabla 5-3. Características de las mezclas asfálticas.

Característica de la mezcla	Mezcla sin RAP	Mezcla con 8% de RAP	Mezcla con 18% de RAP	Mezcla IV-A-12 FONDEF
Densidad máxima de la mezcla [kg/m3]	2477	2518,5	2527,6	2460
Porcentaje de Asfalto respecto de la Mezcla [%]	5	4,75	4,25	5,5
Porcentaje de Vacíos [%]	5	5	5	4,5
Densidad de Diseño [kg/m3]	2352	2393	19449,9	2355

5.2 Resultados de los ensayos a fatiga.

A partir de los resultados obtenidos se generan indicadores y gráficos, utilizados para la comparación de mezclas consideradas semejantes y de interés.

5.2.1 Mezcla Asfáltica IV-A-12 sin RAP con Asfalto Tradicional CA 24.

El estudio de la mezcla asfáltica, su caracterización y los ensayos se llevaron a cabo según la norma AASHTO T 321-14 [1], para lo cual fue necesaria la realización de 3 ensayos en cada nivel de deformación: 250, 350, 500, 600 [μstrain].

A continuación en la Tabla 5.4 se presentan los resultados obtenidos por las probetas en los distintos niveles de deformación.

Tabla 5-4. Resultados de Ensayo de Fatiga

PROBETA	% VACÍOS	µs [mm/mm]	N° CICLOS	Promedio Nf
M1V3P1	4,32	250	9816	11165
M1V3P2	4,32		11690	
M1V4P1	4,13		11989	
M1V4P2	4,13	350	3345	2181
M1V5P1	4,02		1073	
M1V5P2	4,02		2126	
M1P2	4,26	500	693	882
M1V7P2	4,01		718	
M1P4	4,41		1235	
M1V6P1	4,11	600	363	313
M1V6P2	4,11		394	
M1V7P1	4,01		183	

La curva de fatiga en la Figura 5.1 se presenta mediante la correlación del número de ciclos hasta alcanzar el criterio de falla, correspondiente al 50% de la resistencia inicial de la probeta (abscisas) y los distintos niveles de deformación en µstrain a los que fueron sometidas las probetas (ordenadas). Los datos usados para realizar la curva son presentados en la Tabla 5-5.

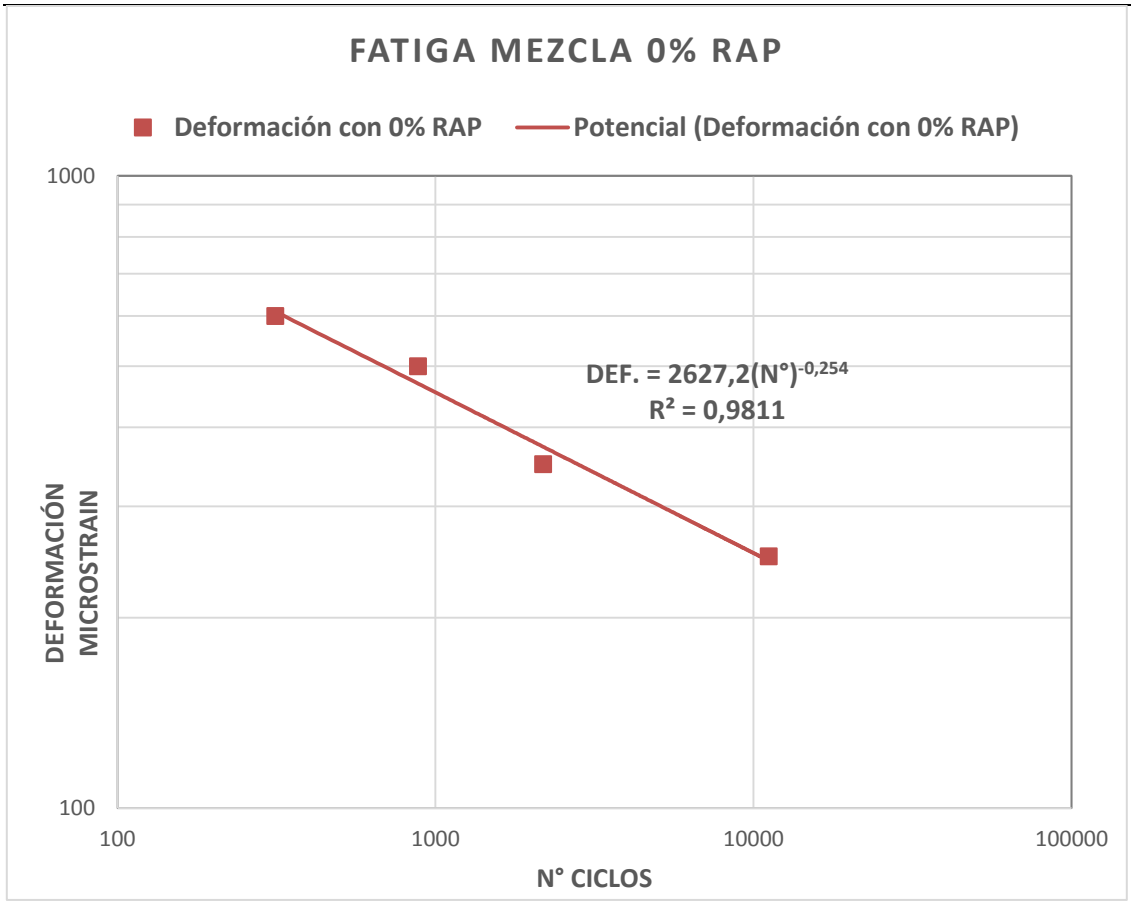

Figura 5.1. Curva de Fatiga IV-A-12 sin RAP (PG 64-22)

Fuente: Memoria Nicolás Montalva

Tabla 5-5. Datos graficados en curva de fatiga.

Número de Ciclos µs [mm/mm]	Promedio Nf
250	11165
350	2181
500	882
600	313

El gráfico hace posible extraer la curva de fatiga, que resulta ser dependiente de la deformación. En la ecuación 5-1 queda expresada la curva.

$$\boldsymbol{DEFORMACIÓN = 2627,2 \cdot (N° \ CICLOS)^{-0.254}}$$ **Ecuación 5-1**

La curva al ser normalizada con una serie potencial resulta con un valor de correlación R^2 de 0,9811, siendo una representación adecuada y ajustada al comportamiento esperado.

