

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA.

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES.

COMPARACIÓN DE ENSAYOS DE DESEMPEÑO EN MEZCLAS SMA

PARTE 1: FATIGA

Memoria de titulación presentada por:

JOSE LUIS MATIAS MALDONADO RODRIGUEZ.

Como requisito para optar al título de:

CONSTRUCTOR CIVIL.

Profesor guía:

CARLOS WARH DANIEL.

NOVIEMBRE 2019

AGRADECIMIENTOS.

No existen palabras para describir lo agradecido que estoy con mi familia, ellos han sido todo para mí, son mi fuente de inspiración, lucha y perseverancia. Todo lo que he logrado en mi vida ha sido gracias a ellos, ya que si no los tuviera no sé dónde estaría.

Esta memoria va dedicada completamente a mis padres: Hernán y Alejandra y mi hermana Rebeca. Gracias por aguantarme, guiarme, quererme y confortarme en todo momento.

También debo agradecer especialmente a las grandes personas que he conocido en la universidad ya sean compañeros, conocidos, pensionistas a los cuales puedo decir sinceramente que son mis amigos y que hemos estado en las buenas y en las malas juntos, lo cual nunca olvidaré y siempre tendré presente, me encantaría dar nombres, pero son muchas personas, ellos saben quiénes son.

Además debo agradecer a la Sra. María Angélica Campos Vargas, la cual me acogió en su pensión y estoy profundamente agradecido por todo lo que me ha brindado estos años y puedo decir con certeza que la considero como mi segunda madre.

Quisiera agradecer a la universidad, profesores y especialmente a toda la gente del laboratorio LEMCO, por ayudarme y brindarme su amistad, siempre recordaré con mucho cariño mi estadía en el laboratorio.

Por ultimo quisiera agradecer a mi profesor guía Carlos Wahr por guiarme, enseñarme y darme la oportunidad de poder realizar esta memoria con él, siempre le estaré agradecido.

COMPARACIÓN DE ENSAYOS DE DESEMPEÑO EN MEZCLAS SMA PARTE 1: FATIGA

Resumen ejecutivo.

La presente memoria consiste en la elaboración de una mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA), la cual es diseñada por la empresa Bitumix y verificada por el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras (LEMCO). A esta se le aplica el ensayo de fatiga, que se basa en la norma AASHTO T321-17. La realización de este ensayo tiene como objetivo caracterizar el comportamiento a fatiga de la mezcla SMA envejecida a corto plazo, proceso fundamental para garantizar su desempeño. Este parámetro da a conocer el comportamiento de la mezcla frente al agrietamiento.

El propósito de esta investigación es presentar los resultados obtenidos del ensayo de viga a flexión con carga en cuatro puntos, aplicando cuatro niveles de deformación controlada (250, 400, 500 y 750 $\mu\epsilon$) con ondas de carga sinusoidal, bajo una frecuencia y temperatura de 10 [Hz] y 20 [°C]. El criterio de falla corresponde a los ciclos requeridos para alcanzar una disminución de un 50% de su rigidez inicial.

A partir de los datos obtenidos se caracterizan las curvas de fatiga bajo un enfoque fenomenológico, de donde se extrae el nivel de deformación necesaria para que la mezcla falle al momento de llegar al millón de ciclos (ϵ_6) y la cantidad de ciclos alcanzados hasta la falla para una deformación de 500 $\mu\epsilon$ (N_{500}), parámetros básicos con los cuales se verifica el desempeño de la mezcla.

En base a los resultados del ensayo de fatiga, estos se deben comparar con los datos obtenidos de los proyectos “Conservación rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez, 2016, Etapa I” y FONDEF D09I1174 “Desarrollo de materiales para recapados asfálticos utilizados en la rehabilitación de pavimentos deteriorados”.

Al ser analizados los datos obtenidos, se verifica la existencia de datos anómalos en dos probetas, las cuales se presentan debido a la alta variabilidad en los procesos de mezcla y compactación. Las anomalías se expresan en altas cantidades de ciclos de carga, los cuales alteran los promedios de las cantidades de ciclos de cargas afectando su orden correspondiente. Al ser los promedios de los niveles de deformación alterados e invertidos, estos no pueden ser presentados como resultados de una correspondiente curva de fatiga. En base a esto el ensayo de fatiga de la presente memoria no es viable y no puede formar parte de una base de datos.

COMPARISON OF PERFORMANCE TESTS IN SMA MIXES PART 1: FATIGUE.

Abstract.

The present Thesis consists of the elaboration of a Stone Mastic Asphalt (SMA) mixture, which is designed and tested by the Materials Testing and Works Control Laboratory (LEMCO). The fatigue test is applied to this, which is based on the AASHTO T321-17 standard. The objective of this test is to characterize the fatigue behavior of the aged SMA mixture in the short term, a fundamental process to guarantee its performance. This parameter discloses the behavior of the mixture against cracking.

The purpose of this investigation is to present the results of the flexural beam test with four-point load, applying four levels of controlled deformation (250, 400, 500 and 750 [$\mu\epsilon$]) with sinusoidal load waves, under a frequency and temperature of 10 [Hz] and 20 [$^{\circ}\text{C}$]. The failure criterion corresponds to the cycles required to achieve a 50% decrease in its initial stiffness.

From the data obtained, fatigue curves are characterized under a phenomenological approach, from which the level of deformation necessary for the mixture to fail at the moment of reaching one million cycles (ϵ_6) and the number of cycles reached up to failure for a deformation of 500 [$\mu\epsilon$] (N_{500}), basic parameters with which the performance of the mixture is verified.

Finally, based on the results obtained from the fatigue test, these should be compared with the data obtained from the projects "Routine Conservation Arturo Merino Benitez Airport, 2016, Stage I" and FONDEF D09I1174 "Development of materials for asphalt pickling used in the rehabilitation of deteriorated pavements".

When the data obtained is analyzed, the existence of anomalous data in three specimens is verified, which are presented due to the high variability in the mixing and compaction processes. The anomalies are expressed in high amounts of load cycles, which alter the averages of the amounts of load cycles affecting their corresponding order. Since the averages of the deformation levels are altered and inverted, these cannot be presented as results of a corresponding fatigue curve. Based on this, the fatigue test of the present memory is not feasible and cannot be part of a database.

GLOSARIO

ε_6	:Épsilon 6
σ_t	:Esfuerzo de tracción
ε_t	:Deformación por tracción
N_{500}	:N° de ciclos hasta la falla de una deformación de 500 [$\mu\varepsilon$]
N_f	:N° de ciclos de carga hasta la falla
f_0	:Frecuencia inicial
$\mu\varepsilon$	:Unidad de deformación, Microstrain
SUPERPAVE	:Superior Performance Pavements
FHWA	:Federal Highway Administration
AASHTO	:American association of state highway and transportation officials
ASTM	:American society for testing and materials
SHRP	:Strategic Highway Research Program
LEMCO	:Laboratorio de ensaye de materiales y control de obras
CEN	:European Committee for standardization
UTFSM	:Universidad Técnica Federico Santa María
CDI	:Centro de desarrollo e investigación
ZTV Asphalt Stb '01	:Norma Alemana
UNE	:Una Norma Española
MC	:Manual de Carreteras
FONDEF	:Fondo de fomento al desarrollo científico tecnológico
PG	:Grado de desempeño
MAC	:Mezcla asfáltica en caliente
PG	:Performance Grade
SMA	:Stone Mastic Asphalt
LVDT	:Linear Variable Differential Transformer
Viatop	:Pellet de fibra
°C	:Grados Celsius (Unidad de temperatura)

KN	:Kilo Newton (Unidad de fuerza)
Bar	:Unidad de presión
Pa	:Pascal (Kg/m ²) (Unidad de presión)
MPa	:Mega Pascal (1x10 ⁶ Pa) (Unidad de presión)
Psi	:Pounds – force per square inch (Unidad de presión)
J	:Joule (Unidad de energía, trabajo y calor)
m ³	:Metro cúbico (Unidad de volumen)
m ²	:Metro cuadrado (Unidad de área)
cm	:Centímetro (Unidad de longitud)
mm	:Milímetro (Unidad de longitud)
In (")	:Pulgada (Unidad de longitud)
k ₁ - k ₂	:Parámetros curva de fatiga
Kg	:Kilogramo (Unidad de masa)
gr	:Gramo (Unidad de masa)
Hz	:Hertz (Unidad de frecuencia)
Va	:Vacíos de aire
VAM	:Vacíos en el agregado mineral
VFA	:Vacíos llenos de asfalto
G _b	:Gravedad específica del asfalto
G _{mb}	:Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada
G _{mm}	:Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica
G _{sa}	:Gravedad específica aparente
G _{sb}	:Gravedad específica neta
G _{se}	:Gravedad específica efectiva

INDICE

1. INTRODUCCION.	1
1.1. ANTECEDENTES GENERALES.	1
1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.	2
1.2.1. Objetivos Generales.	2
1.2.2. Objetivos específicos.	2
1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO.	2
1.4. METODOLOGIA DE TRABAJO.	3
1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.	4
2. MARCO TEÓRICO.	5
2.1. GENERALIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.	5
2.1.1. Mezcla asfáltica en caliente (MAC).	5
2.1.2. Diseño de mezcla asfáltica en caliente (MAC).	6
2.1.2.1. Método Marshall.	6
2.1.2.2. Método SUPERPAVE.	6
2.1.3. Deterioros producidos en mezclas asfálticas.	6
2.1.3.1. Agrietamiento térmico.	7
2.1.3.2. Ahuellamiento.	8
2.1.3.3. Agrietamiento por Fatiga.	9
2.2. MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE EN CUESTIÓN STONE MASTIC ASPHALT (SMA).	13
2.2.1. Antecedentes del STONE MASTIC ASPHALT (SMA).	13
2.2.2. Estructura del STONE MASTIC ASPHALT (SMA).	14
2.2.2.1. Agregados.	15
2.2.2.2. Ligante Asfáltico.	15
2.2.2.3. Filler.	16
2.2.2.4. Fibras de Celulosa.	16
2.2.3. Características que presenta la mezcla SMA.	17
2.2.3.1. Bajos niveles de mantenimiento.	18
2.2.3.2. Resistencia al deslizamiento.	18
2.2.3.3. Disminuciones de los niveles de ruido.	18
2.2.3.4. Adherencia entre el ligante y los agregados.	18
2.2.3.5. Disminución de la proyección de agua (SPRAY).	18
2.2.3.6. Resistencia al desgaste.	18
2.2.3.7. Aumento de flexibilidad a temperaturas bajas.	19
2.2.3.8. Resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento).	19
2.2.3.9. Lento envejecimiento (estabilidad a elevadas temperaturas).	19
2.2.4. Usos de la mezcla SMA.	19
3. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA.	21
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES; ÁRIDOS.	21
3.1.1. Áridos Gruesos.	21
3.1.2. Áridos Finos.	23
3.1.4. Filler.	25
3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES; LIGANTE ASFÁLTICO.	26
3.2.1. Cemento Asfáltico.	26
3.2.2. Emulsión asfáltica para riego de liga.	27
3.3. FIBRAS DE CELULOSA.	27

3.4 COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA MEZCLA SMA.....	28
3.4.1 Granulometría.....	28
3.4.2. Tolerancias Granulométricas.....	28
3.4.3. Banda Granulométrica de la mezcla SMA.....	29
3.3. CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN.....	30
4. ENSAYO DE FATIGA.....	34
4.1. ENSAYO DE VIGA A FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS.....	34
4.2. TIPOS DE FALLO.....	34
4.2.1. Deformación o desplazamiento controlado.....	344
4.2.2. Tensión controlada.....	355
4.3. EQUIPOS DE ENSAYOS.....	35
4.3.1. Equipo de Viga en Flexión en Cuatro Puntos.....	35
4.3.1.1. Sistema de Prueba (Test System).....	36
4.3.1.2. Dispositivo de carga.....	36
4.3.1.3. Cámara Ambiental.....	37
4.3.1.4. Sistema de control y recepción de datos.....	388
4.3.1.5. Compactador de rodillo.....	388
4.4. CONFECCIÓN DE PROBETAS ASFÁLTICAS CON LA MEZCLA SMA.....	38
4.4.1. Muestras mezcladas y compactadas en laboratorio.....	38
4.4.2. Dimensiones.....	39
4.4.3. Procedimiento de confección de probetas.....	39
4.4.3.1. Cálculo de la dosificación del material.....	39
4.4.4. Confección de probetas.....	41
4.4.4.1. Procedimiento previo.....	41
4.4.4.2. Procedimiento de confección de probetas.....	42
4.4.5. Corte de probetas.....	45
4.4.6. Determinación de densidad de la mezcla compactada.....	46
4.4.6.1. Determinación de vacíos en la mezcla.....	47
4.5. CONDICIONES DE ENSAYO.....	49
4.5. ENFOQUE DEL COMPORTAMIENTO DE FATIGA EN UNA MEZCLA.....	51
5. RESULTADOS.....	53
5.1. RESULTADOS OBTENIDOS.....	53
5.2. RESULTADOS VANESSA LOBOS Y ANDRÉS VÁZQUEZ.....	57
5.2.1. Vanessa lobos.....	57
5.2.1.1. Autopista del Maipo.....	57
5.2.1.2. Autopista Central.....	58
5.2.2. Andrés Vázquez.....	59
5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	61
6. CONCLUSIÓN.....	70
BIBLIOGRAFIA.....	73
ANEXOS.....	74
A. DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO A FATIGA.....	74
B. GRÁFICOS OBTENIDOS EN BASE AL ENSAYO DE FATIGA.....	80

C. DATOS ARROJADOS POR EL EQUIPO.	84
---	-----------

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Diagrama de componentes de una MAC compactada	5
Figura 2-2: Agrietamiento térmico	8
Figura 2-3: Ahuellamiento.....	9
Figura 2-4: Piel de cocodrilo.....	10
Figura 2-5: Composición mezcla SMA.....	14
Figura 2-6: Mezcla tradicional v/s Mezcla SMA.....	14
Figura 2-7: Galón de ligante asfáltico PG 76-22, Elaboración Propia.....	15
Figura 2-8: Fibra Viatop 66. Elaboración Propia.....	17
Figura 2-9: Fibra Viatop 66 que se ocupa. Elaboración Propia.....	17
Figura 4-1: Equipo de viga en flexión en cuatro puntos, vista frontal. Elaboración propia.....	37
Figura 4-2: Equipo de viga en flexión en cuatro puntos, vista lateral. Elaboración propia.....	37
Figura 4-3: Dispositivo de carga, perteneciente al LEMCO. Elaboración Propia.....	38
Figura 4-4: Características de carga y libertad del ensayo de fatiga. Fuente: Norma AASHTO T321-17.....	39
Figura 4-5: Camara Ambiental. Elaboración Propia.....	39
Figura 4-6: Compactador de rodillo. Elaboración Propia.....	40
Figura 4-7: Mezclado de materiales que conforman mezcla SMA. Elaboración Propia.....	45
Figura 4-8: Incorporación de ligante en áridos. Elaboración propia.....	45
Figura 4-9: Cara recientemente cortada. Elaboración Propia.....	48
Figura 4-10: Viga siendo cortada. Elaboración Propia.....	48
Figura C-1: Datos probeta 1.....	84
Figura C-2: Datos probeta 2.....	84
Figura C-3: Datos probeta 3.....	85
Figura C-4: Datos probeta 4.....	85
Figura C-5: Datos probeta 5.....	86
Figura C-6: Datos probeta 6.....	86
Figura C-7: Datos probeta 7.....	87
Figura C-8: Datos probeta 8.....	87
Figura C-9: Datos probeta 9.....	88
Figura C-10: Datos probeta 10.....	88
Figura C-11: Datos probeta 11.....	89
Figura C-12: Datos probeta 12.....	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Especificaciones de agregados gruesos. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.....	21
Tabla 3-2: Granulometría gravilla ½" Puente Verde. Elaboración Propia.....	22
Tabla 3-3: Granulometría de "Gravilla 3/8" Maipú". Elaboración Propia.....	23
Tabla 3-4: Especificaciones de agregados finos. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.....	24
Tabla 3-5: Granulometría de áridos finos "Polvo de roca". Elaboración Propia.....	24
Tabla 3-6: Especificaciones Polvo Mineral. Fuente: especificaciones técnicas reparación de pavimentos, Vías Chile.....	25
Tabla 3-7: Granulometría filler "Sopracal". Elaboración Propia.....	25
Tabla 3-8: Especificaciones Ligante Asfáltico. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.....	26
Tabla 3-9: Especificaciones Ligante residual para riego de liga. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.....	27
Tabla 3-10: Banda granulométrica para confección de mezcla SMA. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.....	28
Tabla 3-11: Tolerancias granulométricas. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.....	28
Tabla 3-12: Banda Granulométrica mezcla SMA. Elaboración propia.....	29
Tabla 3-13: Parámetros de dosificación. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.....	30
Tabla 3-14: Resultados obtenidos de mezcla SMA. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.....	31
Tabla 4-1: Requerimientos mínimos de sistema de pruebas. Fuente: norma AASHTO T321-17.....	36

Tabla 4-2: Resultados Molde 1 (Densidad-%Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 4-3: Resultados Molde 2 (Densidad-%Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 4-4: Resultados Molde 3(Densidad-%Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 4-5: Resultados Molde 4 (Densidad-%Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 4-6: Resultados Molde 5 (Densidad - %Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 4-7: Resultados Molde 6 (Densidad - %Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 5-1: Resultados Nivel de Deformación 250 $\mu\epsilon$. Ensayo de fatiga. Elaboración propia.	53
Tabla 5-2: Resultados Nivel de Deformación 400 $\mu\epsilon$. Ensayo de fatiga. Elaboración propia.	53
Tabla 5-3: Resultados Nivel de Deformación 500 $\mu\epsilon$. Ensayo de fatiga. Elaboración propia.	54
Tabla 5-4: Resultados Nivel de Deformación 750 $\mu\epsilon$. Ensayo de fatiga. Elaboración propia.	54
Tabla 5-5: Resumen de resultados ensayo de fatiga. Elaboración propia.	55
Tabla 5-6: Resultados ϵ_6 , N500, k1 y k2, Mezcla SMA Vías Chile. Elaboración Vanessa Lobos.	57
Tabla 5-7: Resumen de resultados ensayo de fatiga, Autopista del Maipo. Elaboración Vanessa Lobos.	57
Tabla 5-8: Resumen de resultados ensayo de fatiga, Autopista Central. Elaboración Vanessa Lobos.	58
Tabla 5-9: Resultados ϵ_6 , N500, k1 y k2, Autopista Central. Elaboración Vanessa Lobos.	59
Tabla 5-10: Resumen de resultados ensayo de fatiga, Aeropuerto. Elaboración Andrés Vázquez.	59
Tabla 5-11: Resultados ϵ_6 , N500, k1 y k2, Autopista Aeropuerto. Elaboración Andrés Vázquez.	60
Tabla A-1: Resumen datos registrados para probeta P1, ensayada a 500 $\mu\epsilon$.	74
Tabla A-2: Resumen datos registrados para probeta P2, ensayada a 750 $\mu\epsilon$.	74
Tabla A-3: Resumen datos registrados para probeta P3, ensayada a 500 $\mu\epsilon$.	75
Tabla A-4: Resumen datos registrados para probeta P4, ensayada a 750 $\mu\epsilon$.	75
Tabla A-5: Resumen datos registrados para probeta P5, ensayada a 500 $\mu\epsilon$.	76
Tabla A-6: Resumen datos registrados para probeta P6, ensayada a 750 $\mu\epsilon$.	76
Tabla A-7: Resumen datos registrados para probeta P7, ensayada a 250 $\mu\epsilon$.	77
Tabla A-8: Resumen datos registrados para probeta P8, ensayada a 250 $\mu\epsilon$.	77
Tabla A-9: Resumen datos registrados para probeta P9, ensayada a 250 $\mu\epsilon$.	78
Tabla A-10: Resumen datos registrados para probeta P10, ensayada a 400 $\mu\epsilon$.	78
Tabla A-11: Resumen datos registrados para probeta P10, ensayada a 400 $\mu\epsilon$.	79
Tabla A-12: Resumen datos registrados para probeta P11, ensayada a 400 $\mu\epsilon$.	79

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 3-1: Curva granulométrica Gravilla ½" Puente Verde. Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.	22
Grafica 3-2: Curva granulométrica Gravilla 3/8" Maipú. Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.	23
Grafica 3-3: Curva granulométrica Áridos finos Polvo Roca, Maipú. Elaboración: Enrique Tabilo, Memorista.	24
Grafica 3-4: Curva granulométrica Filler "Sopracal". Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.	26
Grafica 3-5: Banda granulométrica mezcla SMA. Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.	29
Grafica 3-6: Banda granulométrica diseño "TL Asphalt –StB 07 Modificada". Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.	30
Grafica 3-7: Densidad (Marshall) vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.	32
Grafica 3-8: Huecos (Marshall) vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.	32
Grafica 3-9: Estabilidad vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.	32
Grafica 3-10: Relación V.A.M. vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A3410/19, CDI, Bitumix.	33
Grafica 3-11: Relación Betun-Vacios (%) vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A3410/19, CDI, Bitumix.	33
Grafica 3-12: <i>VACDCR Varillado y VCAMIX</i> vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.	33
Grafica 5-1: Curva de fatiga. Elaboración propia.	56
Grafica 5-2: Curva de fatiga, Autopista del Maipo. Elaboración Vanessa Lobos.	58
Grafica 5-3: Curva de fatiga, Autopista Central. Elaboración Vanessa Lobos.	59
Grafica 5-4: Curva de fatiga, Aeropuerto. Elaboración Andrés Vázquez.	60
Grafica 5-5: Curvas de fatiga. Elaboración propia.	63
Grafica 5-6: Grafica de comparación entre k1 y k2. Elaboración propia.	64
Grafica B-1: Rigidez vs Ciclos de carga (500 $\mu\epsilon$).	80
Grafica B-2: Rigidez vs Ciclos de carga (750 $\mu\epsilon$).	80
Grafica B-3: Rigidez vs Ciclos de carga (250 $\mu\epsilon$).	81

Grafica B-4: Rigidez vs Ciclos de carga (400µε).....	81
Grafica B-5: Rigidez vs Ciclos de carga (500µε).....	82
Grafica B-6: Rigidez vs Ciclos de carga (750µε).....	802
Grafica B-7: Rigidez vs Ciclos de carga (250µε).....	803
Grafica B-8: Rigidez vs Ciclos de carga (400µε).....	813

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 4-1: Masa inicial de la mezcla sin fibra.....	40
Ecuación 4-2: Factor de corrección uno.....	40
Ecuación 4-3: Factor de corrección dos.....	40
Ecuación 4-4: Densidad de la mezcla.....	40
Ecuación 4-5: Porcentaje de vacíos.....	41
Ecuación 4-6: Porcentaje de agua absorbida.....	47
Ecuación 4-7: Densidad de acuerdo al MC 8.302.38, método B.....	47
Ecuación 4-8: Porcentaje de huecos de aire en la mezcla.....	47
Ecuación 4-9: Deformación máxima de tracción.....	49
Ecuación 4-10: Angulo de fase.....	50
Ecuación 4-11: Esfuerzo máximo de tracción.....	50
Ecuación 4-12: Rigidez flexural.....	50
Ecuación 4-13: Energía disipada por ciclo.....	50
Ecuación 4-14: Energía disipada acumulada.....	51
Ecuación 4-15: Ecuación ensayo a deformación controlada.....	51
Ecuación 4-16: Ecuación ensayo a esfuerzo controlado.....	51
Ecuación 5-1: Ecuación curva de fatiga mezcla SMA.....	56
Ecuación 5-2: Ecuación curva de fatiga mezcla SMA en función de variable y.....	56
Ecuación 5-3: Ecuación a deformación controlada de mezcla SMA.....	56
Ecuación 5-4: Ecuación a deformación controlada en función de ϵt y k_2	64

1. INTRODUCCION.

1.1. ANTECEDENTES GENERALES.

Dentro del ámbito del rubro vial se encuentra el área de pavimentación, que se define como: capa constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos, el cual es calculado y diseñado previamente por los diferentes grupos multidisciplinarios de empresas de ingeniería privada o por parte de los responsables del área vial de los organismos del gobierno. Dentro de esta área se tienen dos importantes tipos de pavimentación que son el pavimento asfáltico y de hormigón. La presente memoria se enfoca netamente en el pavimento asfáltico (mezcla asfáltica en caliente (MAC)), el cual se caracteriza basándose en el desempeño por fatiga.

La mezcla a caracterizar es la Stone Mastic Asphalt (SMA), ésta es una mezcla poco convencional en Chile, ya que desde hace poco tiempo se empezó a utilizar en el país, pero a nivel internacional tanto en EEUU, Canadá, Japón, como en países europeos, ha sido utilizada con excelentes resultados. Los buenos resultados que ha presentado se basan en la combinación de ligante asfáltico, áridos (incluido filler), fibras, y eventualmente aditivos mejorados de adherencia, que le brindan excelentes parámetros de servicio bajo condiciones totalmente desfavorables, ya sea en climas extremos, con mucha agua o de amplias variaciones térmicas. Además ésta presenta una muy buena conservación en el tiempo, por lo que los costos de mantenimiento no son muy elevados comparadas con otros tipos de mezclas.

Las mezclas de tipo SMA al igual que otras mezclas asfálticas, al ser sometidas a deformaciones o cargas, generan en su estructura microgrietas, las cuales con el paso del tiempo se van acrecentando y expandiendo hasta llegar a la falla del material. Este tipo de carga a la cual está expuesta el pavimento es de carácter cíclico y se genera principalmente por el paso de vehículos de diferentes tamaños por su superficie, induciendo la aparición de fisuras que se empiezan a propagar.

El fenómeno de fatiga en este tipo de materiales se puede presentar de dos maneras; el agrietamiento que se genera desde la parte inferior hasta la superficie del pavimento, el cual se asocia al fenómeno de tracción en la parte inferior que se produce por la flexión que inducen el paso de vehículos sobre el pavimento, y el agrietamiento que se genera desde la superficie hasta la parte inferior, la cual se produce por la distribución no uniforme de las cargas tanto horizontales como verticales, entre otros.

Dentro del estudio del fenómeno de fatiga se encuentran diferentes enfoques como: energía o disipación de energía, mecánica de fractura, mecánica de daño y fenomenológico (tradicional). Dentro de la presente memoria sólo se analiza desde el punto de vista fenomenológico, el cual entrega información empírica basada en ensayos y calibraciones, combinando lo observado con los datos tabulados de los ensayos.

La realización del estudio de fatiga tiene como objetivo caracterizar el comportamiento de la mezcla frente al agrietamiento. Para obtener estos parámetros, se necesita disponer de resultados, los cuales los entrega el ensayo de viga a flexión con

carga en cuatro puntos, a esta se le aplica cuatro niveles de deformación controlada (250, 400, 500 y 750[$\mu\epsilon$]) con ondas de carga sinusoidal, bajo una frecuencia y temperatura de 10[Hz] y 20[°C], siendo el criterio de falla correspondiente a los ciclos requeridos para alcanzar una reducción de un 50% de su rigidez inicial. Con base en los datos obtenidos, se caracteriza la curva de fatiga bajo un enfoque fenomenológico, de donde se extrae el nivel de deformación necesaria para que la mezcla falle al momento de llegar al millón de ciclos (ϵ_6) y la cantidad de ciclos alcanzados hasta la falla para una deformación de 500 [$\mu\epsilon$] (N_{500}).

Esta memoria se enfoca en el estudio de fatiga de una mezcla asfáltica SMA envejecida a corto plazo, el cual se utiliza en el proyecto de reparación de pavimentos de la empresa Vías Chile, que incluye al laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María como ente encargado de verificar y testear la mezcla.

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.

1.2.1. Objetivos Generales.

Los objetivos generales de esta memoria son los siguientes:

- Elaboración y caracterización mediante ensayo de fatiga de mezcla asfáltica SMA, verificada y testeada por el laboratorio LEMCO.
- Realización y obtención de resultados en función del ensayo de viga a flexión con carga en cuatro puntos.
- Ampliación de la base de datos existentes de ensayos a fatiga.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Colaborar con el laboratorio LEMCO en la verificación y testeo del diseño a corto plazo de la mezcla SMA.
- Obtención de parámetros de N_{500} (N° de ciclos que se alcanzan hasta la falla, bajo una deformación de 500 $\mu\epsilon$) y ϵ_6 (Deformación que produce la falla de la probeta al aplicarle un millón de ciclos) a partir de la curva de fatiga compuesta por los niveles de deformación controlada 250, 400, 500 y 750[$\mu\epsilon$], según la normativa AASHTO T 321-17.
- Caracterizar a través del enfoque fenomenológico el comportamiento a fatiga de la mezcla, en relación con a los parámetros de ajuste de las curvas de fatiga (K_1 y K_2).
- Comparar los desempeños obtenidos por el ensayo de fatiga, con los datos existentes realizados en los proyectos FONDEF DO9I1174 y conservación del aeropuerto Arturo Merino Benítez.

1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO.

En este estudio se realizan ensayos de fatiga para una mezcla asfáltica en caliente, Stone Mastic Asphalt (SMA), la cual se coloca en ciertos tramos de la Ruta 5 Norte y General Velásquez. El diseño está a cargo de la empresa Bitumix, para luego

ser verificado y testeado por el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, por ende todo lo referente a la preparación de la mezcla forma parte de este estudio, el cual se realiza completamente en dependencias de la Universidad.

Todo lo relacionado con el ensayo de fatiga y la confección de la mezcla asfáltica en caliente se basa en las siguientes normativas: AASHTO T321-17, UNE-EN 12697 y MC Volumen 8, Capítulo 3, sección Métodos para Asfaltos.

En base a lo anterior, primero se realiza el diseño y se verifica que los parámetros de las especificaciones técnicas estén correctos, luego se prepara la mezcla SMA en las correspondientes proporciones, previamente calculadas para luego ser compactadas. Al ser compactada la mezcla, ésta queda con una forma prismática de 500x180x90[mm] debido al recipiente que le da forma, luego ésta disminuye su temperatura durante 12 horas, después se desmolda, para posteriormente ser cortada y dimensionada en probetas de 380x63x50 [mm], por cada prisma de mezcla se puede obtener dos probetas dimensionadas a las cuales se les determina su correspondiente densidad y porcentaje de vacíos, estas deben estar bajo los rangos impuestos por el diseño previo. Después de realizar los correspondientes cálculos y verificar que los valores sean adecuados a las respectivas especificaciones, las probetas se deben acondicionar a temperatura ambiente en los hornos, para que después de 12 horas se acondicionen nuevamente por 2 horas a 20°C (AASHTO T321-17, 2017)(UNE-EN 12697, 2017). Luego se colocan las probetas en el equipo de fatiga y se ensayan. A partir del ensayo se obtienen diferentes datos que arroja el equipo, de los cuales los más relevantes son la cantidad de ciclos que alcanzó la probeta al llegar al 50% de falla, rigidez inicial y final, y su correspondiente nivel de deformación a la que fue sometida. Sobre la base de estos datos, se promedian la cantidad de ciclos por deformación (250, 400, 500, 750[$\mu\epsilon$]), al determinar estos valores se realiza una gráfica log/log para generar una curva con la cual se puede determinar los parámetros de N_{500} (N° de ciclos que se alcanzan hasta la falla, bajo una deformación de 500 $\mu\epsilon$) y ϵ_6 (Deformación que produce la falla de la probeta al aplicarle un millón de ciclos). Al obtener esta información, se realizan las correspondientes conclusiones acerca del desempeño de la mezcla en cuestión.

1.4. METODOLOGIA DE TRABAJO.

La metodología que sigue la presente memoria posee una estructura que va desde lo básico, ya sea con definiciones propias del área; mezclas y diseños, abarcando hasta lo más específico centrado en el ensayo y como se hizo, finalizando con las conclusiones. Toda la investigación tiene un carácter lógico y orden cronológico. A continuación se enumera la secuencia de trabajo.

- I. Estudio de todo lo relacionado con el tema de fatiga, ya sea revisión bibliográfica de autores reconocidos, normativa nacional-internacional (AASHTO, UNE, Manual de carreteras, entre otros) y memorias antiguas relacionados con el tema.
- II. Recabar información de primera fuente con profesores, laboratoristas y memoristas antiguos.
- III. Al aprender e interiorizarlos conceptos y normas, se debe participar de los ensayos junto a los laboratoristas a modo de ayuda.

- IV. Al interiorizar y practicar los ensayos junto a los laboratoristas, se pasa a planificar, programar y a realizar los ensayos con la ayuda de la gente especializada y experta del laboratorio.
- V. Al realizar los ensayos, se obtienen los datos desde el equipo de fatiga, con los cuales se pueden realizar los gráficos correspondientes.
- VI. Plasmar todo lo anterior en el correspondiente informe de memoria.

1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.

La presente memoria se redacta bajo los siguientes tópicos, enumerados de la siguiente forma:

1. Introducción.

En ésta se informa de manera general y a grandes rasgos acerca del estudio.

2. Marco Teórico

Este capítulo trata temas que agrupen el diseño, composición y estructura de una mezcla bituminosa de tipo MAC, además de los más importantes tipos de deterioros que se puedan presentar en el pavimento.

Se presenta una explicación detallada acerca de todos lo relacionado con este tipo de mezclas SMA, ya sea desde sus orígenes, composición, estructura, características de uso, entre otros.

3. Características del diseño de una mezcla asfáltica SMA.

Define y caracteriza las propiedades y parámetros volumétricos y de diseño de la mezcla asfáltica en caliente.

4. Ensayo de Fatiga.

Este capítulo explica de forma detallada el ensayo, como se realiza cronológicamente, tipos de errores que se presentan, cómo funciona el equipo y las condiciones de ensayo.

5. Resultados.

Se presentan todos los datos obtenidos del ensayo de fatiga.

6. Conclusiones.

Se da respuesta y comentarios a los resultados obtenidos del ensayo y objetivos.

Bibliografía.

Anexos.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. GENERALIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

2.1.1. Mezcla asfáltica en caliente (MAC).

Las mezclas asfálticas en caliente (MAC) se definen como la combinación de áridos con un ligante tradicional o modificado, los cuales necesitan calentarse para disminuir la viscosidad y conseguir una combinación homogénea y una buena puesta en obra. Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla. La finalidad de seleccionar las proporciones de asfalto y agregados es con el objeto de poder optimizar las cualidades de la mezcla como:

- Resistencia al tráfico.
- Resistencia al clima
- Durabilidad.
- Resistencia al deslizamiento.
- Trabajabilidad y contractibilidad.

El proceso de fabricación, implica calentar el agregado pétreo y el ligante a altas temperaturas, muy superior a la ambiental, para posteriormente ser colocada en obra. Este proceso de elaboración se realiza en forma mecánica en centrales fijas o móviles, dependiendo del caso.

La ventaja de la utilización de este tipo de mezclas son la regularidad, seguridad superficial y su puesta en obra que dan los pavimentos de diferentes espesores. Los inconvenientes de la mezcla son su sensibilidad a temperaturas extremas, diferentes tipos de clima y tráfico.

A continuación se visualiza en la figura 2-1 el diagrama de los componentes de una MAC.

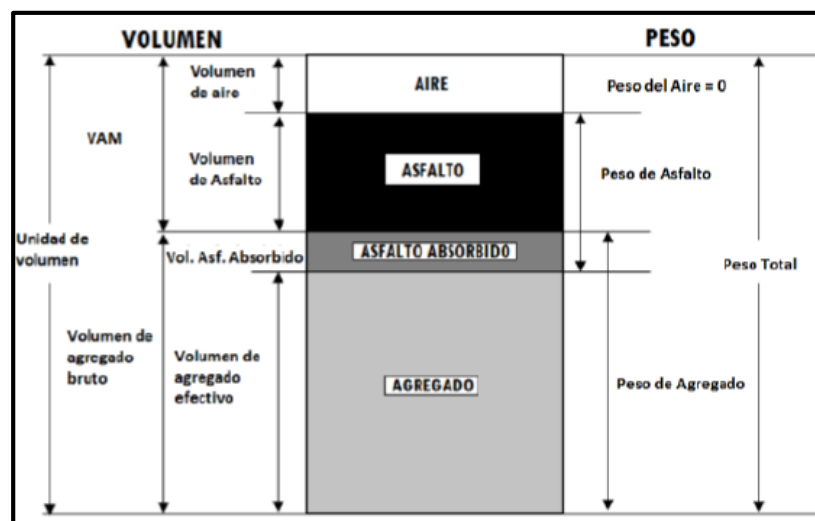


Figura 2-1: Diagrama de componentes de una MAC compactada

2.1.2. Diseño de mezcla asfáltica en caliente (MAC).

Las mezclas asfálticas poseen diferentes formas de diseño, dentro de las cuales se pueden distinguir dos tipos: Método Marshall y Método SUPERPAVE. A continuación se describen los dos métodos mencionados.

2.1.2.1. Método Marshall.

Es un método desarrollado por Bruce Marshall para el Departamento de Carreteras de Mississippi en la década de 1930. Es el procedimiento más utilizado del mundo y el diseño de mezcla predominante para pavimentos de aeropuertos. Este consta básicamente en evaluar los esfuerzos de compactación, para el cual se deben seleccionar y ensayar los agregados y asfalto (establecer temperaturas de mezcla y compactación), desarrollar mezclas de prueba y por último medir estabilidad y fluencia.

El método Marshall presenta ventajas dentro de su desempeño como: considerar vacíos de aire, resistencia y durabilidad, equipamiento de bajo costo y el procedimiento de control/aceptación es sencillo. De la misma forma presenta desventajas como: impacto como método de compactación, no considera resistencia de corte y la aplicación de cargas es perpendicular a la dirección de compactación (Wahr, 2010).

2.1.2.2. Método SUPERPAVE.

Este método se inició con un estudio por parte de la Federal Highway Administration (FHWA) en el año 1987, el cual tenía como finalidad mejorar los rendimientos de los pavimentos MAC. El sistema SUPERPAVE (Superior Performance Pavements), se basa en tres aspectos relacionados entre sí, los cuales son: diseño volumétrico de mezcla, ensayo mecánico simple y ensayo mecánico extensivo. A diferencia del método Marshall que ocupa como método de compactación el "Impacto", el diseño SUPERPAVE ocupa la "Compactación giratoria", el cual emula de mejor manera la compactación que se hace en obra. Por último este método utiliza razones volumétricas para seleccionar el contenido de asfalto óptimo.

El método SUPERPAVE consta básicamente en seleccionar y ensayar los agregados y asfalto (estableciendo temperaturas de mezcla y compactación), y desarrollar mezclas de prueba.

El método presenta las siguientes ventajas: mejor simulación de compactación en terreno, mejor atención a propiedades de agregados y asfalto, considera diseño de mezcla y asfalto, equipos de ensayos exhaustivos basados en desempeño. Las desventajas que presenta el método son su alto costo y su ejecución es más compleja que Marshall (Wahr, 2010).

2.1.3. Deterioros producidos en mezclas asfálticas.

La finalidad principal que cumplen las mezclas asfálticas es poder soportar las cargas cíclicas que ejercen los vehículos al transitar por la superficie del pavimento, estas cargas se deben transmitir a las capas inferiores con el fin de poder distribuirlas, basándose en este principio el daño generado por éstas se mitiga de cierta forma. De

esta manera se logra proporcionar condiciones adecuadas de rodadura, características idóneas para entregar seguridad, confortabilidad y comodidad al usuario.

Los defectos que presenta un pavimento y que disminuyen la comodidad del usuario o la vida de servicio de la estructura, frecuentemente corresponden a defectos producidos por múltiples condiciones y factores externos, tales como tiempos de aplicación de carga y temperaturas. Basándose en esto, sus caracterizaciones y propiedades deben estar obligatoriamente vinculadas a estos factores, lo cual implica conocer la reología de la mezcla.

El correcto desempeño en el tiempo de las mezclas asfálticas es una cualidad básica que todos los pavimentos deberían poseer, es por esto que dependen de muchos factores, los cuales pueden estar combinados, como: clima (temperaturas, ciclos de hielo/deshielo, oxidación, zona geográfica, agua, etc.), procesos constructivos (uso de materiales inadecuados, malos procesos de elaboración, deficiente fiscalización, etc.), tráfico (cargas por eje, pesos excesivos en vehículos de transporte, etc.), entre otros.