Con estos resultados es posible obtener el valor ε_6, nivel de deformación asociada a un millón de repeticiones de carga (10^6 ciclos) con la reducción de rigidez en un 50%. En la Tabla 5.6 se presentan los valores de ε_6 y N_{500}.

Tabla 5-6. Resumen Mezcla IV-A-12 sin RAP (PG 64-22)

ε_6 (mm/mm x 10^{-6})	79
N_{500}	882

5.2.2 Mezcla Asfáltica IV-A-12 con 8% de RAP con Asfalto Tradicional CA 24.

Al igual que con la mezcla asfáltica tradicional sin RAP, el estudio de la mezcla asfáltica con 8% de RAP y su caracterización se llevó a cabo según la norma AASHTO T321-14 [1].

A continuación en la Tabla 5.7 se presentan los resultados obtenidos por las probetas, correspondientes al nivel de deformación de 500 [µstrain].

Tabla 5-7. Resultados de Ensayo de Fatiga Mezcla IV-A-12 con 8% de RAP

PROBETA	% VACÍOS	µs [mm/mm]	N° CICLOS	Promedio
M2P6	4,09	500	431	623
M2P7	4,65		749	
M2P8	4,65		690	

Para esta mezcla solo se dispone de un punto, lo que hace imposible su caracterización mediante una curva.

5.2.3 Mezcla Asfáltica IV-A-12 con 18% de RAP con Asfalto Tradicional (PG 64-22) Memoria Nicolás Montalva [6].

Mezcla diseñada con asfalto tradicional con 4,25% de asfalto, 5% de vacíos y con un agregado de 18% de RAP. Esta mezcla fue controlada y ensayada en para cada nivel de deformación: 250, 350, 500 y 600 [µstrain]. En la Figura 5.3 se presenta la curva de fatiga de esta mezcla.

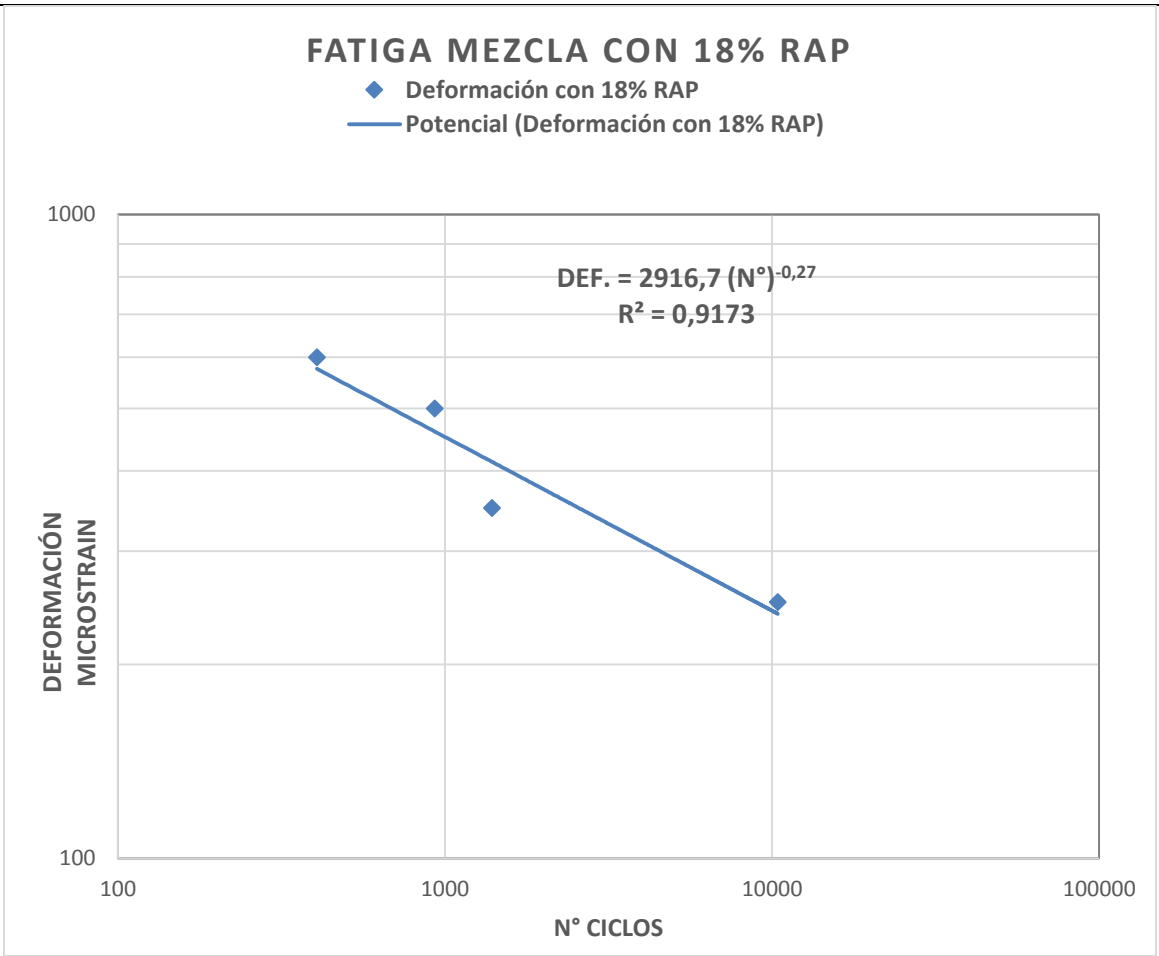

Figura 5.2. Curva de Fatiga Mezcla IV-A-12 con 18% de RAP

Fuente: Memoria Nicolás Montalva

Los valores de ε_6 y N_{500} son presentados a continuación en la Tabla 5.8.

Tabla 5-8. Resumen Mezcla IV-A-12 con agregado 18% de RAP

ε_6 (mm/mm x 10^{-6})	70
N_{500}	930

5.2.4 Mezcla Asfáltica IV-A-12 Asfalto Tradicional (PG 64-22) Proyecto FONDEF "Desarrollo de Materiales para Recapados Asfálticos Utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados" [3]

Mezcla diseñada con asfalto tradicional con 5,5% de asfalto y 4,5% de vacíos. Esta mezcla fue ensayada para cada nivel de deformación: 100, 300, 350, 400 y 500 [µstrain]. En la Figura 5.2 se presenta la curva de fatiga de esta mezcla.