Los deterioros del pavimento la mayoría de las veces se pueden evitar, siempre y cuando se tomen las medidas adecuadas y correspondientes en función de múltiples factores estudiados previamente en el diseño, como en la colocación de la mezcla en obra. Estas se pueden prevenir, al finalizar la faena de pavimentación si se detecta una deficiente textura superficial, también se pueden detectar en el tiempo con el transcurso del tráfico, durante sus años de servicio, los cuales son objetos de estudios y clasificaciones.

Existen diferentes tipos de fallas, las cuales están asociadas a diferentes factores que los propician. En este caso específico la aplicación de cargas cíclicas a pavimentos generan fisuraciones en las capas asfálticas y deformaciones permanentes en todas las capas de la estructura, entre otros. En relación a lo anterior se describen los principales tipos de fallas.

2.1.3.1. Agrietamiento térmico.

Este tipo de agrietamiento se produce en lugares donde las temperaturas mínimas son muy bajas y el pavimento es sometido a cargas de aplicación muy rápidas, este fenómeno genera que el pavimento sea propenso a contracciones de la mezcla; esto se produce generalmente porque la mezcla asfáltica posee un elevado porcentaje de vacíos, que el ligante asfáltico posea módulos de rigidez muy altos (asfaltos duros) o que tenga un alto grado de oxidación (Silva, 2015).

A continuación la figura 2-2, muestra un pavimento que sufra este tipo de deterioro.



Figura 2-2: Agrietamiento térmico

2.1.3.2. Ahuellamiento.

Es una deformación permanente que se presenta como depresión de la zona localizada sobre la trayectoria del neumático de cierto vehículo. Frecuentemente se encuentra acompañado de una elevación de las áreas adyacentes a la zona deprimida y de fisuración. El ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar el hidroplaneo por almacenamiento de agua.

El ahuellamiento ocurre principalmente debido a una deformación permanente de alguna de las capas del pavimento o de la subrasante, generada por deformación plástica del pavimento asfáltico o por deformación de la subrasante debido a la fatiga de la estructura ante la aplicación de cargas cíclicas.

La deformación plástica de la mezcla asfáltica tiende a aumentar en zonas de altas temperaturas, elevado número de repeticiones de cargas, baja velocidad de los vehículos y también puede darse por una compactación inadecuada de las capas durante la construcción, por el uso de asfaltos blandos o agregados redondeados (Miranda, 2010).

A continuación la figura 2-3, muestra un pavimento que sufre este tipo de deterioro.



Figura 2-3: Ahuellamiento.

2.1.3.3. Agrietamiento por Fatiga.

Son una serie de fisuras interconectadas con patrones irregulares, generalmente ubicadas en zonas donde hay repeticiones periódicas de carga-descarga, provocadas por el paso de vehículos de diferentes tamaños, esto provoca que en el pavimento se genere el fenómeno de “flexión”, el cual con el paso del tiempo lo debilita perdiendo de esta manera propiedades mecánicas y estructurales fundamentales para su buen desempeño en su vida útil. A partir de esto se generan diferentes grietas en la capa asfáltica, las cuales tienden a iniciarse en la parte inferior donde los esfuerzos de tracción son mayores bajo la acción de cargas.

Estas son generalmente de carácter longitudinal, las cuales con el paso del tiempo se pueden extender y unir con otras grietas formando lo que se conoce como “piel de cocodrilo”. En casos extremos donde no existen reparaciones para este tipo de agrietamiento, se llega a la etapa final de este tipo de falla, el cual genera la aparición de “baches”, debido a que parte del pavimento agrietado se empieza a desprender.

Este tipo de agrietamiento es uno de los más frecuentes durante los años de servicio del pavimento. De esta manera al aumentar el número de flexiones que generan el constante tráfico de vehículos, irremediablemente disminuye la resistencia estructural (disminución del módulo de rigidez) y la resistencia al paso del agua, la cual encuentra camino en las grietas para ingresar dentro del pavimento y deteriorarlo más.

A continuación la figura 2-3, muestra un pavimento que sufre este tipo de deterioro.



Figura 2-4: Piel de cocodrilo.

2.1.3.3.1. Formación de grietas en el pavimento.

Para este tipo de agrietamiento, las fisuras se generan cuando los vehículos que transitan por el pavimento generan una situación de carga y descarga en cierto punto, basándose en esto los componentes tensoriales de la capa de rodadura aumentan a medida que la rueda se aproxima a este punto, hasta que estos son máximos cuando esta se encuentra sobre el sitio en cuestión, de la misma forma a medida que la rueda se aleja, los componentes tensoriales disminuyen. En relación con lo anterior, la componente horizontal de la compresión en la parte superior del pavimento, se convierte en tracción en la parte inferior. De esta manera el paso de un neumático emula la situación de cargas cortas y rápidas que continúan con periodos de reposo, este ciclo se repite al pasar otra rueda.

El agrietamiento debido al fenómeno de fatiga, se genera debido a los esfuerzos de tensión y cortes como también las deformaciones que causan micro-grietas, las cuales se pueden acumular frente a la constante aplicación de cargas, transformándose así en macro-grietas, llegando a ser visibles hasta llegar a la fatiga de material. A medida que se generan fisuras superficiales de carácter longitudinal como transversal, primero aparecen las grietas longitudinales para posteriormente pasar a las transversales, si la cantidad de estas aumenta se da lugar al agrietamiento denominado “piel de cocodrilo”.

Se pueden distinguir dos tipos de agrietamientos de este tipo, los cuales dependen de cómo se genere la aparición de fisuras, a continuación se especifican este tipo de fallas:

- **Fisuración descendente o Top-Down cracking:** Es aquella que se genera en la superficie y avanza hacia el interior del pavimento. Esta se produce por elevados esfuerzos tensionales y superficiales, las cuales se generan por elevados deltas de temperatura. Este es el menos común.

- **Fisuración ascendente o por reflexión de capas inferiores:** Esta es la más común, donde el agrietamiento ocurre desde la parte inferior de la capa asfáltica hasta su superficie. Esta tiende a originarse en la parte inferior donde los esfuerzos de tracción provocados por las cargas ejercidas por los vehículos son mayores.

2.1.3.3.2. Relación entre agrietamiento por fatiga y módulo de rigidez.

Dentro de todo lo que es el agrietamiento por fatiga, un factor muy importante y que tiene relevancia significativa es el módulo de rigidez. Esta básicamente es una constante que se asigna a cada material según su resistencia a deformarse, basándose en esto, si una mezcla asfáltica posee un módulo elevado, significa que tendrá poca tendencia a deformarse y una capacidad de retorno a su estado inicial más elevada. Por ende las mezclas con un módulo de rigidez mayor serán menos propensas a deformarse y vuelven a su estado original más rápido.

Esta característica la confiere el ligante a la mezcla, entregándole un comportamiento visco-elástico, el cual le entrega dos tipos de respuestas ante diferentes frecuencias de cargas y temperaturas, siendo del tipo sólido elástico ante periodos cortos de carga a bajas temperaturas o del tipo líquido viscoso ante tiempos largos de carga a altas temperaturas. Por ende se puede decir que el módulo de rigidez depende de la temperatura y de los periodos de carga a la que el material esté expuesto ya que de esta forma permite o no que el material se comporte de formas elásticas, viscosas o ambas.

Con base en todo lo anterior se puede decir que la mezcla asfáltica se comporta realmente como un material viscoelastoplástico (comportamiento termo-reológico no lineal), o sea que es un material que presenta diferentes respuestas de comportamiento en el tiempo, las que dependen de: temperatura, tasa de carga, tiempo de carga y nivel de tensiones o deformaciones.

Previamente se mencionan los factores más importantes que afectan el módulo de rigidez y por ende la mezcla, a continuación se mencionan otros factores que lo afectan como:

- El porcentaje del betún influencia la manifestación en el ángulo de desfase entre la deformación y la fuerza.
- El porcentaje de vacíos que presenta una mezcla a medida que esta es compactada, muestra un módulo de rigidez mayor si la compactación es adecuada, por ende a menor porcentaje de vacíos que presente la mezcla mayor será el módulo de rigidez.

2.1.3.3.3. Factores de la mezcla relacionados con fatiga.

El agrietamiento que se genera en mezclas asfálticas se asocia a diferentes factores de los cuales depende la resistencia a compresión-tracción y la rigidez que presente el pavimento dependen de los siguientes aspectos:

- Porcentaje de ligante, el cual a mayor contenido mejora notablemente su resistencia a la fatiga.

- Vacíos de aire, al existir un exceso de estos la cohesión interna de la mezcla disminuye por ende la resistencia a la fatiga disminuye. A volumen constante, se comprueba que la mezcla al tener un pequeño número de “Grandes Vacíos” es más desfavorable que tener la misma cantidad pero en gran número de “Pequeños Vacíos”.
- Envejecimiento, depende de la fragilidad del material bituminosos y de su exposición al ambiente.
- Segregación del árido grueso, se genera por la pérdida de finos lo cual provoca la disminución de la cohesión interna de la mezcla y por ende su resistencia.
- Contenido y tipo de filler, esta fija el grueso de la película de betún dándole la respectiva rigidez a la mezcla, el efecto que éste confiere varía según el tipo, ya que las superficies específicas del filler son diferentes confiriéndoles a la mezcla diferentes densidades y por ende diferentes módulos de rigidez.
- Humedad, es un factor clave de deterioro del pavimento, la cual genera pérdida de cohesión, degradación por fractura de partículas de agregado por efecto de las “heladas” y fisura por adhesión entre asfalto y agregado.
- Temperatura, afecta el módulo de rigidez, aumentándolo cuando la temperatura es baja y disminuyéndolo cuando ésta es alta. A un nivel de deformación constante, la cantidad de ciclos de carga para llegar a la falla aumenta si es que la temperatura se eleva, por ende la resistencia a fatiga también se incrementa bajo esta condición.

2.2. MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE EN CUESTIÓN STONE MASTIC ASPHALT (SMA).

2.2.1. Antecedentes del STONE MASTIC ASPHALT (SMA).

A mediados de los años sesenta, en Alemania, se deseaba obtener un pavimento de máxima resistencia al desgaste y deterioro, debido al uso de neumáticos de clavos en las rutas. Debido a esto se genera una técnica que da paso a la creación del Stone Mastic Asphalt o por sus siglas (SMA).

A principios de la siguiente década, la industria del asfalto empezó a cambiar la manera de hacer negocio por medio del reciclaje del asfalto. La crisis del petróleo hizo el reciclaje muy ventajoso. No sólo se ahorra cemento asfáltico, sino también agregados, energía, espacio y dinero, por ende se diseñaron nuevas mezclas que pudieran mejorar el desempeño del asfalto.

La empresa de pavimentos, STRABAG, con la colaboración de J. Rettenmaier (líder en Tecnología de Fibras) desarrolló la mezcla SMA. Después de la prohibición del uso de neumáticos de clavos, se verificó que el pavimento SMA aseguraba pavimentos durables que exhibían una muy elevada resistencia al desgaste en las rutas de alto tránsito.

Como consecuencia en 1984 se normalizó el sistema SMA en Alemania. Luego al verse los excelentes resultados comenzó a ser utilizado en otros países de Europa, Estados Unidos y Asia Pacífico. Muchos países han establecido sus propias normas para SMA, fijando la CEN (Comisión de estándares Europeos) una norma europea estandarizada la cual a través de la UNE es aplicada en España. Asimismo, en Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda, China, Corea del Sur, Taiwán y otros grandes países asiáticos, el SMA está ganando rápidamente la aceptación de las autoridades Viales y la industria del asfalto.

Nuevos diseños de mezclas fueron creados a finales de la década del 80, estos se empiezan a generar gracias a que el SHRP (Strategic Highway Research Program) emprendió una iniciativa en los Estados Unidos por parte de las agencias de autopistas del estado a través de la AASHTO, la cual invierte 150 millones de dólares en investigación de pavimentos flexibles asfálticos. Por el año 1993, una nueva especificación de carpeta asfáltica y un nuevo diseño del procedimiento de mezcla fue puesto por medio del sistema "SUPERPAVE", de igual manera investiga sobre las mezclas nacidas en Alemania y conocidas como mezclas tipo SMA con fibras de celulosa, después de haber investigado el por qué las carreteras actuales en Europa se planean con una expectativa de vida de 40 años, con una carga permitida de 11.000 kg por eje, mientras que en Estados Unidos la expectativa de duración es de 20 años con una carga de 9.000 kg por eje. En los últimos años, se han hecho muchos refinamientos los cuales continúan para simplificar el procedimiento, removiendo requisitos redundantes y mejorar su desempeño.

Una de las carreteras más transitadas del mundo se encuentra en Dortmund, Alemania, fue construida en 1980 con mezcla SMA y por ella transitan más de 100.000 camiones de carga, sin que a la fecha muestre grietas o daños de cualquier otro tipo.

Desde entonces el SMA ha demostrado ser un excelente método de construcción de carpetas asfálticas de gran resistencia, altamente duraderas y seguras.

El sistema SMA es en la actualidad el método estándar de construcción en la República Federal Alemana y está registrado con la norma ZTV Asphalt Stb '01.

La diferencia del SMA frente a los asfaltos convencionales se resume de la siguiente forma: Alta resistencia, bajo costo y nulo mantenimiento (Barrera, 2018).

2.2.2. Estructura del STONE MASTIC ASPHALT (SMA).

Se define como concreto asfáltico Stone Mastic Asphalt (SMA) a la combinación de un ligante asfáltico, áridos (incluido filler), fibras y eventualmente aditivos mejoradores de adherencia. Estas mezclas son fabricadas en plantas asfálticas y colocadas en obra a temperaturas muy superiores al ambiente y en espesores menores o iguales a 40 [mm] con tamaños máximos del agregado 12 [mm] y menores, diseñadas con un porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada entre 2 y 4%. A continuación, se visualizan dos imágenes, la primera con los componentes de la mezcla SMA y la otra comparando una mezcla asfáltica convencional con una SMA.

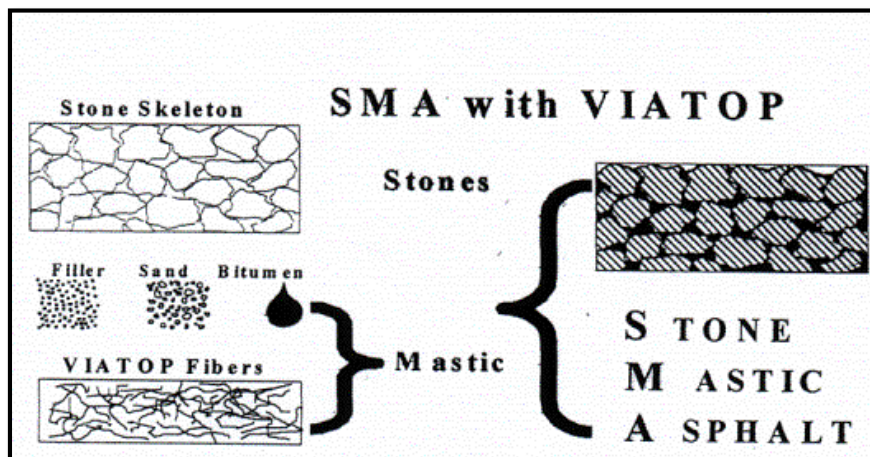


Figura 2-5: Composición mezcla SMA.

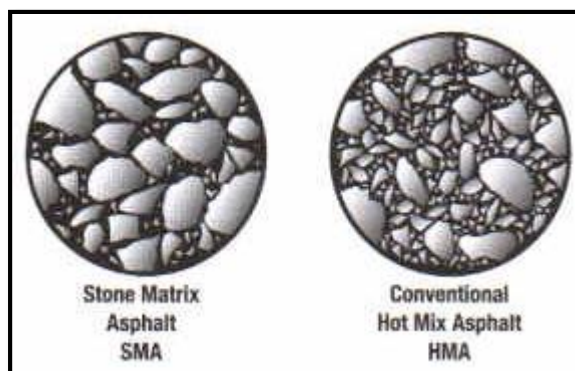


Figura 2-6: Mezcla tradicional v/s Mezcla SMA.

2.2.2.1. Agregados.

La mezcla SMA se caracteriza al estar constituida por una granulometría discontinua, la cual contiene agregado fino y grueso, saltándose el de tamaño intermedio. Esta característica que se denomina “esqueleto mineral” le proporciona a la mezcla una mayor resistencia ante las deformaciones, además en el proceso de compactación de la mezcla la no fractura de las partículas es un factor importante y característico de la mezcla SMA, es por esto que se puede decir que el agregado grueso le entrega, fuerza, resistencia y dureza, dependiendo siempre de la proporción de agregado fino que esta tenga.

2.2.2.2. Ligante Asfáltico.

El cemento asfáltico en las mezclas SMA es el elemento que mantiene la cohesión entre sus partículas, y su elevado porcentaje con respecto a otras mezclas tradicionales, mejora características fundamentales como la disminución del índice de vacíos, aumento de la resistencia y retardo del proceso de oxidación.

El tipo de asfalto que se utiliza en este tipo de mezclas es de carácter modificado de penetración, el cual cumple con los requisitos de las especificaciones técnicas. Se utiliza asfalto modificado debido a que no se obtienen buenos resultados al usar asfalto tradicional.

Las mezclas SMA tienen un contenido de asfalto entre 6,5 – 7,2%. El bitumen se mantiene estabilizado en la composición granulada de áridos durante el proceso de mezcla, almacenaje intermedio, transporte, pavimentación y compactación por el agregado de un aditivo en base a fibras celulósicas.



Figura 2-7: Galón de ligante asfáltico PG 76-22, Elaboración Propia

2.2.2.3. *Filler.*

Es un material que se define como polvo mineral a la fracción de árido que pasa por el tamiz 0,063 [mm] (ASTM N°30). Forma parte del esqueleto mineral y soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas, además rellena los vacíos del “esqueleto mineral”, impermeabilizando y densificándolo, también facilita la compactación provocando “movilidad” entre los agregados más gruesos.

El objetivo del filler en la mezcla es fortalecerla, pero esta característica que entrega depende de la cantidad que se ocupe, a mayor porcentaje de filler la mezcla aumenta su rigidez, pudiendo presentar en su vida útil grietas de considerable tamaño, y en el caso de que el porcentaje de filler disminuya, la rigidez de la mezcla también lo hará. La utilización de una óptima cantidad de filler puede actuar de dos maneras:

- En partículas de menor tamaño, el filler al mezclarse con el asfalto aumenta la consistencia.
- En partículas de mayor tamaño, se llenan los vacíos que existen entre los agregados gruesos, entregando una mayor resistencia estructural a la mezcla.

El polvo mineral puede tener diferente procedencia de los áridos, separándose de ellos por extracción en la planta asfáltica de fabricación, o bien aportarse a la mezcla por separado de aquellos como un producto comercial o especialmente preparado, dentro de estos se encuentra la cal hidratada, cemento portland y polvo calcáreo.

2.2.2.4. *Fibras de Celulosa.*

Las fibras que se emplean en la fabricación de la mezcla SMA solucionan el problema del escurrimiento de ligante. Esto se produce debido al exceso de asfalto de la mezcla la cual es como una “lechada” asfáltica. Este problema impide que la mezcla tenga una buena consistencia estructural.

Al emplearse las fibras de celulosa en la mezcla SMA, no se modifica químicamente el asfalto, pero si sus propiedades físicas, mejorando características como el aumento de su espesor para que la mezcla no escurra antes de la compactación, además entrega mayor flexibilidad, impidiendo la figuración y sequedad.

Existe una gran variedad de fibras pero la más utilizada, menos costosa y la que ha brindado mejores resultados técnicos, es la fibra de celulosa. Esta posee una estructura tridimensional, característica que le permite al ligante mantener una elevada viscosidad, impidiendo que este escurra durante el almacenamiento, transporte y colocación. Esta fibra ayuda a generar una película más espesa del ligante envolviendo a los áridos, inhibiendo de esta manera características negativas para la mezcla como la humedad, oxidación, separación y fisuración de la carpeta asfáltica. La fibra de celulosa posee una capacidad de absorción de 10 a 12 veces su propia masa, esto le confiere una excelente propiedad la cual permite a la mezcla tener un porcentaje elevado de asfalto.