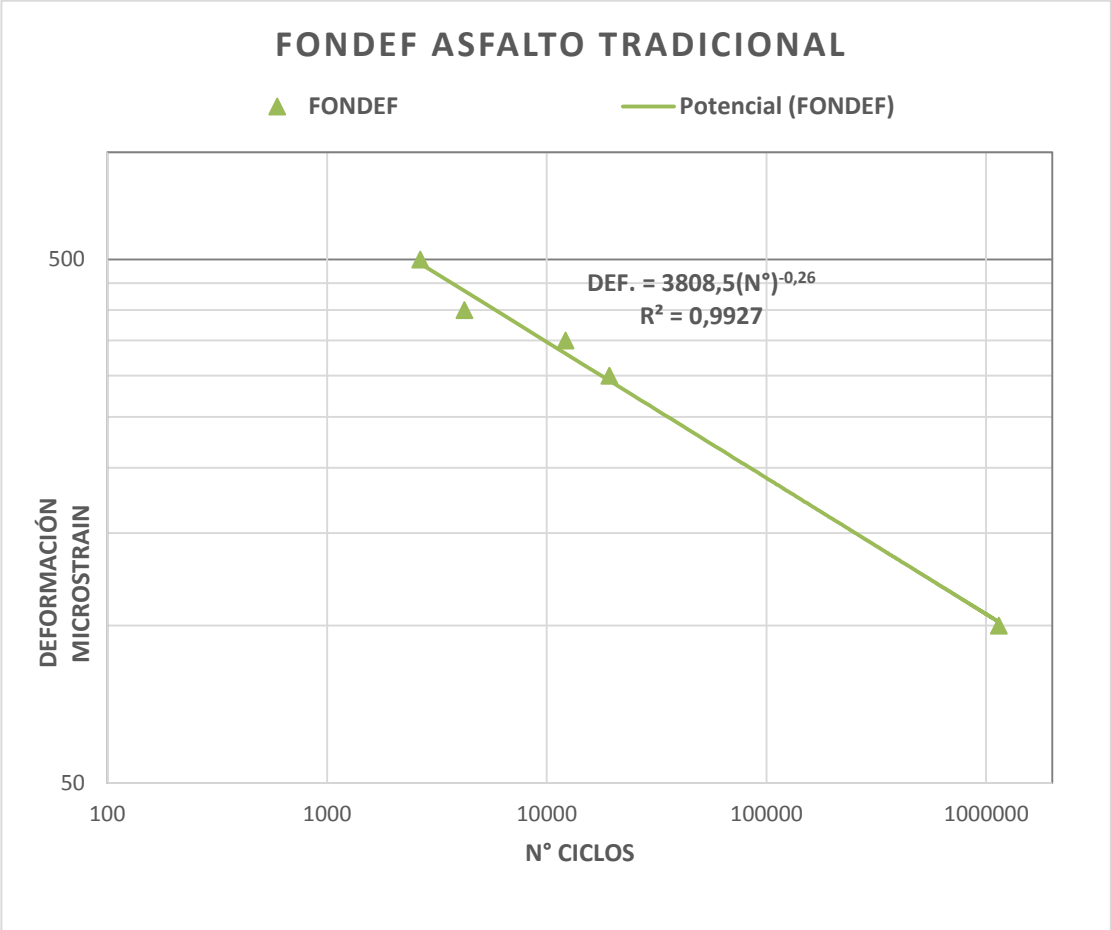

Figura 5.3. Curva de Fatiga Mezcla IV-A-12 (PG 64-22)

Fuente: Memoria Esteban Marín

Los valores de ε_6 y N_{500} son presentados a continuación en la Tabla 5.9.

Tabla 5-9. Resumen Mezcla IV-A-12 Asfalto Tradicional (PG 64-22) Proyecto FONDEF

ε_6 (mm/mm x 10^{-6})	104
N_{500}	2661

5.3 COMPARACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SEMEJANTES.

A continuación en la Figura 5.4 se presenta un gráfico conjunto de las curvas de fatiga que resultan ser de interés. Las mezclas ensayadas a fatiga completa son: Mezcla Asfáltica IV-A-12 sin RAP con Asfalto Tradicional (PG 64-22), Mezcla Asfáltica IV-A-12 con 18% RAP con Asfalto Tradicional (PG 64-22) y Mezcla Asfáltica IV-A-12 Asfalto Tradicional (PG 64-22) Proyecto FONDEF.

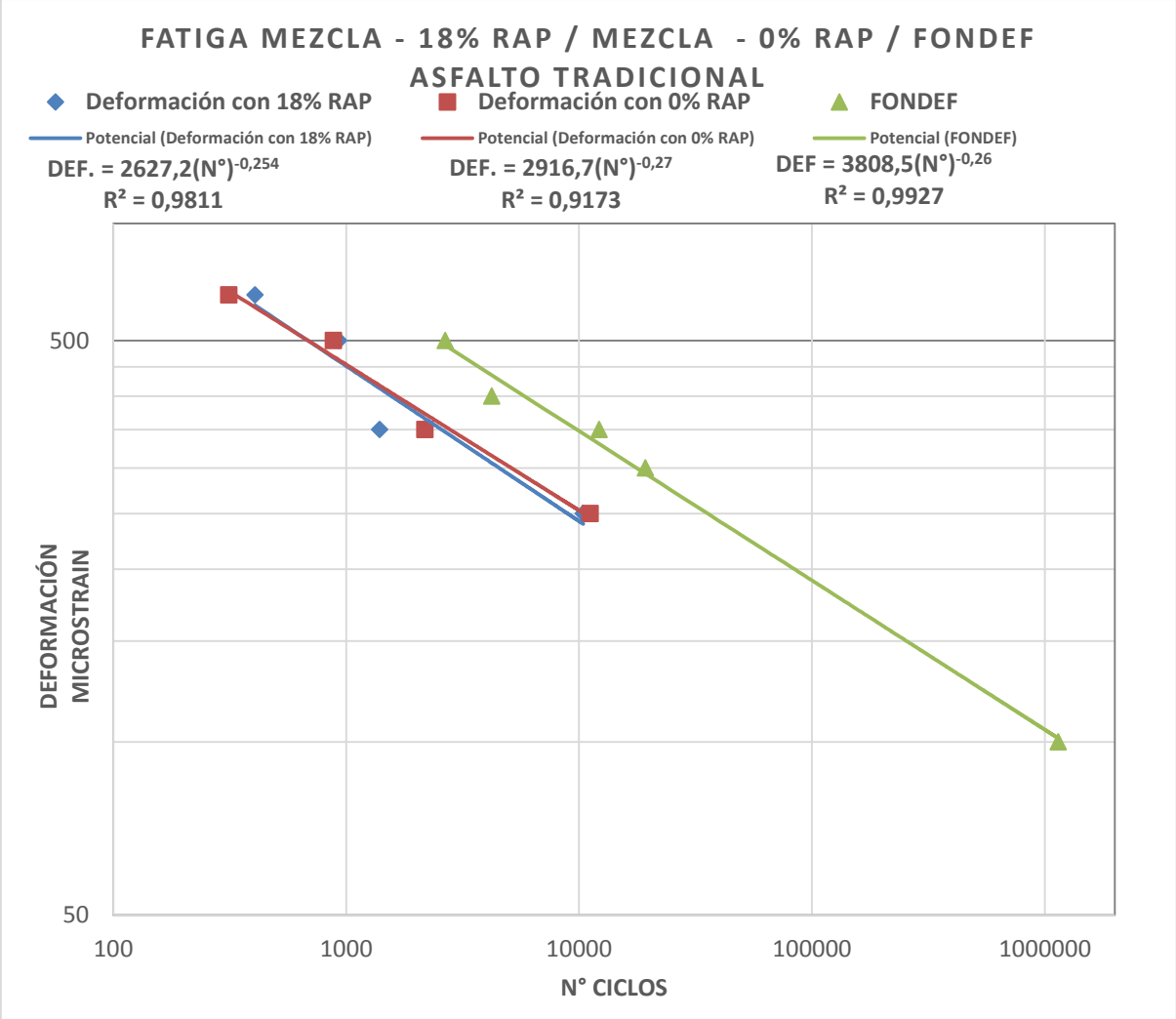

Figura 5.4. Curva de Fatiga Mezcla 0% de RAP, 18% de RAP y Proyecto FONDEF.

Fuente: Memoria Nicolás Montalva

A continuación en la Tabla 5.10 se presenta la comparación de resultados de los valores de ε_6 y N_{500} para cada una de las mezclas estudiadas.

Tabla 5-10. Comparación datos de mezcla y curvas de fatiga.

Mezcla	ε6 (mm/mm x 10-6)	N_{500}
Mezcla sin RAP	79	882
Mezcla con 8% de RAP	No Aplica	623
Mezcla con 18% de RAP	70	930
Mezcla IV-A-12 FONDEF	104	2661

6 CONCLUSIONES

Al iniciar este estudio se planteó como objetivo principal caracterizar el comportamiento de una mezcla asfáltica en caliente (MAC), con un 8% de agregado de RAP y su desempeño con respecto del deterioro por fatiga, mediante la obtención del parámetro N_{500}, y su comparación con los resultados obtenidos de los ensayos a fatiga de una MAC con 18% de agregado de RAP, estudiada en la memoria de Nicolás Montalva [6]. Estudio que se ha alcanzado de manera exitosa mediante los ensayos de laboratorio realizados en las dependencias del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras, LEMCO, perteneciente a la Universidad Técnica Federico Santa María.

Las curvas de las mezclas estudiadas fueron normalizadas con una serie potencial, y para el caso de la Mezcla Asfáltica sin RAP de control, ésta obtuvo un valor de correlación R^2 de 0,9811, siendo una representación adecuada y ajustada al comportamiento real, permitiendo su comparación con las curvas obtenidas en las MAC con 18% de agregado de RAP y con la curva de MAC con asfalto tradicional del proyecto FONDEF.

Los ensayos realizados a las mezclas asfálticas en caliente elaboradas para este estudio arrojaron resultados que no alcanzaron el millón de ciclos, esto en la mezcla asfáltica sin RAP de control, como en las con 8% y 18% de RAP, para ninguno de los niveles de deformación ensayados, dejando imposibilitada la opción de interpolar el parámetro ε_6 (épsilon 6).

Los valores de N_{500} obtenidos en las mezclas sin RAP, con 8% y 18% de RAP fueron 882, 623 y 930 ciclos respectivamente. Los valores alcanzados son de orden de magnitud similar, por lo tanto se puede suponer que los resultados de la mezcla con 8% de RAP para fatiga completa se encontrarán en las mismas condiciones que las otras mezclas estudiadas. Estos resultados, describen que no existe una correlación entre el contenido de RAP aportado y los valores de N_{500} resultantes, lo que difiere completamente de los resultados lógicos y esperados.

La falta de correlación puede ser atribuida a distintos factores, entre los cuales debemos considerar el error humano en los distintos procesos del estudio, ya sea en la elaboración de la mezcla, de las probetas, en los ensayos realizados a éstas o en cualquiera de las etapas de acondicionamiento, las cuales requieren de gran precisión en su ejecución. Los resultados obtenidos se encontraran siempre estrechamente condicionados por los tiempos y temperaturas empleados en la elaboración de las mezclas.

Se debe considerar que la norma AASHTO T321-14 [1] no establece un criterio de control respecto a la variabilidad en las muestras y sus resultados, lo que no nos permite determinar si es válido o debe ser excluido de las muestras. Esta inexistencia de un criterio de control pudo haber contribuido en la variabilidad observada en el ensayo de fatiga para el parámetro N_{500}.

7 Bibliografía

[1] AASHTO T 321, Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending, Washington D.C.: AASHTO, 2014.

[2] Ministerio de Obras Publicas, Manual de Carreteras, Chile: Dirección de Vialidad, MOP, 2015.

[3] E. Marín, Caracterización del Desempeño a Fatiga Mediante el Enfoque Fenomenológico y De Disipación de Energía de Mezclas Asfálticas Chilenas, Vaparaiso: UTFSM, 2013.

[4] SHRP A-404, *"Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes." Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. Strategic Highway Research Program, National Research Council.,* 1994.

[5] S. TANGELLA, SUMMARY REPORT ON FATIGUE RESPONDE OF ASPHALT MIXTURES, 1990.

[6] N. Montalva, ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON 18 % DE RAP MEDIANTE ENSAYO DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS, Valparaiso: UTFSM, 2016.

[7] AASHTO M320, STANDAR SPECIFICATION FOR PERFORMANCE-GRADED ASPHALT BINDER.

[8] ASTM D 1559, TEST METHOD FOR RESISTANCE OF PLASTIC FLOW OF BITUMINOUS MIXTURES USING MARSHALL APPARATUS., WASHINGTON D.C.: ASTM, 1998.

[9] AASHTO PP3, Standard Practice for Preparing Hot Mix Asphalt (HMA) specimens by Means of the Rolling Wheel Compactor, Washington D.C: AASHTO, 1996.

[10] AASHTO R30, STANDARD PRACTICE FOR MIXTURE CONDITIONING OF HOT MIX ASPHALT (HMA), WASHINGTON D.C: AASHTO, 2002.