Existen distintos tipos de celulosas, que se pueden clasificar por diferentes aspectos como sus dimensiones finales o su producción. La producción de fibras de celulosa de elevada homogeneidad que tengan una forma de fácil manipulación en una faena de producción de mezcla es dificultoso, basándose en esta necesidad se crean las fibras Viatop, que tienen un origen alemán, las cuales son de alta calidad y han evolucionado en el tiempo tanto su presentación como sus propiedades al integrar más cantidad de asfalto a la mezcla de manera sencilla. Finalmente esta fibra, se recubre con asfalto, minimizando los escurrimientos y será distribuida en forma de “pellets” que le confieren facilidad en su incorporación y manipulación en las faenas de mezcla.

A continuación, se visualizan imágenes de la fibra Viatop, que se emplea en la mezcla SMA.

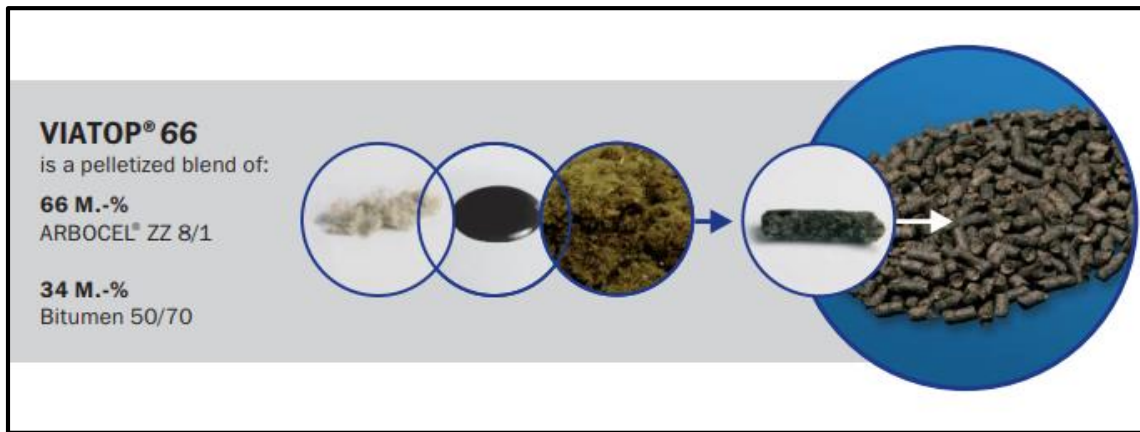


Figura 2-8: Fibra Viatop 66. Elaboración Propia.



Figura 2-9: Fibra Viatop 66 que se ocupa. Elaboración Propia.

2.2.3. Características que presenta la mezcla SMA.

Las mezclas SMA poseen diferentes propiedades y características, las cuales se deben a las diferentes componentes que componen su estructura interna y que le

confieren buenos desempeños durante su vida útil. A continuación se describen estas características.

2.2.3.1. Bajos niveles de mantenimiento.

Al presentar buenas propiedades en su vida útil, la mezcla SMA muestra mayor durabilidad con respecto a otras mezclas, por lo que puede alcanzar muchos años sin que necesite recibir mantenimiento.

2.2.3.2. Resistencia al deslizamiento.

La mezcla SMA al ser colocada y compactada, presenta en su superficie “microcanales”, los cuales hay que recalcar no son grietas. Estos microcanales que son una característica que posee este tipo de mezcla, ayudan a que las pistas no acumulen agua en su superficie y que la encaucen hacia las pistas laterales evitando deslizamientos que puedan provocar accidentes. Estos se producen por la granulometría y por el contacto entre rocas gruesas y la macrotextura de la mezcla, las que frente a lluvia o humedad generan mayor contacto entre el pavimento y el neumático otorgando mayor seguridad a los usuarios.

2.2.3.3. Disminuciones de los niveles de ruido.

Debido a la textura superficial que presenta la mezcla SMA, esta permite reducciones considerables en el ruido que se emite por el contacto entre los neumáticos y el pavimento cuando transitan vehículos. Este ruido se provoca por la aparición de una serie de burbujas de aire que se bombean, hacia el suelo por el paso de los neumáticos sobre el camino.

2.2.3.4. Adherencia entre el ligante y los agregados.

En este tipo de mezclas, se presenta una muy buena adherencia entre el ligante y los áridos, debido al elevado porcentaje de asfalto que esta posee, el cual aumenta con la inclusión de fibra de celulosa, permitiéndole a la mezcla mantener su elevada viscosidad, mejorando la adherencia entre los áridos y el betún.

2.2.3.5. Disminución de la proyección de agua (SPRAY).

La mezcla SMA al poseer “microcanales” en su superficie le permiten canalizar el agua hacia las pistas laterales, debido a las características que poseen estos microcanales que presentan una profundidad considerable evitando de esta forma que al existir presencia de agua y al transitar autos sobre ella se generen salpicaduras evitando de esta manera posibles accidentes que se puedan producir. Esta característica que posee la mezcla SMA reduce hasta en un 60% la salpicadura o spray proyectado por el paso de un vehículo, comparándolo con cualquier otra mezcla.

2.2.3.6. Resistencia al desgaste.

La mezcla SMA al poseer un bajo contenido de vacíos, alto contenido de ligante y una mejor cohesión, la transforman en una mezcla prácticamente impermeable, lo cual impide que el agua penetre deteriorando la carpeta asfáltica y por ende el pavimento. Al

disminuir los efectos que provoca el agua en los pavimentos asfálticos, mejora automáticamente su resistencia al envejecimiento incrementando la durabilidad de estos en su vida útil.

2.2.3.7. Aumento de flexibilidad a temperaturas bajas.

A bajas temperaturas el pavimento se fisura, este fenómeno se produce porque algunas mezclas poseen altos o pocos porcentajes de vacíos, los cuales se congelan y en consecuencia congelan la estructura por completo, aumentando su rigidez y por ende haciéndola más frágil frente al tránsito de vehículos sobre ella. Basándose en este problema, la mezcla SMA presenta un porcentaje de vacíos ideal que mejora este problema frente a bajas temperaturas, de esta manera la mezcla presenta suficiente resistencia y flexibilidad frente a la fisuración térmica que se pueda producir.

2.2.3.8. Resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento).

Las deformaciones permanentes que manifiestan las mezclas asfálticas son producto de dos factores, deformación cortante (flujo plástico sin variación de volumen) y densificación (variación de volumen). Estas se producen por excesos de carga que transmiten los vehículos al pavimento en cuestión. En la gran mayoría de las mezclas este es uno de los principales problemas, en cambio en la mezcla SMA gracias a su estructura interna que absorbe de manera óptima las cargas que se presentan del flujo vehicular y las distribuye uniformemente, no se sobrecarga parte del pavimento. El ligante asfáltico y los agregados actúan de manera elástica regresando a su estado original al ser transmitida la carga, de esta manera se evita el ahuellamiento.

2.2.3.9. Lento envejecimiento (estabilidad a elevadas temperaturas).

Las mezclas asfálticas presentan cierta estabilidad cuando poseen la capacidad de soportar cargas y tensiones con deformaciones tolerables, a las que serán sometidas durante su vida de servicio.

En el caso de la mezcla SMA la estructura pétreo de esta presenta incrementos en la fricción interna en comparación con otras mezclas. Las dimensiones del agregado y la gran resistencia al corte que presenta la mezcla debido al gran porcentaje de asfalto que se utiliza, le entregan una estabilidad elevada a altas temperaturas, impidiendo que la mezcla se vuelva más viscosa y se produzcan deformaciones durante un periodo prolongado de tiempo, además el envejecimiento que se presente será de muy lenta propagación.

2.2.4. Usos de la mezcla SMA.

Generalmente la mezcla SMA es ideal para autopistas ya que su resistencia la hace confiable ante el ahuellamiento, siendo particularmente útil cuando se haya producido agrietamiento en una superficie inferior. El SMA reduce la tendencia al agrietamiento en el pavimento inferior y de esa forma no se propaga a través de la capa no afectando la capa de rodadura de SMA.

Este tipo de mezclas no son adecuadas para superficies pequeñas o para áreas donde la planta de tendido de asfalto tiene un acceso restringido, debido a que el SMA es muy rígido y menos manipulable que otros asfaltos, esta rigidez lo hace difícil de compactar, especialmente si se utilizan asfaltos modificados. El uso de estos tipos de ligante, disminuye considerablemente el tiempo para compactar, por ende el personal que coloque la mezcla deben tener experiencia previa, si los trabajadores no poseen experiencia, no debería usarse.

La mezcla SMA se ha desarrollado para dar una textura superficial efectiva, esto es un requisito principal de seguridad y ayuda a mantener la resistencia al deslizamiento a altas velocidades, además disminuye la profundidad del agua de la superficie. Esto convierte a este pavimento en una vía muy segura para vehículos.

El mantenimiento que se le debe dar, después de cierto tiempo, es básico pero no continuo como sucede con mezclas convencionales. Este tipo de mezcla ha probado ser superior en caminos de tráfico pesado y en aplicaciones industriales, siendo apta para ser usada en distintas aplicaciones como:

- Zonas de amplia variabilidad térmica.
- Pistas de aeropuertos.
- Vías con alta frecuencia de tráfico.
- Puentes.

3. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA.

3.1. Características generales; Áridos.

Dentro de los áridos que se emplean en la mezcla SMA, éstos deben ser de una procedencia natural, siempre y cuando se cumplan los requerimientos de las especificaciones técnicas.

Los áridos que se ocupan deben ser de carácter grueso y fino, y se deben suministrar en dos fracciones granulométricas diferenciadas más la contribución del filler. Estos deben ser acopiados y manejados separadamente hasta ser insertos en las tolvas de alimentación en frío.

La procedencia de los áridos debe ser de rocas sanas, sin que estas sean susceptibles a alguna alteración físico-química o meteorización bajo condiciones desfavorables, tampoco en presencia de agua deben originar disoluciones que causen daño a las estructuras existentes u otras capas o contaminar afluentes acuíferos.

3.1.1. Áridos Gruesos.

El árido grueso se define como la cantidad total de áridos que son retenidos en el tamiz ASTM N°4 (4,75[mm]), estos deben constituirse por partículas chancadas, tenaces y limpias, las cuales deben ajustarse a los siguientes requerimientos.

Tabla 3-1: Especificaciones de agregados gruesos. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.

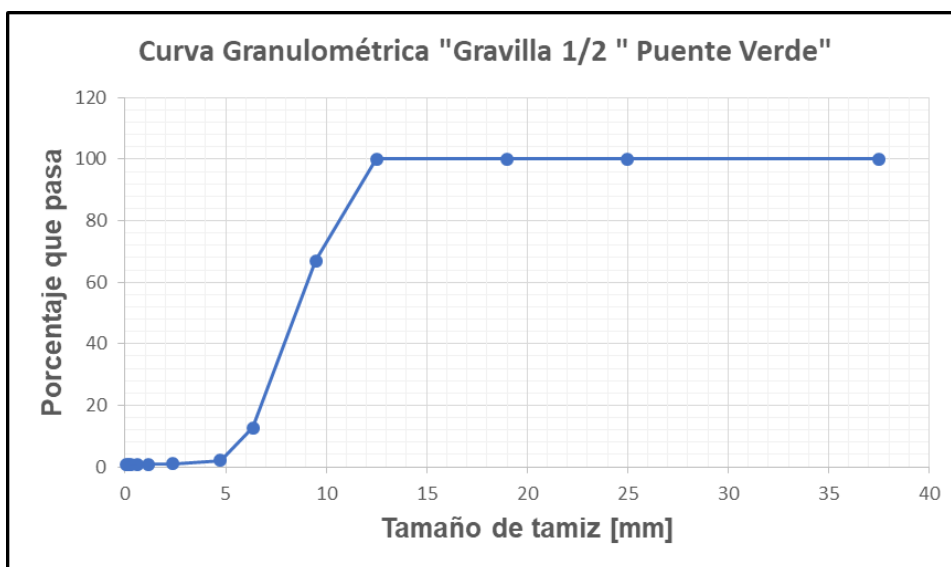
Ensayo	Normativa		Requisito
Cubicidad de partículas	MC. Vol.	NLT	
% Chancado > 3 caras fracturadas	8.202.6	358/90	100%
% Lajas relación 1:5	8.202.6		< 5%
Índice de lajas	8.202.7	354/74	< 25%
Desgaste de los ángeles	8.202.11	149/72	< 20%
Resistencia al pulimiento acelerado	--	174/72	>0,5 (**)
Equivalente de arena	8.202.9	--	>50%
Desintegración de sulfato de sodio	8.202.17	158/72	>15%
Ensayo adherencia R y W	8.202.30	355/74	0-5
Absorción de agua en agregado grueso y fino	8.202.20 y 8.202.21	--	Menor a 2%
Ensayo de hervido	Se adjunta	--	Texas Boiling Test > 95%
Ensayo de adherencia estática	8.302.29	166/92	<95%

Dentro de la clasificación de árido grueso se tienen dos tipos de gravilla, las cuales tienen diferente procedencia y tamaño, estas son de las plantas de Bitumix; "Gravilla 1/2" Puente Verde" y "Gravilla 3/8" Maipú". Estos dos tipos de árido grueso cumplen la especificación antes mencionada por lo que se ocupan en la constitución de

la mezcla. A continuación se presentan las granulometrías de cada árido y su respectiva curva.

Tabla 3-2: Granulometría gravilla ½" Puente Verde. Elaboración Propia.

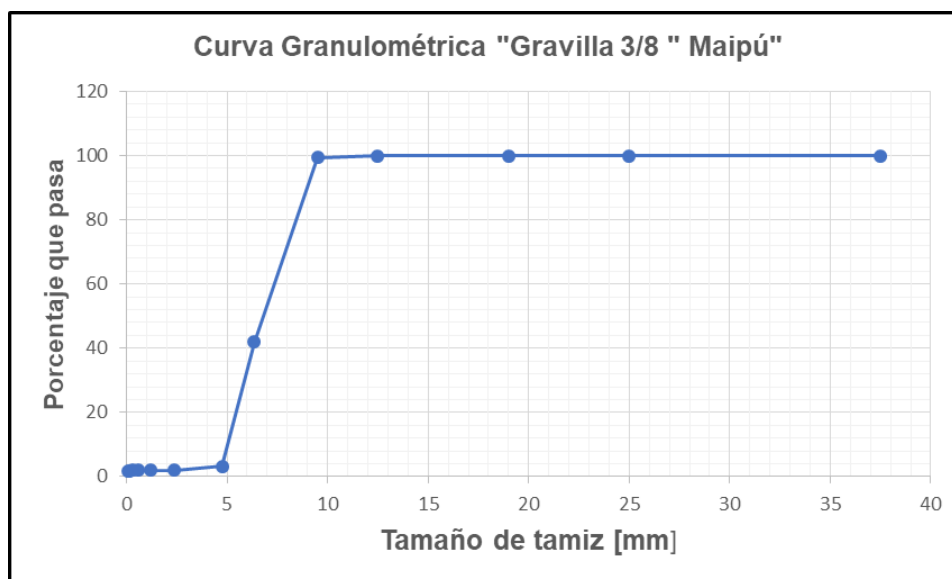
Tamiz		Gravilla 1/2" Puente Verde		
ASTM	mm	Masa Retenida [gr]	%Retenido	%Que Pasa
1 ½	37,5	--	--	100
1	25	--	--	100
3/4	19	--	--	100
1/2	12,5	--	--	100
3/8	9,5	2034,4	31,08	67
1/4	6,35	3561,3	54,4	13
Nº4	4,75	800	12,22	2
Nº8	2,36	66,1	1,01	1
Nº16	1,18	5,2	0,08	1
Nº30	0,6	3,4	0,05	1
Nº50	0,3	2,7	0,04	1
Nº100	0,16	3	0,05	1
Nº200	0,08	6,2	0,09	0,7
R	--	64,3	0,98	0



Grafica 3-1: Curva granulométrica Gravilla ½" Puente Verde. Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.

Tabla 3-3: Granulometría de "Gravilla 3/8" Maipú". Elaboración Propia.

Gravilla 3/8" Maipú				
Tamiz		Masa Retenida [gr]	%Retenido	%Que Pasa
ASTM	mm			
1 ½	37,5	--	--	100
1	25	--	--	100
3/4	19	--	--	100
1/2	12,5	--	--	100
3/8	9,5	36,6	0,54	99
1/4	6,35	391,7	57,52	42
N°4	4,75	2651	38,79	3
N°8	2,36	112,6	1,65	2
N°16	1,18	1,2	0,02	2
N°30	0,6	1	0,01	2
N°50	0,3	1,4	0,02	2
N°100	0,16	4,9	0,07	2
N°200	0,08	10,6	0,16	1,7
R	--	83,9	1,23	--



Grafica 3-2: Curva granulométrica Gravilla 3/8" Maipú. Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.

3.1.2. Áridos Finos.

Los áridos finos se definen como aquellos que traspasan en su totalidad el tamiz ASTM N°4 (4,75[mm]) quedando retenido en el tamiz ASTM N°200 (0,08[mm]). Estos deben provenir del chancado de rocas, las cuales al efectuarse este proceso dependen material fino. Las partículas deben ser duras, limpias, tenaces, libres de arcillas y materias vegetales. El árido fino debe cumplir los siguientes requisitos.

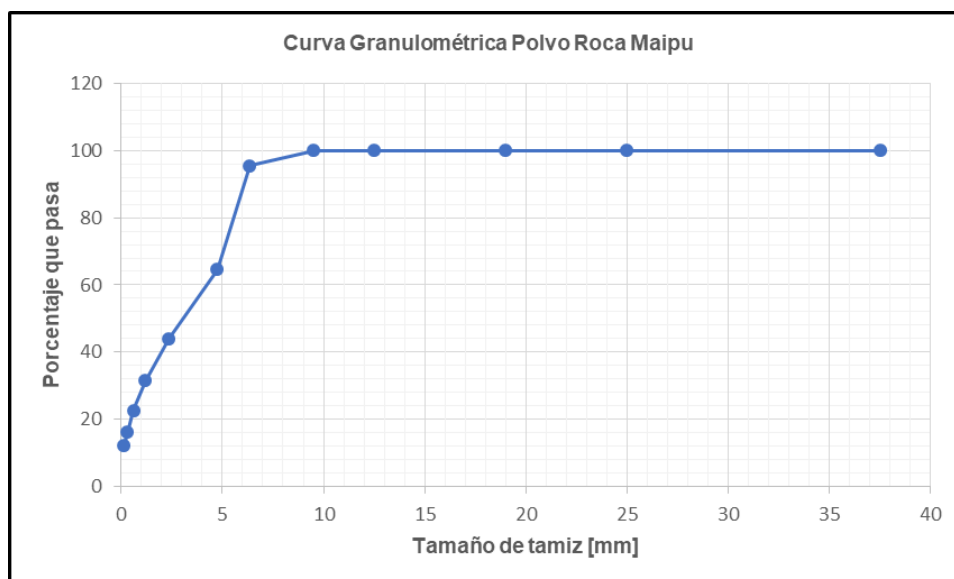
Tabla 3-4: Especificaciones de agregados finos. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.

Ensayo	Normativa		Requisito
	MC. Vol.	NLT	
Equivalente de arena	8.202.9	--	>50%
Azul de metileno	8.202.17	171/90	<10%
Ensayo Adherencia R y W	8.302.30	355/74	>5%
Índice de plasticidad	8.102.4	--	NP

De igual manera que el árido grueso, el árido fino también tendrá una procedencia la cual será la planta de Bitumix ubicada en Maipú. Este tipo de árido fino cumple la especificación antes mencionada por lo que se podrá ocupar en la constitución de la mezcla. A continuación se presenta la granulometría del árido fino y su respectiva curva.

Tabla 3-5: Granulometría de áridos finos "Polvo de roca". Elaboración Propia.

Árido Fino "Polvo Roca, Maipú"				
Tamiz		Masa Retenida [gr]	%Retenido	%Que Pasa
ASTM	mm			
1 ½	37,5	--	--	100
1	25	--	--	100
1/2	12,5	--	--	100
3/8	9,5	--	--	100
1/4	6,35	--	--	100
Nº4	4,75	326,8	4,51	95
Nº8	2,36	2239,2	30,89	65
Nº16	1,18	1493,3	20,6	44
Nº30	0,6	899,7	12,41	32
Nº50	0,3	639,8	8,82	23
Nº100	0,16	475,2	6,55	16
Nº200	0,08	277,8	3,83	12,4
R	--	898,3	12,39	--



Grafica 3-3: Curva granulométrica Áridos finos Polvo Roca, Maipú. Elaboración: Enrique Tabilo, Memorista.