[11] B. Pinilla, «Informe de resultados de compactación de mezclas asfálticas para ensayo de Fatiga SUPERPAVE,» UTFSM, Valparaiso, 2015.

[12] Mezclas Bituminosas, Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 24: Resistencia a la Fatiga UNE-EN 12697-24. Asociación española de normalización y certificación AENOR, España, 2007.

[13] SUPERPAVE, *Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis. Aspahlt Institute,* USA, 1994.

[14] IRI, *Indice de Rugosidad Internacional.*

[15] RECICLADO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE, «HTTPS://UPCOMMONS.UPC.EDU/BITSTREAM/HANDLE/2099.1/6270/06.PDF,» [En línea].

[16] C. Escobar, DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO SUPERPAVE, Valparaiso: UTFSM, 2015.

[17] E. Garcia, CONSTRUCCIÓN DE CURVAS MAESTRAS PARA ASFALTOS CHILENOS UTILIZANDO EL REÓMETRO DE VIGA EN FLEXIÓN (BBR) Y REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR), Valparaiso: UTFSM, 2013.

8 ANEXO

8.1 GRANULOMETRÍAS

La granulometría a utilizar fue proporcionada por la empresa ASFALCURA S.A. y se encuentra dentro de los parámetros de una banda granulométrica IV-A-12. Los áridos provienen de la misma fuente y son puestos a disposición por la empresa antes mencionada.

A continuación se presentan las características de la granulometría según la mezcla.

8.1.1 Mezcla Asfáltica en Caliente de Agregado ¾” sin RAP

8.1.1.1 Banda granulométrica Mezcla de Agregado 3/4" sin RAP

En la Tabla 8.1 se presentan los materiales utilizados para la MAC sin RAP:

Tabla 8-1. Materiales utilizados para obtener la mezcla de áridos para la MAC sin RAP.

Mezcla de Agregado 3/4" sin RAP								
Material	**Grav 3/4"**		**Grav 1/2"**		**P. Roca 3/8**		**Mezcla**	**Objetivo**
% Usado	**16%**		**22%**		**54%**			
Tamiz	**% Pasa**	**% Prop**	**% Pasa**	**% Prop**	**% Pasa**	**% Prop**		
1"	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100	100
3/4"	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100	100
1/2"	36%	12%	100%	0%	100%	0%	88	80-95
3/8"	1%	7%	77%	6%	100%	0%	76	70-85
4	1%	0%	5%	17%	90%	6%	53	43-58
8			1%	1%	60%	17%	34	28-42
30					30%	17%	17	13-24
50					22%	5%	13	8-17
100					16%	3%	9	6-12
200					11%	9%	6	4-8

8.1.1.2 Determinación teórica de masa a compactar para la MAC sin agregado de RAP:

En la tabla 8.2 se determina la masa a usar en la mezcla:

Tabla 8-2. Materiales utilizados para obtener la mezcla de áridos.

Densidad de la Mezcla sin Agregado de RAP	
Densidad máxima	2477 [gr/cc]
Porcentaje de vacíos	5%
Densidad obtenida	2353 [gr/cc]

8.1.1.3 Dosificación de áridos y betún asfaltico para MAC sin agregado de RAP:

En la tabla 8.3 y 8.46 se determina la masa a usar en la mezcla:

Tabla 8-3. Masa de áridos utilizados en MAC sin agregado de RAP.

Mezcla de Agregado 3/4" sin RAP				
Material	**Agregado 3/4"**	**Agregado 1/2"**	**Polvo Roca**	**Mezcla**
% Usado	**19%**	**24%**	**57%**	
Tamiz	**Masa [gr]**	**Masa [gr]**	**Masa [gr]**	**Masa [gr]**
1"	0	0	0	0
3/4"	0	0	0	0
1/2"	2207	0	0	2207
3/8"	1207	1002	0	2209
N°4	34	3137	1035	4206
N°8		218	3104	3322
N°30			3104	3104
N°50			828	828
N°100			621	621
N°200			1656	1656
∑ Total	3449	4357	10347	18153

Tabla 8-4. Materiales utilizados en MAC sin agregado de RAP.

Mezcla Asfáltica sin RAP	
Porcentaje de asfalto de diseño	5%
Peso de asfalto	907,6 [gr]
Peso del árido	18153 [gr]
Peso total MAC a utilizar	19060,5 [gr]

8.1.2 Mezcla Asfáltica en Caliente de Agregado ¾" con 8% de RAP

8.1.2.1 Banda granulométrica Mezcla de Agregado 3/4" y 8% de RAP

En la Tabla 8.5 se presentan los materiales utilizados para la MAC con 8% de RAP:

Tabla 8-5. Materiales utilizados para obtener la mezcla de áridos para la MAC con 8% de RAP.

Mezcla de Agregado 3/4" con 8% de RAP										
Material	**Grav 3/4"**		**Grav 1/2"**		**P. Roca 3/8**		**RAP GRUESO**		**Mezcla**	**Objetivo**
% Usado	**16%**		**22%**		**54%**		**8%**			
Tamiz	**% Pasa**	**% Prop**	**% Pasa**	**% Prop**	**% Pasa**	**% Prop**	**% Pasa**	**% Prop**		
1"	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100	100
3/4"	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100	100
1/2"	36%	10%	100%	0%	100%	0%	82%	1%	88	80-95
3/8"	1%	6%	77%	5%	100%	0%	65%	1%	76	70-85
4	1%	0%	5%	16%	90%	5%	23%	3%	52	43-58
8			1%	1%	60%	16%	13%	1%	34	28-42
30					30%	16%	3%	1%	16	13-24
50					22%	4%	2%	0%	12	8-17
100					16%	3%	2%	0%	9	6-12
200					11%	9%	2%	0%	6	4-8

8.1.2.2 Determinación teórica de masa a compactar para la MAC con 8% de agregado de RAP:

En la tabla 8.6 se determina la masa a usar en la mezcla:

Tabla 8-6. Materiales utilizados para obtener la mezcla de áridos.

Densidad de la Mezcla con 8% de Agregado de RAP	
Densidad máxima	2518,5 [gr/cc]
Porcentaje de vacíos	5%
Densidad obtenida	2393 [gr/cc]

8.1.2.3 Dosificación de áridos y betún asfáltico para MAC con 8% de agregado de RAP:

En la tabla 8.7 y 8.8 se determinan la masa a usar en la mezcla:

Tabla 8-7. Masa de áridos utilizados en MAC con 8% de agregado de RAP.

Mezcla de Agregado 3/4" con 8% de RAP					
Material	**Agregado 3/4"**	**Agregado 1/2"**	**Polvo Roca**	**RAP Grueso**	**Mezcla**
% Usado	**16%**	**22%**	**54%**	**8%**	
Tamiz	**Masa [gr]**	**Masa [gr]**	**Masa [gr]**	**Masa [gr]**	**Masa [gr]**
1"	0	0	0		0
3/4"	0	0	0	0	0
1/2"	1895	0	0	266	2161
3/8"	1036	936	0	252	2224
N°4	30	2931	999	622	4581
N°8		204	2997	148	3349
N°30			2997	148	3145
N°50			799	15	814
N°100			599	0	599
N°200			1599	30	1628
∑ Total	2960	4070	9991	1480	18502

Tabla 8-8. Materiales utilizados en MAC con 8% de agregado de RAP.

Mezcla Asfáltica con 8% de RAP	
Porcentaje de asfalto de diseño	4,75%
Peso de asfalto	878,9 [gr]
Peso del árido	18502 [gr]
Peso total MAC a utilizar	19380,6 [gr]

8.2 CEMENTO ASFÁLTICO

8.2.1 Cemento asfáltico CA 24:

Tipo y características.

En las Tabla 8.9 y 8.10 se presentan las características y propiedades del betún asfáltico.

Tabla 8-9. Propiedades Betún

Procedencia	Acopio Planta ASFALCURA S.A.
Cemento Asfáltico (Grado)	PG 64-22
Temperatura Optima de Mezclado [ºC]	155 ± 5
Temperatura Optima de Compactación [ºC]	145 ± 10

Tabla 8-10. Propiedades Betún Tradicional

Ligante Original		
Ensayo Propiedad	**Resultados del Ensayo**	**Criterio**
Punto de Inflamación	317 [°C]	230 [°C] mín.
Viscosidad rotacional 135°C	0,493 [Pa·s]	3 [Pa·s] máx.
Reómetro dinámico de corte G*/Send@64°C	1,71 [kPa]	1,00 [kPa] mín.
RFTO- Ligante Envejecido		
Ensayo Propiedad	**Resultados del Ensayo**	**Criterio**
Pérdida de masa	0,01%	1,00% máx.
Reómetro Dinámico de Corte G*/Send@64°C	3,58 [kPa]	2,20 [kPa] mín.
PAV - Envejecimiento del ligante		
Ensayo Propiedad	**Resultados del Ensayo**	**Criterio**
Reómetro Dinámico de Corte G*Send@25°C	4940 [kPa]	5000 [kPa] máx.
Reómetro de Flexión Stiffness@-12°C	142,03 [MPa]	300 [MPa] máx.
Reómetro de Flexión Valor m @-12°C	0,368	0,300 mín.

8.3 ENSAYOS DE FATIGA A FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS.

8.3.1 Propiedades de Vigas Ensayadas a Fatiga a Flexión en Cuatro Puntos.

8.3.1.1 Propiedades Vigas Fabricadas con MAC con 8% de agregado de RAP ensayadas a una deformación de 500 [µstrain].

Tabla 8-11. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC con 8% de agregado de RAP ensayadas a una deformación de 500 [µstrain].

Tipo de Asfalto	CA24
Contenido de Asfalto	4,75%
Contenido de RAP	8%
Graduación del Agregado	IV-A-12
Vacios de Aire	5%

Dimensiones de las Probetas	**Nombre**	**Deformación [me]**	**Dimensiones**		
			Largo [mt]	**Ancho [mt]**	**Alto [mt]**
	M2P6	500	0,385	0,066	0,052
	M2P7	500	0,399	0,066	0,054
	M2P8	500	0,400	0,062	0,051

Temperatura de Ensayo	**Deformacion [me]**	500		
	Probeta	M2P6	M2P7	M2P8
	Temp. [C|]	20	20	20
		20		

Frecuencia	10 Hz

8.3.1.2 Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una deformación de 500 [µstrain].

Tabla 8-12. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una a una deformación de 500 [µstrain].

Tipo de Asfalto	CA24
Contenido de Asfalto	5%
Contenido de RAP	0%
Graduación del Agregado	IV-A-12
Vacios de Aire	5%

Dimensiones de las Probetas	**Nombre**	**Deformación [me]**	**Dimensiones**		
			Largo [mt]	**Ancho [mt]**	**Alto [mt]**
	M1P2	500	0,385	0,065	0,053
	M1V7P2	500	0,399	0,062	0,053
	M1P4	500	0,384	0,068	0,054

Temperatura de Ensayo	**Deformacion [me]**	500		
	Probeta	M1P2	M1V7P2	M1P4
	Temp. [C|]	20	20	20
		20		

Frecuencia	10 Hz

8.3.1.3 Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una deformación de 250 [µstrain].

Tabla 8-13. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una a una deformación de 250 [µstrain].

Tipo de Asfalto	CA24
Contenido de Asfalto	5%
Contenido de RAP	0%
Graduación del Agregado	IV-A-12
Vacios de Aire	5%

Dimensiones de las Probetas	**Nombre**	**Deformación [me]**	**Dimensiones**		
			Largo [mt]	**Ancho [mt]**	**Alto [mt]**
	M1V3P1	250	0,400	0,064	0,053
	M1V3P2	250	0,399	0,064	0,054
	M1V4P1	250	0,397	0,064	0,055

Temperatura de Ensayo	**Deformacion [me]**	250		
	Probeta	M1V3P1	M1V3P2	M1V4P1
	Temp. [C|]	20	20	20
		20		

Frecuencia	10 Hz

8.3.1.4 Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una deformación de 350 [µstrain].

Tabla 8-14. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una a una deformación de 350 [µstrain].

Tipo de Asfalto	CA24
Contenido de Asfalto	5%
Contenido de RAP	0%
Graduación del Agregado	IV-A-12
Vacios de Aire	5%

Dimensiones de las Probetas	**Nombre**	**Deformación [me]**	**Dimensiones**		
			Largo [mt]	**Ancho [mt]**	**Alto [mt]**
	M1V4P2	350	0,389	0,064	0,053
	M1V5P1	350	0,400	0,065	0,053
	M1V5P2	350	0,399	0,064	0,054

Temperatura de Ensayo	**Deformacion [me]**	350		
	Probeta	M1V4P2	M1V5P1	M1V5P2
	Temp. [C|]	20	20	20
		20		

Frecuencia	10 Hz

8.3.1.5 Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una deformación de 600 [µstrain].