3.1.4. Filler.

El polvo mineral o filler se define como la fracción de árido que pasa en su totalidad el tamiz ASTM N°30 (0,063[mm]), este puede tener diferentes procedencias, separándose de áridos más grandes por extracción en plantas asfálticas de fabricación, o podrán aportarse por separado siendo estos un producto comercial o especialmente preparado.

El filler que quede adherido a los áridos de mayor tamaño, tras pasarse por el secador, en ningún caso podrá superar el 2% de la masa de la mezcla, a menos que se pueda comprobar que su procedencia cumple las condiciones exigidas al de aportación. A continuación se muestran los requisitos que debe tener el filler.

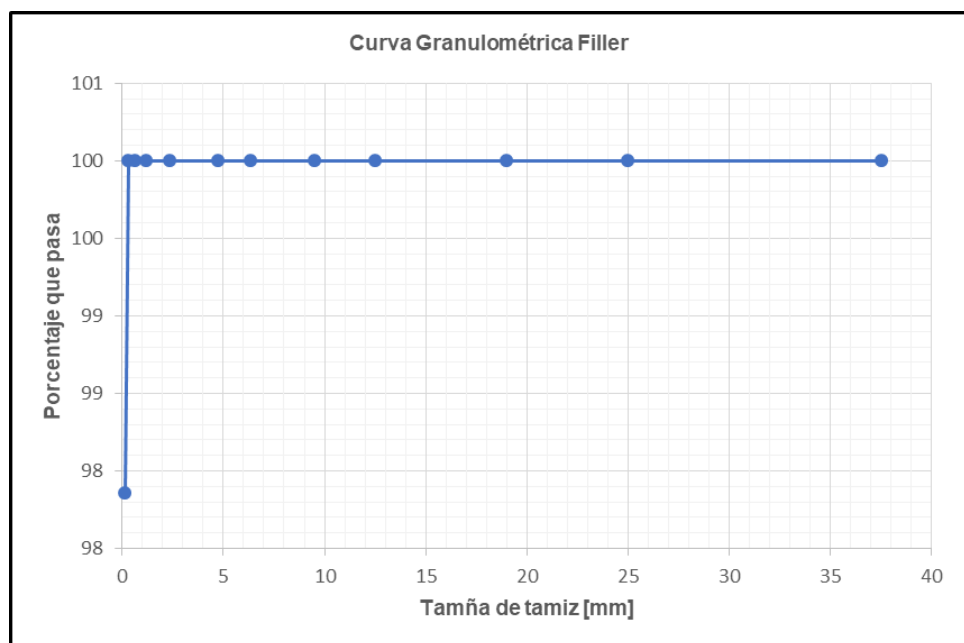
Tabla 3-6: Especificaciones Polvo Mineral. Fuente: especificaciones técnicas reparación de pavimentos, Vías Chile.

Ensayo	Normativa		Requisito
	MC. Vol.	NLT	
Densidad aparente en tolueno (gr/cm3)	8.202.19	--	0.5 a 0.8
Coefficiente de emulsibilidad	--	180/74	<0.6

En este punto se ocupa un producto comercial externo al proceso de extracción en plantas. El producto en cuestión es Cal, la cual proviene de la empresa “SOPRACAL”, esta mejora la adherencia entre el ligante y los áridos, además reduce los daños producidos por la humedad y envejecimiento. A continuación se presentan la granulometría del filler y su respectiva curva.

Tabla 3-7: Granulometría filler “Sopracal”. Elaboración Propia.

Arido Fino “Polvo Roca, Maipú”				
Tamiz		Masa Retenida [gr]	%Retenido	%Que Pasa
ASTM	mm			
1 ½	37,5	--	--	100
1	25	--	--	100
1/2	12,5	--	--	100
3/8	9,5	--	--	100
1/4	6,35	--	--	100
N°4	4,75	--	--	100
N°8	2,36	--	--	100
N°16	1,18	--	--	100
N°30	0,6	--	--	100
N°50	0,3	0,01	0	100
N°100	0,16	0,02	0	100
N°200	0,08	10,97	2,14	97,9
R	--	500,72	97,84	--



Gráfica 3-4: Curva granulométrica Filler "Sopracal". Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.

3.2. Características generales; Ligante asfáltico.

3.2.1. Cemento Asfáltico.

Dentro de la composición de la mezcla SMA el ligante asfáltico a ocupar es de vital importancia, es por esto que este debe ser un cemento asfáltico modificado de penetración, que cumpla la clasificación SUPERPAVE PG 76-22. Basándose en lo anterior, el ligante debe cumplir los siguientes requisitos.

Tabla 3-8: Especificaciones Ligante Asfaltico. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.

Ensaye	Requisito	Método
Penetración, 25°C, 100g, 5seg (0,1mm)	Informar	8.302.3 (LNV 34)
Punto de ablandamiento °C	Min. 65	8.302.16 (LNV 48)
Ductilidad, 5°C, 5cm/min (cm)	Min. 50	8.302.8 (LNV 35)
Ductilidad, 25°C, 5cm/min (cm)	Min. 80	8.302.8 (LNV 35)
Recuperación elástica, 13°C, 20cm, 1hr, (%)	Min. 60	8.302.19 (DIN 52013)
Recuperación elástica por torsión, 25°C, (%)	Min. 60	NLT 329
Índice de penetración	Min. +4	8.302.21
Índice de Frass, (°C)	Max. -18	8.302.17 (NLT182)
Punto de inflamación, (°C)	Min. 235	8.302.9 (LNV 36)
Intervalo de plasticidad, °C	Min. 83	--
Estabilidad de almacenamiento	Informar	ASTM D5892
Ensayo de separación, diferencia de viscosidad rotacional	Max. 15%	ASTM D5976 (NLT328)
Ensayo de microscopia	Informar	--

Además de cumplir con las exigencias anteriores el proveedor del ligante deberá presentar la siguiente documentación.

- Certificado de calidad con su respectivo diagrama de Heukelom.
- Temperatura óptima de mezclado °C.
- Temperatura óptima de compactación °C.
- Temperatura máxima de calentamiento °C.
- Condiciones de almacenamiento.
- Determinación de IP basándose en el valor de penetraciones a 25°C y el PA.
- Perfil de Viscosidad Rotacional (ASTM D 4402) a 135, 150, 170 y 190 °C, debe ser indicado (incluyendo aguja, rpm, % de torque y shear rate).

3.2.2. Emulsión asfáltica para riego de liga.

Este tipo de emulsión es de gran importancia para la adherencia en mezclas de bajo espesor como lo es la SMA, en este caso la emulsión a ocupar será de carácter modificado, que debe cumplir con lo estipulado en el manual de carreteras de la última versión MC 8.301.7. El ligante residual después de la aplicación del riego de liga debe satisfacer los valores que se muestran en siguiente tabla, la cual está en función del tipo de microaglomerado a emplear.

Tabla 3-9: Especificaciones Ligante residual para riego de liga. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.

Tipo de mezcla	Mínimo ligante asfáltico residual (gr/m2)
SMA	0,25

3.3. Fibras de celulosa.

Las fibras a utilizar para la mezcla SMA, deben poseer como principal característica la inhibición del escurrimiento de ligante asfáltico por su elevado porcentaje, además debe presentar características secundarias como, no ser nocivas para la salud ni el medio ambiente, no debe interactuar negativamente con los áridos y el asfalto. Estos deben ser suministrados en forma de pellets.

En el caso de esta mezcla, se utilizan fibras de celulosa de la marca Viatop, siendo específicamente el producto Viatop 66. Este producto está compuesto en su totalidad por 66% de ARBOCEL ZZ 8/1 y 34% de bitumen 50/70.

El compuesto ARBOCEL ZZ 8/1, es un aditivo de celulosa, pulverulento o hasta fibroso, destinado a los productos químicos de la construcción. Está formado por celulosas naturales e insolubles en agua. En el caso del bitumen 50/70 este es un ligante estándar de grado de penetración 50/70, lo cual es el estándar más común usado en caminos, superficies y aplicaciones industriales.

Basándose en la composición de los productos, la fibra de celulosa le confiere todas las características esenciales de inhibición de escurrimiento al bitumen e impermeabilidad a la mezcla.

3.4 Composición granulométrica de la mezcla SMA.

3.4.1 Granulometría.

La mezcla de áridos, tanto de los gruesos, finos y polvo mineral o filler, componen la granulometría de la mezcla asfáltica. La fracción del árido que atraviesa el tamiz ASTM N°4 (4,75mm) y es retenida en el tamiz ASTM N°8 (2,36mm) debe ser inferior al 8% del peso total de áridos. La banda granulométrica de la mezcla SMA es de carácter discontinua, ya que de esta forma se alcanzan las adecuadas macrotexturas que requiere la mezcla, además de la resistencia estructural que es una característica fundamental que posee la mezcla SMA. En relación con esto se ocupa la banda granulométrica TL Asphalt – StB 07 modificada, la cual tiene un origen Alemán, siendo la banda de trabajo con la que se trabaja la base de los diseños de mezclas de áridos. A continuación se indica la tabla que representa la banda granulométrica total de la mezcla.

Tabla 3-10: Banda granulométrica para confección de mezcla SMA. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.

Porcentaje que Pasa en Peso				
Tamiz		Mezcla	Banda Especificada	
mm	ASTM		TL Asphalt – StB 07 Modificada	
19	3/4"	100	100	100
12,5	1/2"	100	100	93
9,5	3/8"	83	83	70
4,75	N°4	34	43	33
2,36	N°8	24	32	22
0,6	N°30	16	24	16
0,3	N°50	13	20	13
0,15	N°100	12	17	11
0,075	N°200	10	13	9

3.4.2. Tolerancias Granulométricas.

Al definir la banda granulométrica para el correspondiente diseño, se necesitan tolerancias con las cuales poder trabajar y de esta manera generar las bandas de trabajo, según el diseño Marshall. A continuación se visualizan las tolerancias correspondientes a cada tamiz.

Tabla 3-11: Tolerancias granulométricas. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile.

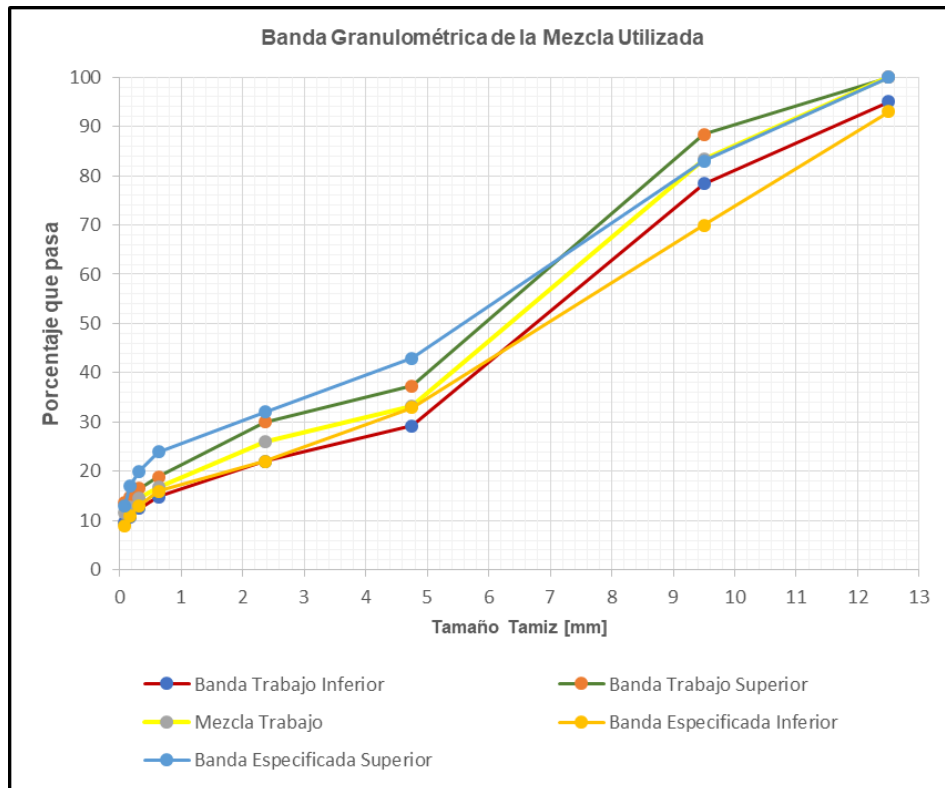
Tamices									
mm	12,5	9,5	8,0	4,75	2,36	0,63	0,315	0,16	0,08
ASTM	(1/2")	(3/8")	(5/16")	N°4	N°8	N°30	N°50	N°100	N°200
Tolerancia	±5 %			±4 %		±2 %			

3.4.3. Banda Granulométrica de la mezcla SMA.

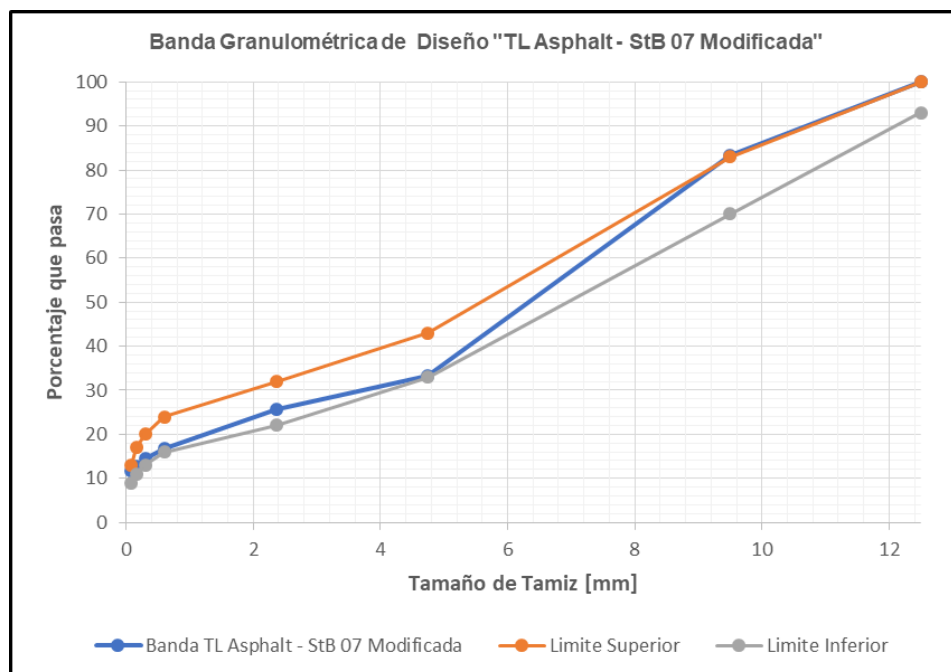
Con base en los puntos anteriores, se diseña una banda granulométrica que se compone tanto de áridos gruesos, finos y polvo mineral o filler. Estos constituyen la banda de diseño de mezcla, la cual se encuentra regulada bajo los parámetros de las tolerancias granulométricas y la banda de trabajo. A continuación se visualiza la banda de diseño de mezcla junto con las gráficas de las bandas.

Tabla 3-12: Banda Granulométrica mezcla SMA. Elaboración propia.

Tamices		Tolerancia	Banda especificada		Grava 3/8"	Grava 1/2"	Polvo roca	Filler	Mezcla	Banda de trabajo	
ASTM	mm		Límite inferior	Límite superior	0,17	0,5	0,25	0,08	Total	-	+
1/2"	12,5	±5 %	93	100	100	100	100	100	100	95	100
3/8"	9,5		70	83	99	67	100	100	83	78	88
N°4	4,75	±4 %	33	43	3	2	95	100	33	29	37
N°8	2,36		22	32	2	1	65	100	26	22	30
N°30	0,63	±2 %	16	24	1	1	32	100	17	15	19
N°50	0,315		13	20	1	1	23	100	14	12	16
N°100	0,16		11	17	1	1	16	100	13	11	15
N°200	0,08		9	13	1	1	12	98	11,6	10	14



Gráfica 3-5: Banda granulométrica mezcla SMA. Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.



Grafica 3-6: Banda granulométrica diseño "TL Asphalt –StB 07 Modificada". Elaboración Enrique Tabilo, Memorista.

3.5. Criterios de dosificación.

Al tener todos los áridos producidos y acopiados adecuadamente (al menos el 20% de los áridos del volumen total a emplear en obra), se debe realizar la dosificación correspondiente a la mezcla SMA. Esta dosificación se efectúa mediante el método 8.302.47 MC versión 2018. A continuación se muestran los parámetros de dosificación.

Tabla 3-13: Parámetros de dosificación. Fuente: Especificaciones técnicas Reparación de pavimentos, Vías Chile

Parámetro		Exigencia
Ensayo Marshall	Nº Golpes por cara	50
	Porcentajes de Vacíos en la mezcla (%)	2,0 - 4
	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)(%)	Min. 15
	Porcentaje Relación Betún-Vacíos (%)	Max. 83
Compactación Superpave		75 a 100 giros
Contenido mínimo de fibras de celulosa en peso respecto de los áridos (%)		0,3
Ecurrimiento máximo de ligante a temperatura de mezclado óptimo (%)		0,3
Porcentaje mínimo Cal hidratada en peso sobre mezcla recomendado		1
Porcentaje mínimo de ligante. (Total en masa sobre mezcla)(%)		6,8
Relación en peso Filler/Asfalto		1,3 a 1,7

Según los parámetros anteriores se lleva a cabo la mezcla SMA. A continuación se muestran los resultados que arrojó la realización de los diferentes ensayos, para los parámetros Marshall como SUPERPAVE. Estos resultados se obtienen mediante el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras (LEMCO, UTFSM) y el Centro de Desarrollo e Investigación (CDI, Bitumix). (Especificaciones Técnicas Reparación de Pavimentos, 2017)

Tabla 3-14: Resultados obtenidos de mezcla SMA. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.

	Referencia	Parámetros					Rangos
PG 76-22*	(% ref. ag.)	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	-
Viatop 66	(% ref. ag.)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,45 - 0,70
Asfalto Total	(% ref. ag.)	6,67	6,97	7,27	7,57	7,87	-
Fibras celulósicas	(% ref. ag.)	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	Mín. 0,3
Asfalto Total	(% ref. mezc.)	6,2	6,5	6,8	7	7,3	Mín. 6,5
Escurrimiento de ligante	Método Schellenberg (% r m)	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	Máx. 0,3
Razón Filler/Asfalto	1,71	1,64	1,57	1,51	1,45	1,3 - 1,7	1,3 - 1,7
DMM	(Kg/m3)	2.442	2.432	2.423	2.414	2.405	-
Densidad Marshall (G)	(Kg/m3)	2.319	2.321	2.325	2.323	2.319	50 golpes/cara
Huecos (D. Marshall)	(%)	5	4,6	4	3,8	3,6	2,0 - 4,0
Estabilidad	(N)	10.514	10.792	11.107	11.467	10.528	Mín. 9.000
V.A.M.	(%)	18,7	18,9	19	19,3	19,6	Mín. 15
Relación Betún-Vacíos (RBV)	(%)	74,3	76,8	79,7	81,2	82,5	Máx. 83
Módulo de Rigidez a 15°C	(MPa)	4.598	4.409	4.362	4.350	4.322	-
Densidad Superpave (a 75 giros)	(Kg/m3)	2.336	2.338	2.340	2.342	2.341	75 - 100 giros
Huecos (D. Superpave)	(%)	4,3	3,9	3,4	3	2,7	2,0 - 4,0
VCADRC varillado	AASHTO R-46 (%)	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	-
VCAMIX mezcla	AASHTO R-46 (%)	39,3	39,4	39,6	39,7	39,9	< VCADRC varillado

Además de los resultados anteriores, se informan valores como: densidad del ligante asfáltico y las temperaturas de mezclado como de compactación en laboratorio.