Tabla 8-15. Propiedades Vigas Fabricadas con MAC sin agregado de RAP ensayadas a una a una deformación de 600 [µstrain].

Tipo de Asfalto	CA24
Contenido de Asfalto	5%
Contenido de RAP	0%
Graduación del Agregado	IV-A-12
Vacios de Aire	5%

Dimensiones de las Probetas	**Nombre**	**Deformación [me]**	**Dimensiones**		
			Largo [mt]	**Ancho [mt]**	**Alto [mt]**
	M1V6P1	600	0,400	0,064	0,054
	M1V6P2	600	0,400	0,063	0,053
	M1V7P1	600	0,404	0,064	0,054

Temperatura de Ensayo	**Deformacion [me]**	600		
	Probeta	M1V6P1	M1V6P2	M1V7P1
	Temp. [C|]	20	20	20
		20		

Frecuencia	10 Hz

8.3.2 RESULTADOS ENSAYOS DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS.

8.3.2.1 Ensayos a MAC con 8% de agregado de RAP a 500 [µstrain]

Tabla 8-16. MAC 8% RAP a 500 [µstrain].

Resultados a	500 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
500	M2P6	50	2583,93	0,0002530	5147177	0,0004888	10530620000	14,56	1,99	46,24
		100	2478,03	0,0002735	4936226	0,0005284	9341298000	16,36	2,31	156,83
		200	2138,94	0,0002719	4260759	0,0005254	8109825000	17,73	2,14	381,35
		300	1858,80	0,0002703	3702724	0,0005222	7090159000	18,80	1,96	586,78
		400	1552,30	0,0002739	3092172	0,0005292	5843394000	20,23	1,78	772,64
		431	1403,19	0,0002794	2795144	0,0005398	5178222000	20,92	1,69	826,37
	M2P7	50	1280,01	0,0002552	2364399	0,0005120	4618108000	31,81	2,00	81,92
		101	1139,68	0,0002546	2105196	0,0005108	4121001000	32,92	1,84	181,90
		250	930,85	0,0002530	1719446	0,0005077	3386766000	34,55	1,56	435,75
		500	740,77	0,0002507	1368328	0,0005029	2720790000	36,20	1,28	789,48
		700	643,16	0,0002502	1188033	0,0005021	2366348000	37,07	1,13	1028,93
		749	625,66	0,0002515	1155697	0,0005045	2290681000	37,38	1,11	1083,63
	M2P8	50	802,15	0,0002605	1768333,00	0,0004937	3581743000	33,46	1,51	68,27
		100	722,65	0,0002683	1593068,00	0,0005084	3133279000	34,79	1,45	144,36
		200	615,59	0,0002676	1357060,00	0,0005071	2676032000	35,71	1,26	279,15
		300	548,08	0,0002654	1208228,00	0,0005030	2402242000	36,44	1,13	398,74
		400	502,88	0,0002657	1108597,00	0,0005034	2202068000	36,93	1,05	508,47
		500	464,06	0,0002655	1023004,00	0,0005031	2033490000	37,35	0,98	610,28
		600	432,20	0,0002644	952786,40	0,0005010	1901634000	37,92	0,92	705,42
		690	407,08	0,0002651	897394,10	0,0005023	1786402000	38,24	0,88	786,55

8.3.2.2 Ensayos a MAC sin agregado de RAP a 500 [µstrain]

Tabla 8-17. MAC sin agregado de RAP a 500 [µstrain].

Resultados a	500 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	**Nombre Probeta**	**Ciclo de Carga**	**Carga Aplicada [N]**	**Deflexión de la Viga**	**Tensión a tracción [Pa]**	**Deformación por Tracción [m/m]**	**Rigidez a Flexión [Pa]**	**Angulo de Fase [°]**	**Energía Disipada [J/m3]**	**Energía Disipada Acum. [J/m3]**
500	M1P2	50	1021,42	0,0002520	1739672,00	0,0005150	3377941000	25,64	1,22	52,98
		100	885,12	0,0002518	1507540,00	0,0005145	2930162000	26,28	1,08	111,28
		200	745,91	0,0002486	1270427,00	0,0005081	2500252000	26,96	0,92	210,86
		300	667,20	0,0002477	1136371,00	0,0005062	2244733000	27,29	0,83	298,15
		400	608,41	0,0002476	1036247,00	0,0005059	2048247000	27,48	0,76	377,59
		500	563,66	0,0002471	960030,40	0,0005049	1901374000	27,78	0,71	451,00
		600	524,26	0,0002462	892922,90	0,0005031	1774668000	27,96	0,66	519,54
		680	495,68	0,0002460	844249,20	0,0005028	1679143000	28,14	0,63	571,43
	M1V7P2	50	1149,14	0,0002647	2345688,00	0,0005213	4499418000	31,07	1,98	79,94
		100	982,71	0,0002615	2005966,00	0,0005150	3894797000	32,37	1,74	173,69
		200	827,79	0,0002590	1689726,00	0,0005100	3313328000	33,13	1,48	333,52
		500	625,38	0,0002545	1276556,00	0,0005012	2547252000	34,28	1,13	716,67
		700	558,67	0,0002555	1140393,00	0,0005032	2266227000	34,68	1,03	932,20
		718	553,62	0,0002555	1130087,00	0,0005031	2246201000	34,63	1,01	950,54
	M1P4	50	1394,79	0,0002613	2500643,00	0,0005242	4770097000	24,35	1,70	61,17
		100	1244,77	0,0002564	2231675,00	0,0005144	4338343000	25,40	1,55	143,17
		200	1105,14	0,0002545	1981342,00	0,0005106	3880472000	26,46	1,42	291,72
		500	902,53	0,0002507	1618105,00	0,0005031	3216307000	27,50	1,18	676,68
		800	788,10	0,0002500	1412945,00	0,0005016	2817096000	28,62	1,07	1014,10
		1200	677,67	0,0002503	1214954,00	0,0005022	2419175000	29,43	0,94	1416,25
		1235	663,65	0,0002492	1189824,00	0,0005001	2379352000	29,52	0,92	1449,12

8.3.2.3 Ensayos a MAC sin agregado de RAP a 250 [µstrain]

Tabla 8-18. MAC sin agregado de RAP a 250 [µstrain].

Resultados a	250 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
250	M1V3P1	50	701,19	0,0001311	1408593,00	0,00025810	5457553000	28,0997	0,54	14,43
		250	625,86	0,0001281	1257255,00	0,00025226	4983895000	30,6162	0,51	118,48
		500	584,76	0,0001278	1174702,00	0,00025171	4666977000	31,3594	0,48	241,92
		1000	547,64	0,0001270	1100128,00	0,00025006	4399511000	32,7963	0,47	476,63
		4000	445,12	0,0001266	894177,00	0,00024935	3586034000	34,5311	0,40	1765,50
		8500	362,35	0,0001272	727900,00	0,00025047	2906099000	35,0796	0,33	3386,60
		9816	340,03	0,0001275	683077,40	0,00025101	2721361000	35,2264	0,31	3807,12
	M1V3P2	50	695,52	0,0001304	1324891,00	0,00026159	5064750000	29,27	0,53	13,81
		250	606,38	0,0001250	1155097,00	0,00025084	4604997000	30,97	0,47	112,06
		1000	554,32	0,0001245	1055931,00	0,00024971	4228684000	32,54	0,45	456,08
		2500	498,39	0,0001251	949389,60	0,00025097	3782901000	33,12	0,41	1087,23
		5000	464,32	0,0001246	884489,90	0,00024990	3539312000	33,73	0,39	2082,27
		10000	404,48	0,0001243	770501,10	0,00024937	3089783000	35,24	0,35	3919,11
		11690	337,68	0,0001277	643252,50	0,00025615	2511259000	35,27	0,30	4477,47
	M1V4P1	50	670,10	0,0001227	1230469,00	0,00025075	4907116000	27,211	0,44	12,01
		250	605,71	0,0001228	1112236,00	0,00025101	4431029000	29,270	0,43	99,83
		1000	532,07	0,0001232	977020,10	0,00025173	3881288000	30,672	0,39	406,04
		2500	476,52	0,0001230	875013,80	0,00025133	3481523000	31,757	0,36	964,38
		5000	429,13	0,0001224	787992,60	0,00025016	3149974000	32,227	0,33	1826,18
		10000	364,55	0,0001223	669408,20	0,00024984	2679322000	32,915	0,29	3362,71
		11989	335,12	0,0001228	615363,90	0,00025092	2452425000	32,485	0,26	3903,05

8.3.2.4 Ensayos a MAC sin agregado de RAP a 350 [µstrain]

Tabla 8-19. MAC sin agregado de RAP a 350 [µstrain].

Resultados a	350 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	**Nombre Probeta**	**Ciclo de Carga**	**Carga Aplicada [N]**	**Deflexión de la Viga**	**Tensión a tracción [Pa]**	**Deformación por Tracción [m/m]**	**Rigidez a Flexión [Pa]**	**Angulo de Fase [°]**	**Energía Disipada [J/m3]**	**Energía Disipada Acum. [J/m3]**
350	M1V4P2	50	954,46	0,0001955	1887401,00	0,0003850	4901905000	30,061	1,14	28,64
		250	753,36	0,0001799	1489749,00	0,0003542	4206226000	32,379	0,89	218,62
		500	689,67	0,0001794	1363786,00	0,0003532	3860974000	33,413	0,83	431,78
		1000	617,77	0,0001791	1221622,00	0,0003527	3464053000	33,875	0,75	825,53
		2000	543,63	0,0001789	1075003,00	0,0003522	3051858000	35,024	0,68	1538,59
		3000	469,94	0,0001787	929278,10	0,0003518	2641492000	35,800	0,60	2182,43
		3345	437,23	0,0001795	864613,00	0,0003535	2445750000	35,386	0,56	2380,04
	M1V5P1	50	1135,34	0,0001833	2210552	0,0003610	6123041000	27,80	1,17	28,01
		100	1060,04	0,0001868	2063939	0,0003679	5610071000	29,16	1,16	85,03
		250	923,82	0,0001805	1798707	0,0003554	5060546000	30,68	1,02	245,31
		500	819,42	0,0001797	1595437	0,0003540	4507322000	32,16	0,94	490,19
		1000	596,20	0,0001802	1160823	0,0003548	3271913000	34,66	0,74	913,44
		1073	557,08	0,0001813	1084663	0,0003569	3038932000	34,56	0,69	965,58
	M1V5P2	50	1166,22	0,000176	2221532,00	0,0003522	6308396000	27,61	1,14	27,12
		250	993,33	0,000177	1892191,00	0,0003555	5322259000	31,06	1,09	251,37
		500	905,41	0,000176	1724714,00	0,0003531	4884887000	32,08	1,02	512,78
		1000	805,21	0,000175	1533852,00	0,0003516	4362937000	33,22	0,93	997,51
		2000	604,90	0,000175	1152282,00	0,0003512	3280567000	33,98	0,71	1831,33
		2126	582,92	0,000176	1110398,00	0,0003524	3150671000	34,00	0,69	1919,65

8.3.2.5 Ensayos a MAC sin agregado de RAP a 600 [µstrain]

Tabla 8-20. MAC sin agregado de RAP a 600 [µstrain].

Resultados a	600 Microstrain

Nivel de Deformación [Me]	Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
600	M1V6P1	50	1248,97	0,0003124	2379158	0,0006267	3796097000	33,91	2,613	105,170
		100	1070,89	0,0003077	2039928	0,0006174	3304253000	35,16	2,278	229,426
		150	971,43	0,0003095	1850471	0,0006210	2979646000	35,72	2,108	338,800
		200	867,28	0,0003059	1652089	0,0006137	2692069000	36,05	1,875	438,484
		250	790,07	0,0003069	1505008	0,0006158	2443809000	36,32	1,725	528,396
		350	623,96	0,0003059	1188584	0,0006137	1936833000	36,28	1,356	682,105
		363	606,75	0,0003055	1155805	0,0006129	1885727000	36,26	1,316	699,426
	M1V6P2	50	1578	0,0003228	3169894	0,0006356	4986892000	32,71	3,420	124,330
		100	1317	0,0003172	2645012	0,0006246	4234996000	34,38	2,931	284,249
		200	1063	0,0003118	2134642	0,0006140	3476431000	35,72	2,404	550,873
		300	904	0,0003108	1816240	0,0006121	2967415000	36,72	2,088	775,021
		394	755	0,0003112	1516588	0,0006128	2474875000	38,03	1,799	958,197
	M1V7P1	50	1278,45	0,0003149	2435323	0,0006317	3854948000	32,37	2,588	113,399
		100	991,35	0,0003109	1888429	0,0006238	3027092000	34,16	2,078	232,004
		150	780,82	0,0003158	1487388	0,0006337	2347323000	36,01	1,741	327,792
		183	622,15	0,0003121	1185125	0,0006263	1892370000	37,28	1,412	379,549