Densidad Ligante (Procedencia PROBISA) :1.027 gr/cm3

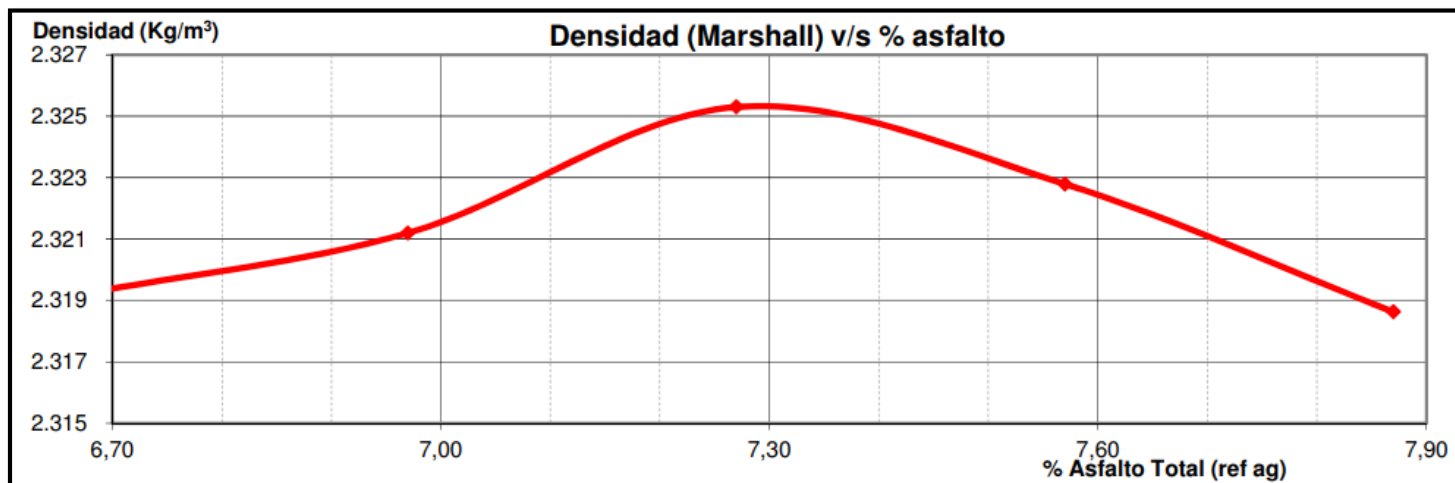
T ° de mezclado en laboratorio :185°C ± 3°C

T ° de compactación en laboratorio :173°C ± 3°C

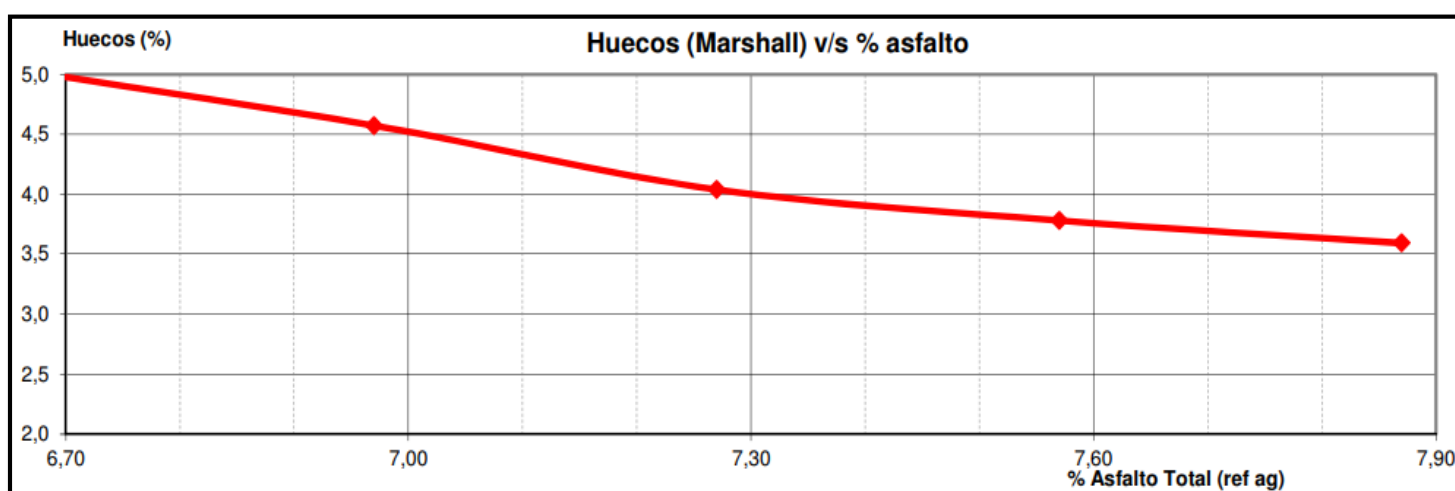
Por último se informa que según el Manual de Carreteras, en el volumen 5, específicamente en el capítulo 5.415, el óptimo de asfalto a usar será:

Optimo a usar = $7,27 \pm 0,3$

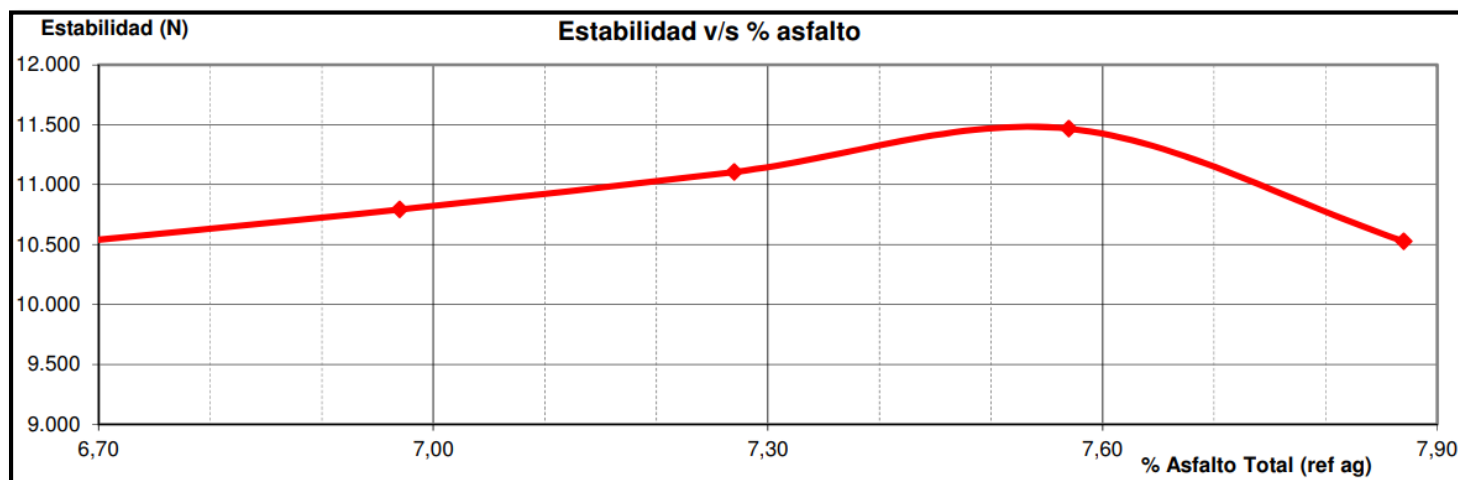
A continuación se muestran las gráficas correspondientes que se obtienen en el diseño de la mezcla SMA.



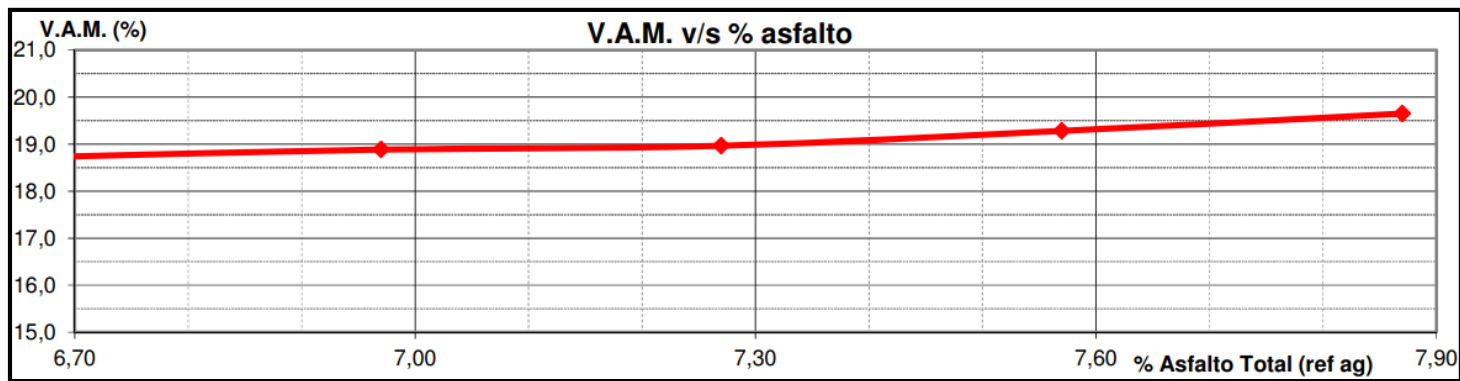
Grafica 3-7: Densidad (Marshall) vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.



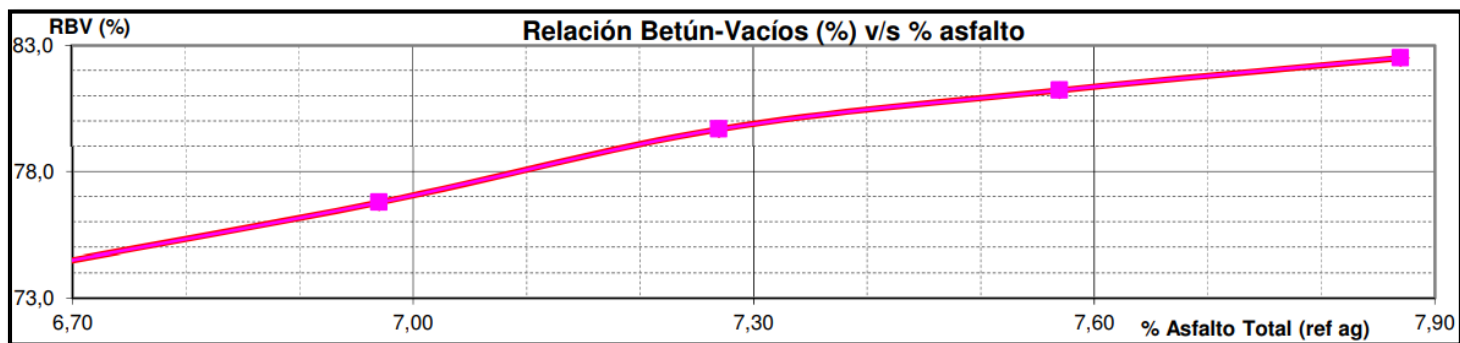
Grafica 3-8: Huecos (Marshall) vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.



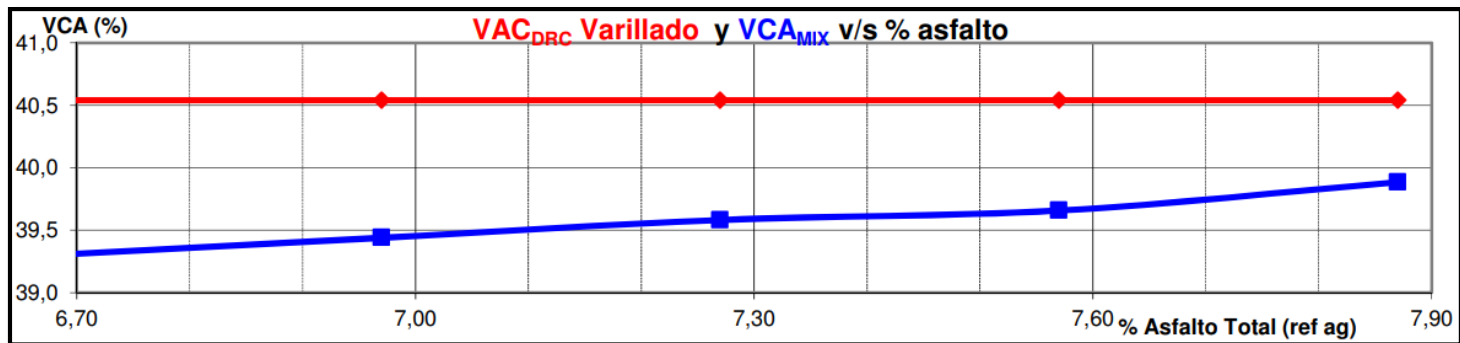
Grafica 3-9: Estabilidad vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.



Grafica 3-10: Relación V.A.M. vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A3410/19, CDI, Bitumix.



Grafica 3-11: Relación Betun-Vacios (%) vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A3410/19, CDI, Bitumix.



Grafica 3-12: VAC_{DRC} Varillado y VCA_{MIX} vs % Asfalto. Fuente: Informe "Certificado A 3410/19", CDI, Bitumix.

4. ENSAYO DE FATIGA.

La fatiga es un proceso en el cual la resistencia de un material disminuye cuando actúan cargas cíclicas o fluctuantes sobre él, de manera que transcurrido un tiempo o un número determinado de ciclos de actuación de carga, el material puede empezar a sufrir desgaste hasta llegar a la rotura. El número de ciclos necesarios para generar la rotura del material depende de diversos factores como temperatura, presencia de agua, calidad de la construcción, etc. La fatiga es uno de los desgastes más comunes que se producen en los pavimentos asfálticos, por esto es necesario realizar estudios que determinen la vida útil que tendrán las mezclas asfálticas colocadas.

4.1. Ensayo de Viga a Flexión en cuatro puntos.

Para poder medir el daño que genera la fatiga durante la vida útil del pavimento, se diseñan diferentes tipos de ensayos, los cuales tienen diferentes aplicaciones y maneras de medir la fatiga. De los diferentes ensayos que existen, en la presente memoria solo se analiza el ensayo de Viga en Flexión de cuatro puntos, que se basa enteramente en la normativa (AASHTO T321-17, 2017) (UNE-EN 12697, 2017) y en sus referencias. Esta consiste en la caracterización del comportamiento de mezclas asfálticas ante el fenómeno de fatiga. El ensayo se realiza sobre probetas de tamaño estándar ($380 \times 50 \times 63 \pm 6$ [mm]), hechas de la mezcla asfáltica en cuestión, estas se someten a cargas cíclicas que simulan el paso de los vehículos sobre el pavimento.

Durante la realización del ensayo, la carga, la deflexión y el desfase se miden en función del tiempo. Mediante estas mediciones se pueden determinar las diferentes características que el proceso de fatiga genera en la mezcla asfáltica. En función de estos parámetros obtenidos, se podrá precisar la vida útil de la mezcla, el cual se debe determinar de acuerdo al criterio de falla elegido. En el caso de la presente memoria, la deformación o desplazamiento impuesto se mantiene constante y el esfuerzo asociado disminuye en cada ciclo, registrándose la carga aplicada durante todo el ensayo. Se considera que las probetas fallan cuando el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica llega al 50% de la rigidez inicial.

En el caso de la respectiva memoria, el ensayo a fatiga se realiza para mezclas definitivas hechas en laboratorio. Todo el material correspondiente para realizar la mezcla lo entregó la empresa Bitumix (Áridos, Filler, Asfalto y Fibras). La mezcla será compactada, cortada, envejecida a corto plazo y ensayada en el LEMCO.

4.2. Tipos de fallo.

Lo que se busca al realizar el ensayo de fatiga, no es producir en forma brusca la falla total del material, sino que observar una progresión del deterioro, sin que llegue a producirse un daño total. Sobre la base de esto, al momento de realizar el ensayo, se debe establecer el tipo de falla, que puede darse de dos formas: a tensión controlada o deformación controlada. A continuación se describe cada una.

4.2.1. Deformación o desplazamiento controlado.

Bajo este caso, se debe mantener constante el desplazamiento o deformación, disminuyendo el esfuerzo asociado en cada ciclo. De esta manera se registra la

evolución de la carga durante el ensayo. Se considera que se produce fallo por fatiga cuando el módulo de rigidez del material llega al 50% de su valor inicial.

4.2.2. Tensión controlada.

Bajo este tipo de condición, se mantendrá constante el esfuerzo o la carga impuesta al material durante los ciclos de carga, de esta manera la deformación asociada se incrementa a medida que transcurren los ciclos. Se considera que se produce falla por fatiga cuando se genera la rotura de la probeta y la carga aplicada se hace cero.

4.3. Equipos de ensayos.

4.3.1. Equipo de Viga en Flexión en Cuatro Puntos.

Equipo servo-hidráulico controlado digitalmente, su propósito es poder ensayar vigas esbeltas conformadas de mezcla asfáltica. A continuación se nombran los componentes y las características de los aparatos que conforman el equipo.

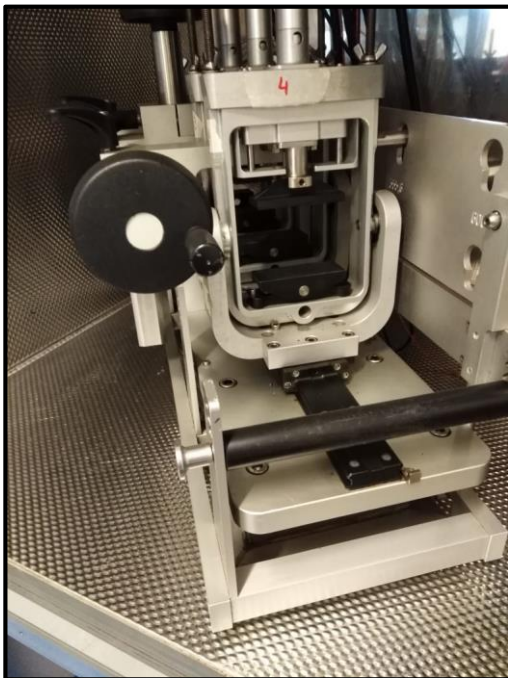


Figura 4-1: Equipo de viga en flexión en cuatro puntos, vista frontal. Elaboración propia.

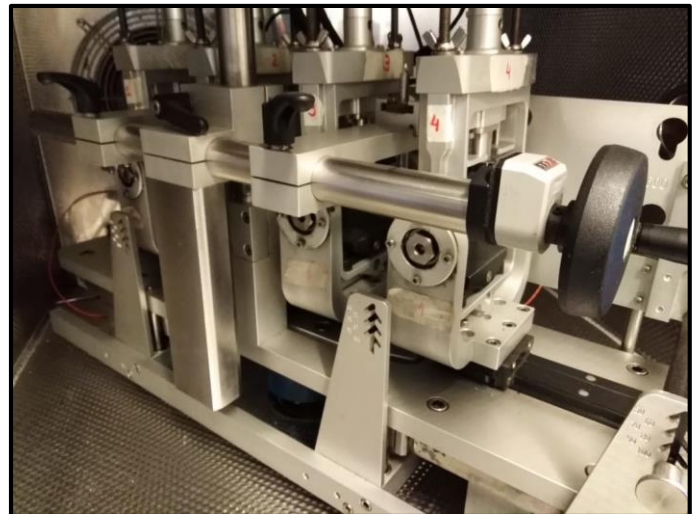


Figura 4-2: Equipo de viga en flexión en cuatro puntos, vista lateral. Elaboración propia.

4.3.1.1. Sistema de Prueba (Test System).

Este consiste en un dispositivo de carga, una cámara ambiental y un sistema de control y recopilación de datos. El sistema como mínimo debe poseer los siguientes requerimientos especificados.

Tabla 4-1: Requerimientos mínimos de sistema de pruebas. Fuente: norma AASHTO T321-17.

Requerimientos mínimos de sistema de prueba		
Medición de carga y control	Rango	0-5 KN
	Resolución	2N
	Precisión	5N
Medición de deformación y control	Rango	0-5 mm
	Resolución	2 μ m
	Precisión	5 μ m
Medición de frecuencia y control	Rango	5-10 Hz
	Resolución	0,005 Hz
	Precisión	0,01 Hz
Medición de temperatura y control	Rango	-10 a 25°C
	Resolución	0,25°C
	Precisión	$\pm$ 0,5°C

4.3.1.2. Dispositivo de carga.

Este dispositivo incluye un circuito controlado por computadora, el cual dispone componentes que durante cada ciclo de carga, en respuesta a los comandos de procesamiento de información y componentes de control, ajusten y apliquen una carga tal que las muestras experimenten un constante nivel de esfuerzos durante cada ciclo de carga. El dispositivo tendrá las siguientes capacidades:

- Proveer repetidamente cargas sinusoidales en un rango de frecuencia de 5-10 [Hz].
- Someter las muestras a flexión en 4 puntos con libre rotación y traslación horizontal a toda carga y puntos de reacción.
- Forzar a la muestra a volver a su posición original (deflexión nula) en el fin de cada pulso de carga.

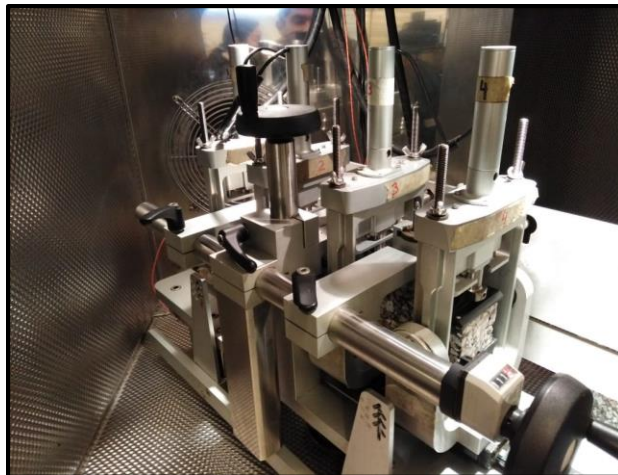


Figura 4-3: Dispositivo de carga, perteneciente al LEMCO. Elaboración Propia

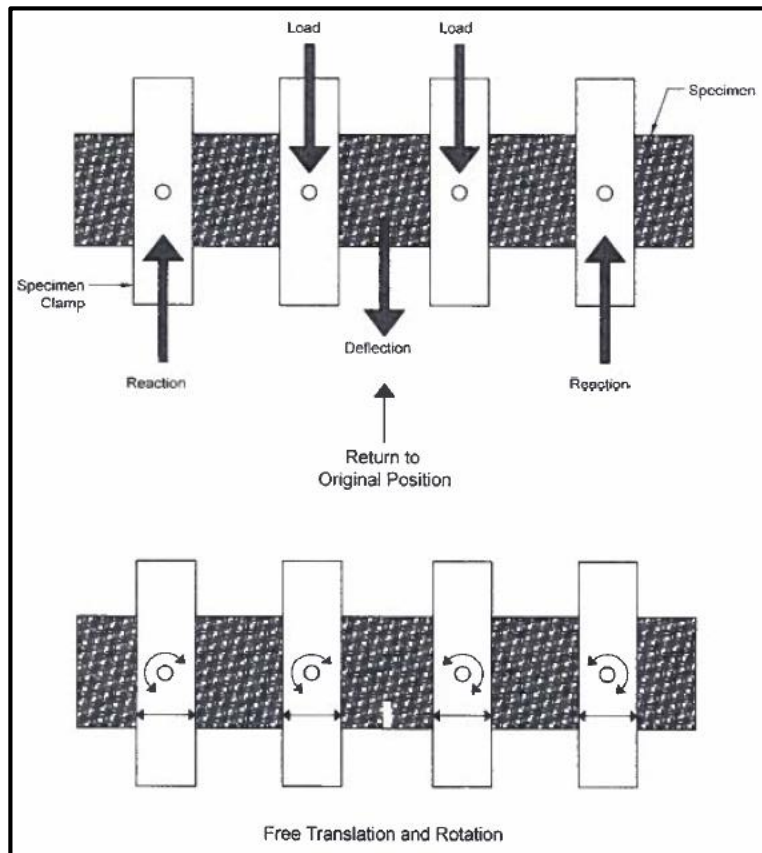


Figura 4-4: Características de carga y libertad del ensayo de fatiga. Fuente: Norma AASHTO T321-17

4.3.1.3. Cámara Ambiental.

Esta debe encerrar completamente la muestra y mantener la temperatura especificada para el ensaye ($\pm 5^{\circ}\text{C}$). Este tipo de cámaras no se requiere si la temperatura ambiental del lugar es constante, estando dentro de los límites especificados para la prueba.



Figura 4-5: Cámara ambiental. Elaboración propia

4.3.1.4. Sistema de control y recepción de datos

Durante cada ciclo de carga, el sistema de control y recepción de datos deberá ser capaz de medir la deflexión de la viga de muestra mediante el uso de LVDT (Linear Variable Differential Transducer), calculando la deformación de la muestra, y ajustando la carga aplicada por el dispositivo, tal que la muestra experimente un nivel constante de deformación en cada ciclo de carga. Adicionalmente, debe ser capaz de grabar cada ciclo de carga, cargas aplicadas, deflexiones de vigas, calcular y grabar los máximos esfuerzos de tensión, máximas deformaciones de tensión, ángulo de fase, rigidez, energía disipada y energía disipada acumulada en los intervalos de ciclos de cargas especificados por el usuario.

4.3.1.5. Compactador de rodillo.

El compactador de rodillo simula la compactación real que se realiza a la mezcla asfáltica al colocarse in-situ, por ende las condiciones de densidad, orientación de agregados y características estructurales son muy similares a las que debiese presentar un adecuado procedimiento de construcción. El equipo aplica una carga máxima de 30[KN], sobre un molde con mezcla asfáltica el cual posee dimensiones de 500x180x100[mm]. Este funciona a través de un controlador digital el cual está incorporado. A esta se le ingresa una rutina previamente programada con la correspondiente magnitud de carga, altura y ciclos requeridos.



Figura 4-6: Compactador de rodillo. Elaboración propia.

4.4. Confección de probetas asfálticas con la mezcla SMA.

4.4.1. Muestras mezcladas y compactadas en laboratorio.

La mezcla asfáltica se realiza completamente en condiciones especiales de laboratorio en las dependencias del laboratorio LEMCO. En este caso se preparan tres vigas iguales en concordancia con los estándares AASHTO R 66 y T 2 netamente para el asfalto y agregados respectivamente, y las normas PP 3 o T 247 dependiendo del

método de compactación que se ocupa, en el caso de la presente memoria se utiliza la norma PP3. A continuación se añaden recomendaciones acerca de este proceso.

- Normalmente las muestras de prueba son compactadas usando esfuerzos estándar de compactación. Sin embargo, el esfuerzo estándar de compactación no reproduce los vacíos de aire de las muestras de calzadas medidos de acuerdo a la normativa AASHTO T 269. Si las muestras son compactadas con un porcentaje objetivo de vacíos de aire, los esfuerzos de compactación para ser usados deberán ser determinados experimentalmente.
- Este estándar es adecuado para pruebas de mezclas asfálticas con tamaños nominales de 19[mm] o más pequeños. Se debe tener cuidado cuando se interpreten los resultados obtenidos de muestras que no cumplen con este requerimiento.

4.4.2. Dimensiones.

Se debe cortar al menos 6[mm] de ambos lados de cada muestra de prueba, lo cual provee superficies paralelas para eliminar grandes secciones de vacíos de aire en la superficie de las muestras. El dispositivo de carga, al requerir que se adhiera una tuerca para medir las deformaciones, necesita que las superficies cortadas provean suaves superficies para montar los medidores. Las dimensiones finales requeridas, después de ser cortadas son: 380 ± 6 [mm] largo, 50 ± 6 [mm] alto y 63 ± 6 [mm] ancho.

4.4.3. Procedimiento de confección de probetas.

Este proceso es fundamental ya que sin él no se podrá tener las muestras a caracterizar y por ende no se podrá realizar el ensayo de fatiga. Las probetas que se fabrican son especiales, porque deben ser constituidas a partir de la mezcla asfáltica bajo ciertos parámetros, condiciones y dimensiones como se mencionó previamente.

4.4.3.1. Cálculo de la dosificación del material.

El primer paso de la confección de probetas es poder determinar la cantidad adecuada de masa para compactar, la cual debe adecuarse a las dimensiones que se requiere y al molde a ocupar. Para esto se deben realizar cálculos, basándose en los porcentajes de áridos, filler, asfalto y fibras que se determinan previamente. Estos cálculos se realizan en una planilla Excel. En relación con esto, los datos se deben asociar a otros mediante “links”, de esta manera y agrupando todas las fórmulas mediante una secuencia correspondiente, se podrá sólo en función de la variación del valor de la masa inicial (masa de áridos y fibras) determinar las masas correspondientes bajo la respectiva proporción tanto para áridos, fibras y asfalto. Todo se explica con detalle en los siguientes pasos.

1. Se debe saber el porcentaje de asfalto óptimo ($P_{b\text{ Optimo}}$), este se obtiene de las especificaciones técnicas entregadas por Bitumix. También se debe conocer el valor de la masa inicial (masa áridos más fibras, M_{inicial}) a ocupar, este dato se obtiene a partir de otros valores de ensayos de fatiga previamente realizados, de esta forma se puede obtener un valor estimativo de la masa, para que no falte o sobre material y para que esta se acomode bien al molde. Con estos dos valores se puede calcular la masa de la

mezcla sin la fibra (M_{mezcla}). A continuación se visualiza la fórmula para calcular la masa de la mezcla sin la fibra.

$$M_{mezcla} = M_{inicial} * \left(1 + \frac{P_{b\ Optimo}}{100}\right)$$

Ecuación 4-1: Masa inicial de la mezcla sin fibra.

2. Al calcular la masa de la mezcla sin la fibra, a esta se le deben agregar dos factores de corrección que se denominan F_{C1} y F_{C2} . Con respecto a F_{C1} , este factor se aplica debido a que al momento de hacer la mezcla, se estima que se pierden alrededor de 20[g], ya sea revolviendo o vertiendo el material al molde, este valor es netamente estimativo ya que al hacer mezclas de pruebas, en todo este proceso se compararon las pérdidas de material y estas promediaban 20[g]. El segundo factor F_{C2} se calcula en función del valor obtenido en F_{C1} y este se determina como el cociente entre F_{C1} y un porcentaje estimativo de pérdidas de 2%, este valor se obtiene en relación con la experiencia de los laboratoristas al realizar la mezcla SMA. A continuación se visualizan las fórmulas de cada uno de los factores.

$$F_{C1} = M_{mezcla} - 20[g]$$

Ecuación 4-2: Factor de corrección uno.

$$F_{C2} = \frac{F_{C1}}{0,98}$$

Ecuación 4-3: Factor de corrección dos.

3. Al calcular el valor del factor de corrección dos (F_{C2}), se puede calcular la densidad geométrica de la mezcla (G) en cuestión, para esto se debe tener el valor del volumen de la probeta, el cual tendrá las mismas dimensiones de largo y ancho que el molde, pero el valor de la altura de esta se ajusta según lo que se requiera, en el caso de esta mezcla el valor de la altura de la probeta queda en 90 [mm], por ende las dimensiones de la probeta serán de 500x180x90 [mm], el volumen (V_p) debe ser expresado en m^3 , por lo que el valor de este será de 0,0081 [m^3]. De la misma manera el valor de la masa y el valor del factor de corrección dos (F_{C2}), debe estar expresado en Kg, dejando de esta manera el valor de densidad con unidad de Kg/m^3 . A continuación se visualiza la fórmula de la densidad de la mezcla.

$$G = \frac{F_{C1}}{V_p}$$

Ecuación 4-4: Densidad de la mezcla.

4. Al obtener el valor de la densidad de la mezcla (G), y mediante el valor previamente calculado de la densidad máxima de la mezcla (D_{mm}), se puede determinar el valor del porcentaje de vacíos (V_a) correspondiente, a continuación se muestra la fórmula para el cálculo de esta.

$$V_a = 100 * \left(1 - \frac{G}{D_{mm}}\right)$$

Ecuación 4-5: Porcentaje de vacíos.

5. Al determinar el valor de los vacíos dentro de los rangos de las especificaciones técnicas, y al insertarlo en la configuración de fórmulas previamente hechas, arroja un valor denominado Mezcla de Áridos que es la masa inicial total de los áridos, este valor se calcula como el cociente entre el valor de la masa inicial y el porcentaje de fibras a utilizar (0,5% de fibras referido al agregado). Basándose en este valor se determina la masa de cada árido según las proporciones especificadas previamente.

6. Al poseer el valor de la masa de la mezcla de áridos y mediante los porcentajes de asfalto y fibra, es que se pueden determinar las masas totales de asfalto y fibra que se ocupan, en este caso sería 7,2 % de asfalto referido a la masa total de áridos y un 0,5% de fibras con respecto a la masa total de áridos.

4.4.4. Confección de probetas.

4.4.4.1. Procedimiento previo.

1. Al poseer las dosificaciones tanto de áridos, ligante asfáltico y fibras, se puede planear la logística de la fabricación de las probetas. Para realizar la planificación, se debe verificar los elementos y equipos que se dispone. En este caso el laboratorio LEMCO, cuenta con todas las herramientas, equipos y elementos necesarios para la realización de este tipo de ensayos. Para este ensayo y en vista que se disponen de tres hornos y dos moldes, se decide que se deben hacer dos compactaciones por día. Para realizar esta labor se debe planificar y programar de una manera precisa para que no haya interrupciones y para que los procesos de ambas compactaciones no interfieran entre sí. Todo este proceso se realiza gracias a la ayuda de personal del laboratorio y al constante ensayo y error que se hizo al fabricar mezclas antiguas.

2. Antes de realizar la dosificación de áridos, a estos se les debe reducir la humedad que posean, por esto se secan una vez tamizados a 110°C durante 24 horas. Después de este proceso, se espera que el material adquiera temperatura ambiente para poder pesarlo y mezclarlo.

3. Debido a que los materiales los facilitó la empresa Bitumix, esta empleó recipientes con capacidad de un galón para transportar el ligante. Según esto, debido a su capacidad y tamaño, se decidió trasvasiar el ligante a dos tarros más pequeños con capacidad de un cuarto de galón, ya que de esta manera se tiene el suficiente asfalto para realizar la mezcla. Para efectuar esta operación se debe calentar el galón de asfalto durante 4 horas a una temperatura de 150°C, de esta manera adquiere una consistencia más líquida y pueda traspasarse más fácilmente.

4. En función del ensayo y error en la confección de probetas, se decide que la mezcla de una probeta se hará en tres pailas, las razones de esto son la mejora en la manipulación de la mezcla, debido al menor peso que se debe manipular y a que la revuelta de materiales será más fácil debido a la consistencia que va adquiriendo la

mezcla. Por lo anterior se confeccionan tres pailas con la correspondiente mezcla de áridos, por ende cada una tendrá el correspondiente peso total de áridos dividido en tres.

4.4.4.2. Procedimiento de confección de probetas.

1. Para proceder a reunir los áridos con el ligante, los áridos deben acondicionarse a 200°C con 12 horas de anticipación (noche anterior) al día de la compactación en el horno y el ligante debe colocarse a primera hora en la mañana del día de la compactación durante 2 horas antes de que se realice la primera mezcla. La temperatura de mezclado será de $173 \pm 5^{\circ}\text{C}$, se utilizará la temperatura de 178°C debido a que la mezcla se enfría rápidamente, por ende para estar siempre dentro del rango de temperatura se ocupa siempre la temperatura más alta.

2. Al transcurrir las 2 horas desde que se coloca el ligante en el horno, se puede realizar la mezcla de áridos y asfalto, este procedimiento se realiza de forma manual. Para lograr una buena mezcla, esta se realiza sobre una cama de arena puesta en un bol que está sobre un fogón, se hará de esta manera para evitar posibles pérdidas de temperatura en el proceso. Además de esto se procura que el proceso de mezclado dure como máximo 5-7 minutos. A continuación se enumeran los pasos para realizar este procedimiento.

a) Tener a mano las siguientes herramientas:

- Gancho.
- Balanza.
- Superficie de madera.
- Espátulas.
- Poruñas.
- Elemento mezclador.

b) Calentar la cama de arena aproximadamente 1 hora antes de iniciar la mezcla, 5 minutos antes de mezclar calentar poruña y espátula.

c) Colocar la balanza con la superficie que la proteja ante posible suciedad provocada por la mezcla.

d) Listo todo lo anterior, se inicia la mezcla, por lo que se saca la paila con los áridos del horno, se ponen en la balanza, se pesan y se tara.

e) Se saca el asfalto, se coloca en el gancho para evitar quemaduras para que así sea más manejable, luego se hace una especie de cráter en el medio de los áridos y se vierte el ligante hasta alcanzar el peso determinado de este por los cálculos.

f) Luego se vierte el Viatop 66 el cual esta previamente pesado y almacenado en cápsulas.

g) Posteriormente se coloca la paila con la mezcla en la cama de arena y se comienza a revolver con la poruña lo más rápido posible y de forma circular. La idea es que todo

el asfalto cubra los áridos y que el Viatop se derrita y mezcle en su totalidad. A continuación se muestran dos imágenes del proceso.



Figura 4-7: Mezclado de materiales que conforman mezcla SMA. Elaboración Propia.



Figura 4-8: incorporación de ligante en áridos. Elaboración propia.

h) De esta manera al estar bien mezclado, y al haber transcurrido los 5-7 minutos se sitúa nuevamente el bol en el horno durante 4 horas a una temperatura de 135°C , para luego colocarla por media hora más hasta que llegue a la temperatura de compactación ($164\pm 5^{\circ}\text{C}$), a fin de lograr esto, se hicieron pruebas con otras mezclas y para que la mezcla llegue a esta temperatura en media hora se debe elevar el marcador del horno a 210°C .

3. Al estar la mezcla en el horno, se debe tomar el tiempo y cada una hora revolver la mezcla de cada paila aproximadamente un minuto evitando en lo máximo posible la pérdida de temperatura.

4. Al transcurrir las 4 horas, más la media hora se saca la mezcla a la temperatura de compactación, la paila con la mezcla se saca del horno y se vierte en el molde correspondiente al compactador de rodillo, a continuación se describe paso a paso el procedimiento que abarca desde el vertimiento de la mezcla en el molde hasta la realización del ensayo.

a) Se debe tener los moldes dentro del horno a una temperatura superior a la de compactación, de esta forma no hay tantas pérdidas de calor en la mezcla.

b) Se debe colocar desmoldante a la superficie que emula al rodillo en el equipo.

c) Fijarse visualmente que el molde esté bien compacto y que ninguno de los pernos que lo componen este suelto.

d) Se debe contar con todos los implementos necesarios para el proceso, a continuación se nombra cada uno:

- Desmoldante y brocha.
- Papel de diario.
- Perno que une molde y compactador.
- Espátula.
- Diluyente.
- Llave Allen 4 y 5.
- Llave francesa.
- Guantes para temperatura y mascarilla.

e) Sacar el molde del horno y depositar en una superficie horizontal y lo más cercana posible al compactador de rodillo, a esta se le coloca desmoldante por toda la superficie de contacto con la mezcla.

f) Luego se saca la mezcla del horno, primero se vierte la mezcla de la paila que está en la parte superior del horno, luego se vierte la paila de la parte del medio del horno y por último se vacía la paila de la parte inferior del horno. Al verter las tres pailas con material, se debe procurar esparcir lo más homogéneamente y horizontal el material en el molde, la idea es poder hacer 3 capas con las 3 pailas. Todo este proceso debe realizarse lo más rápido posible para evitar pérdidas de temperatura.

g) Al estar puesto el material en el molde, se le coloca papel de diario impregnado con desmoldante en la parte superior para que la pata del rodillo no se pegue con el material.

h) Se coloca el molde dentro del compactador de rodillo ajustándolo lo más rápido posible, colocándole finalmente el perno que sostiene el molde el cual le confiere inmovilidad ante el paso del rodillo.

i) Se debe abrir la llave de paso del aire comprimido, para la ejecución del ensayo ya que el equipo necesita de ésta para funcionar. El aire comprimido debe tener una presión de 7 [bar].

j) Al estar listo el aire comprimido, se enciende el equipo, éste se programa según las especificaciones que se le quiere dar y se compacta la mezcla.

k) Al terminar la compactación se apaga el equipo y se cierra la llave de paso del aire comprimido.

l) Se retira el perno de sujeción y se saca el molde del compactador de rodillo. Se harán 3 pasadas de rodillo por lado, esto se definió así en función de pruebas realizadas anteriormente y se determinó que la probeta queda mejor compactada de esta manera.

m) Al estar completamente compactada la probeta, ésta se deja enfriar a temperatura ambiente durante 24 horas y posteriormente se desmolda.

4.4.5. Corte de probetas.

El procedimiento de corte no posee una secuencia especificada, por ende el orden en que se haga depende de la persona que realice esta operación, basándose en esto se realiza una planificación de corte que facilite esta operación y disminuya los errores. Para esto se utilizan probetas antiguas desechadas de memorias anteriores y se diseña una manera de cortar la probeta de la manera más conveniente, además de mejorar el pulso al momento de cortar.

La idea es poder cortar la probeta mayor en dos vigas pequeñas que posean una dimensión de $380 \times 50 \times 63 \pm 6$ [mm] las cuales serán utilizadas en el ensayo de fatiga. Las dimensiones son especificadas por la normativa (AASHTO T321-17), determinando de esta manera su largo, ancho y espesor según el promedio de tres mediciones para cada dimensión. La diferencia entre los valores máximos y mínimos del ancho y espesor no debe exceder de 1 [mm], en el caso del largo no deberá exceder 2 [mm].

Este proceso es muy peligroso al igual que la compactación, por esto se deben tomar todas las medidas de seguridad necesaria para realizarlo.

A continuación se da un orden secuencial para realizar el corte de las vigas para el ensayo de fatiga.

1. Se toma la probeta mayor, mediante masking tape, plumón y regla, se mide y marca perpendicularmente al largo desde un extremo a 110 [mm] y desde el otro extremo a 10 [mm], de esta manera se podrá generar el largo de la viga que es de 380 [mm].
2. Luego se marca el centro de la probeta mayor en el ancho de esta, la idea es poder generar una línea que divida los 180 [mm] a una distancia de 90 [mm].
3. Al tener marcada la línea de centro, a partir de esta se marca otra línea, pero a 50 [mm] de esta hacia el costado, esto se hará hacia los dos lados.
4. Al marcar las líneas que se mencionan anteriormente, se lleva la probeta a las dependencias del LEMCO donde se encuentra el equipo de corte. Después de la correspondiente instalación del equipo y de la utilización de los elementos de protección personal, se procede a colocar en posición la probeta para realizar los cortes sobre las líneas marcadas. El primer corte se hace en la línea perpendicular al largo hecho a 110 [mm] y 10 [mm]. Luego se corta la línea marcada al centro de la probeta a lo largo. Por último se cortan las dos líneas al costado a 50 [mm] del centro.
5. Al cortar la probeta mayor, esta se dividió en dos vigas más pequeñas las cuales tienen dimensiones de $380 \times 50 \times 90$ [mm], por ende falta dimensionar el espesor el cual debe ser de 63 [mm], este se marca perpendicular al espesor con dos líneas, una se marca a 10 [mm] desde un extremo y 17 [mm] desde el otro.
6. Al tener marcado las dimensiones anteriores, se procede a cortar, quedando la viga con la correspondiente dimensión de $380 \times 50 \times 63 \pm 6$ [mm]. El más menos 6 [mm] lo menciona la norma, esto ayuda bastante debido a la complejidad del corte.
7. Al tener la viga bajo las dimensiones correspondientes, se procede a identificarla. Esta identificación corresponde a una "P" de probeta y un número que indica a qué probeta

pertenece, ya que dos vigas con número consecutivo corresponden a una misma probeta. Luego de su identificación se procede a verificar sus dimensiones las cuales se realizan con pie de metro para ancho y espesor, y regla para largo. La dimensión se determina con el promedio de tres mediciones.

A continuación se muestran algunas imágenes del proceso de corte.



Figura 4-9: Cara recientemente cortada.
Elaboración Propia.



Figura 4-10: Viga siendo cortada. Elaboración Propia.

4.4.6. Determinación de densidad de la mezcla compactada.

El procedimiento de ensayo de densidad se realiza en función de lo dictado por el Manual de Carreteras en el punto 8.302.38, ocupando específicamente el método B; Probetas con Superficie Saturada Seca. No se ocupa el método C debido a sé que aplica sólo a porcentajes de huecos superior a 15% o superior. El Método B indica una fórmula, donde se calcula el porcentaje de agua absorbida A_{ab} y si es mayor a dos, se emplea el método A, en este caso siempre este valor da menos que dos, por lo que se ocupa sólo el método B. Una vez dimensionadas las vigas, se le debe determinar la densidad a cada una por separado. Debido a que se prueba el método de calcular la densidad a una muestra pequeña de la probeta, este no resulta debido a que al compararse con las densidades de las dos vigas, los valores de todas estas eran distintas, por ende se decide que lo mejor es determinar las densidades a cada viga por separado, de esta manera se obtienen las densidades con mayor precisión.

Basándose en lo anterior, las vigas se deben dejar secar a masa constante, luego de este proceso, se debe determinar la masa de la viga bajo tres condiciones; seca, sumergida y superficialmente seca, de esta manera y mediante fórmulas que indica la norma se puede calcular la densidad y el porcentaje de agua absorbida. A continuación se describe el procedimiento de ensaye.

1. Secar la probeta a masa constante, que consiste en dejar en el horno las vigas a $50 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 12 horas. Después se deja enfriar a temperatura ambiente a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 2 horas, luego se registra la masa seca como A.

2. Se sumerge la viga en un baño de agua a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ por 3 a 5 minutos, luego se registra la masa sumergida denominada como C.
3. Se saca la viga del agua y se seca con una toalla húmeda, registrándose el peso de la viga como superficialmente seca denominándose B.
4. Se determina el porcentaje de agua absorbida con la siguiente expresión.

$$A_{ab} = \frac{B - A}{B - C} * 100$$

Ecuación 4-6: Porcentaje de agua absorbida.

Observación: Si A_{ab} es mayor que dos, se debe emplear el método A

5. Se calcula la densidad de acuerdo a la fórmula.

$$G = \frac{A}{\frac{B - C}{\rho_w}} * 1000 (\text{Kg}/\text{m}^3)$$

Ecuación 4-7: Densidad de acuerdo al MC 8.302.38, método B.

Donde:

- A: Masa de la probeta en aire [g].
- B: Masa de la probeta en aire con superficie seca [g].
- C: Masa de la probeta en agua [g].
- ρ_w : Densidad del agua.

4.4.6.1. Determinación de vacíos en la mezcla.

Al determinar la correspondiente densidad de cada viga asociada a cada probeta, se pueden calcular los porcentajes de vacíos, mediante la fórmula que plantea el Manual de Carreteras en el punto 8.302.47. Este valor es de suma importancia ya que la realización del ensayo depende de que el porcentaje de vacíos se encuentre en el rango correspondiente, si por alguna razón este valor no entra en el rango, la viga no podrá ser ensayada. A continuación se describe la fórmula del porcentaje de vacíos.

$$V_a = 100 * \left(1 - \frac{G}{D_{mm}} \right)$$

Ecuación 4-8: Porcentaje de huecos de aire en la mezcla.

Donde:

- D_{mm} : Densidad máxima de la mezcla (Kg/m^3).
- G: Densidad de la mezcla compactada.

A continuación se visualizan 6 tablas que contienen los resultados obtenidos de los cálculos de la densidad real de la mezcla y los porcentajes de vacíos de aire que se obtuvo. Estas se distribuyen según su correspondiente molde y probeta.

Tabla 4-2: Resultados Molde 1 (Densidad-%Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.

Densidad - %Vacíos Molde 1		
Probetas	P1	P2
Peso seco (A) [g]	2.820	2.931
Peso Sup. Sat. Seca (B) [g]	2.822	2.934
Peso bajo agua (C) [g]	1.616	1.686
Densidad real de la mezcla (G) [Kg/m3]	2,331	2,342
Densidad máxima de la mezcla (Dmm) [Kg/m3]	2,411	2,411
Vacíos de aire [%]	3,3	2,9

Tabla 4-3: Resultados Molde 2 (Densidad-%Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.

Densidad - %Vacíos Molde 2		
Probetas	P3	P4
Peso seco (A) [g]	3.053	3.083
Peso Sup. Sat. Seca (B) [g]	3.055	3.085
Peso bajo agua (C) [g]	1.766	1.784
Densidad real de la mezcla (G) [Kg/m3]	2,361	2,363
Densidad máxima de la mezcla (Dmm) [Kg/m3]	2,411	2,411
Vacíos de aire [%]	2,1	2,0

Tabla 4-4: Resultados Molde 3(Densidad-%Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.

Densidad - %Vacíos Molde 3		
Probetas	P5	P6
Peso seco (A) [g]	3.031	2.944
Peso Sup. Sat. Seca (B) [g]	3.033	2.946
Peso bajo agua (C) [g]	1.749	1.703
Densidad real de la mezcla (G) [Kg/m3]	2,354	2,361
Densidad máxima de la mezcla (Dmm) [Kg/m3]	2,411	2,411
Vacíos de aire [%]	2,4	2,1

Tabla 4-5: Resultados Molde 4 (Densidad-%Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia.

Densidad - %Vacíos Molde 4		
Probetas	P7	P8
Peso seco (A) [g]	2.885	2.951
Peso Sup. Sat. Seca (B) [g]	2.887	2.953
Peso bajo agua (C) [g]	1.659	1.696
Densidad real de la mezcla (G) [Kg/m3]	2,342	2,341
Densidad máxima de la mezcla (Dmm) [Kg/m3]	2,411	2,411
Vacíos de aire [%]	2,8	2,9

Tabla 4-6: Resultados Molde 5 (Densidad - %Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia

Densidad - %Vacíos Molde 5		
Probetas	P9	P10
Peso seco (A) [g]	2.954	2.933
Peso Sup. Sat. Seca (B) [g]	2.957	2.935
Peso bajo agua (C) [g]	1.705	1.692
Densidad real de la mezcla (G) [Kg/m3]	2,352	2,353
Densidad máxima de la mezcla (Dmm) [Kg/m3]	2,411	2,411
Vacíos de aire [%]	2,4	2,4

Tabla 4-7: Resultados Molde 6 (Densidad - %Vacíos) de compactación de rodillo. Fuente: Elaboración propia

Densidad - %Vacíos Molde 6		
Probetas	P11	P12
Peso seco (A) [g]	3.079	3.023
Peso Sup. Sat. Seca (B) [g]	3.081	3.026
Peso bajo agua (C) [g]	1.780	1.742
Densidad real de la mezcla (G) [Kg/m ³]	2,360	2,347
Densidad máxima de la mezcla (Dmm) [Kg/m ³]	2,411	2,411
Vacíos de aire [%]	2,1	2,6

4.5. Condiciones de Ensayo.

El ensayo de fatiga se realiza aplicando cuatro niveles de deformación distintos (250, 400, 500 y 750 [µε]), por cada deformación se ensayan tres probetas, teniendo un total de doce ensayos. Cada uno de los ensayos se hace bajo los siguientes parámetros previamente definidos.

Modalidad de ensayo	:Deformación controlada
Carga aplicada	:Sinusoidal
Puntos de aplicación de carga	:Ensayo de flexión en cuatro puntos
Criterio de falla	:Rigidez alcanza el 50% de valor original
Frecuencia de ensayo	:10 [Hz]
Temperatura de ensayo	:20 ± 0.5[°C]

La normativa AASHTO T 321-17, establece diferentes tipos de relaciones que se obtienen según los datos de ciclos por carga. A continuación se mencionan las relaciones que arroja el ensayo.

1. Deformación máxima de tracción [m/m].

$$\varepsilon_t = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4a^2}$$

Ecuación 4-9: Deformación máxima de tracción.

Donde:

- δ: Deflexión máxima al centro de la viga [m].
- a: Espacio entre abrazaderas internas (0,375/3 [m] = 0,119 [m]).
- L: Longitud de la viga entre abrazaderas externas (0,357 [m]).

2. Angulo de fase [°].

$$\varphi = 360fs$$

Ecuación 4-10: Angulo de fase.

Donde:

- f: Frecuencia [Hz].
- s: Tiempo transcurrido entre P_{max} y δ_{max} , [s].

3. Esfuerzo máximo de tracción [Pa].

$$\sigma_t = \frac{0,357P}{bh^2}$$

Ecuación 4-11: Esfuerzo máximo de tracción.

Donde:

- P: Carga aplicada [N].
- b: Ancho promedio de la probeta [m].
- h: Altura promedio de la probeta [m].

4. Rigidez Flexural [Pa].

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t}$$

Ecuación 4-12: Rigidez flexural.

Donde:

- σ_t : Esfuerzo máximo de tracción [Pa].
- ε_t : Deformación máxima de tracción [m/m].

5. Energía disipada por ciclo [J/m³].

$$D = \pi\sigma_t\varepsilon_t\sin(\varphi)$$

Ecuación 4-13: Energía disipada por ciclo.

Donde:

- σ_t : Esfuerzo máximo de tracción [Pa].
- ε_t : Deformación máxima de tracción [m/m].
- φ : Angulo de fase [°].

6. Energía disipada acumulada [J/m³].

$$\sum_{i=1}^{i=n} D_i$$

Ecuación 4-14: Energía disipada acumulada.

Donde:

- D_i : Energía disipada en el ciclo de carga i .

4.5. Enfoque del comportamiento de fatiga en una mezcla.

Dentro de la caracterización del comportamiento de fatiga se tienen diferentes enfoques como: Fenomenológico, Mecánica del daño continuo, Mecánica de fractura y por ultimo de Energía disipada. De todos los anteriores enfoques mencionados, se analiza sólo el enfoque fenomenológico, el cual es uno de los métodos más utilizados en el mundo. Este entrega una relación empírica que se basa en ensayos de laboratorio y calibraciones, esta relación no es derivada del análisis mecánico de pavimentos.

Este enfoque enlaza la deformación o esfuerzo que se produce en el pavimento con la cantidad de repeticiones de carga que causa la falla, por ende este modelo combina lo observado con los datos que entrega el ensayo.

El enfoque fenomenológico junto con la ley de Milner, se centran en la acumulación de daño en el diseño convencional de pavimentos y en el estudio de los desempeños de mezclas asfálticas.

Los resultados que arroja el ensayo de fatiga, dependen del modo de carga, por ende se pueden obtener dos tipos de resultados diferentes dependiendo de si el ensayo es a deformación controlada o a esfuerzo controlado. Esto varía el tipo de fórmula que se ocupa dependiendo de lo que se busque, a continuación se visualizan las dos fórmulas que dependen del modelo fenomenológico.

1. Ecuación para ensayo a deformación controlada.

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2}$$

Ecuación 4-15: Ecuación ensayo a deformación controlada.

2. Ecuación para ensayo a esfuerzo controlado.

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{k_2}$$

Ecuación 4-16: Ecuación ensayo a esfuerzo controlado.

Donde:

- N_f : Ciclos de carga a la falla.
- ε_t : Deformación por tracción en la parte inferior de la probeta.
- σ_t : Aplicación de esfuerzo de tracción.
- k_1 y k_2 : Coeficientes determinados experimentalmente.

Los coeficientes k_1 y k_2 son valores que se determinan al realizar una regresión potencial en escala logarítmica de los datos obtenidos del ensayo de fatiga.

El modelo fenomenológico, independiente si trata acerca de deformación o esfuerzo controlado, no considera otras variables como frecuencia de carga, módulo de la mezcla asfáltica o temperatura en sus cálculos.

5. RESULTADOS.

La presente memoria, tiene como objetivo realizar el ensayo de fatiga a una mezcla SMA, la cual forma parte de los trabajos para la reparación, rehabilitación y mantenimiento de pavimentos que se ejecutarán en un periodo de 2 años para el grupo de Autopistas Urbanas e Interurbanas que el Grupo Abertis a través de Vías Chile controla en el país. Los resultados del ensayo de fatiga en esta mezcla se comparan con los obtenidos en memorias anteriores tituladas como: “Estudio de comportamiento a fatiga de mezclas SMA de Autopista central y Autopista del Maipo” de Vanessa Lobos y “Resistencia a fatiga de mezcla SUPERPAVE envejecida a corto plazo” de Andrés Vásquez.

5.1. Resultados obtenidos.

A continuación se visualizan los resultados obtenidos por el ensayo de fatiga para cada probeta siendo estas ensayadas con deformaciones previamente definidas.

Tabla 5-1: Resultados Nivel de Deformación 250 $\mu\epsilon$. Ensayo de fatiga. Elaboración propia.

Viga de Cuatro Puntos Sometida a Deformación Controlada				
Nivel de Deformación 250[μϵ]				
Tipo de Asfalto	PG 76-22			
Contenido de Asfalto	7,1%			
Tipo de Acondicionamiento	Corto Plazo			
Vacíos de Aire	Nombre	Va (%)		
	P7	2,8		
	P8	2,9		
	P9	2,4		
Dimensión de las Probetas	Nombre	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]
	P7	0,380	0,063	0,052
	P8	0,380	0,063	0,052
	P9	0,380	0,065	0,051
Temperatura de Ensayo	Nombre	T [°C]	Promedio [°C]	
	P7	20,0	20,0	
	P8	20,0		
	P9	20,0		
Frecuencia Ensayo	10 [Hz]			
Rigidez Inicial	Nombre	[Mpa]		
	P7	4.675,9		
	P8	5.205,9		
	P9	4.841,5		

Tabla 5-2: Resultados Nivel de Deformación 400 $\mu\epsilon$. Ensayo de fatiga. Elaboración propia.

Viga de Cuatro Puntos Sometida a Deformación Controlada				
Nivel de Deformación 400[$\mu\epsilon$]				
Tipo de Asfalto	PG 76-22			
Contenido de Asfalto	7,1%			
Tipo de Acondicionamiento	Corto Plazo			
Vacíos de Aire	Nombre	Va (%)		
	P10	2,4		
	P11	2,1		
	P12	2,6		
Dimensión de las Probetas	Nombre	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]
	P10	0,380	0,063	0,052

	P11	0,382	0,065	0,051
	P12	0,382	0,066	0,051
Temperatura de Ensayo	Nombre	T [°C]	Promedio [°C]	
	P10	20,0	20,0	
	P11	20,0		
	P12	20,0		
Frecuencia Ensayo	10 [Hz]			
Rigidez Inicial	Nombre	[Mpa]		
	P10	4.391,8		
	P11	4.827,8		
	P12	7.136,4		

Tabla 5-3: Resultados Nivel de Deformación 500 µε. Ensayo de fatiga. Elaboración propia.

Viga de Cuatro Puntos Sometida a Deformación Controlada				
Nivel de Deformación 500[μϵ]				
Tipo de Asfalto	PG 76-22			
Contenido de Asfalto	7,1%			
Tipo de Acondicionamiento	Corto Plazo			
Vacíos de Aire	Nombre	Va (%)		
	P1	3,3		
	P3	2,1		
	P5	2,4		
Dimensión de las Probetas	Nombre	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]
	P1	0,374	0,064	0,052
	P3	0,383	0,066	0,052
	P5	0,381	0,065	0,052
Temperatura de Ensayo	Nombre	T [°C]	Promedio [°C]	
	P1	20,0	20,0	
	P3	20,0		
	P5	20,0		
Frecuencia Ensayo	10 [Hz]			
Rigidez Inicial	Nombre	[Mpa]		
	P1	3.523,4		
	P3	3.879,7		
	P5	2.926,7		

Tabla 5-4: Resultados Nivel de Deformación 750 µε. Ensayo de fatiga. Elaboración propia.

Viga de Cuatro Puntos Sometida a Deformación Controlada				
Nivel de Deformación 750[µε]				
Tipo de Asfalto	PG 76-22			
Contenido de Asfalto	7,1%			
Tipo de Acondicionamiento	Corto Plazo			
Vacíos de Aire	Nombre	Va (%)		
	P2	2,9		
	P4	2,0		
	P6	2,1		
Dimensión de las Probetas	Nombre	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]
	P2	0,375	0,065	0,051
	P4	0,386	0,065	0,052
	P6	0,382	0,066	0,049
Temperatura de Ensayo	Nombre	T [°C]	Promedio [°C]	
	P2	20,0	20,0	
	P4	20,0		
	P6	20,0		

Frecuencia Ensayo	10 [Hz]	
Rigidez Inicial	Nombre	[Mpa]
	P2	3.585,8
	P4	3.596,7
	P6	3.622,1

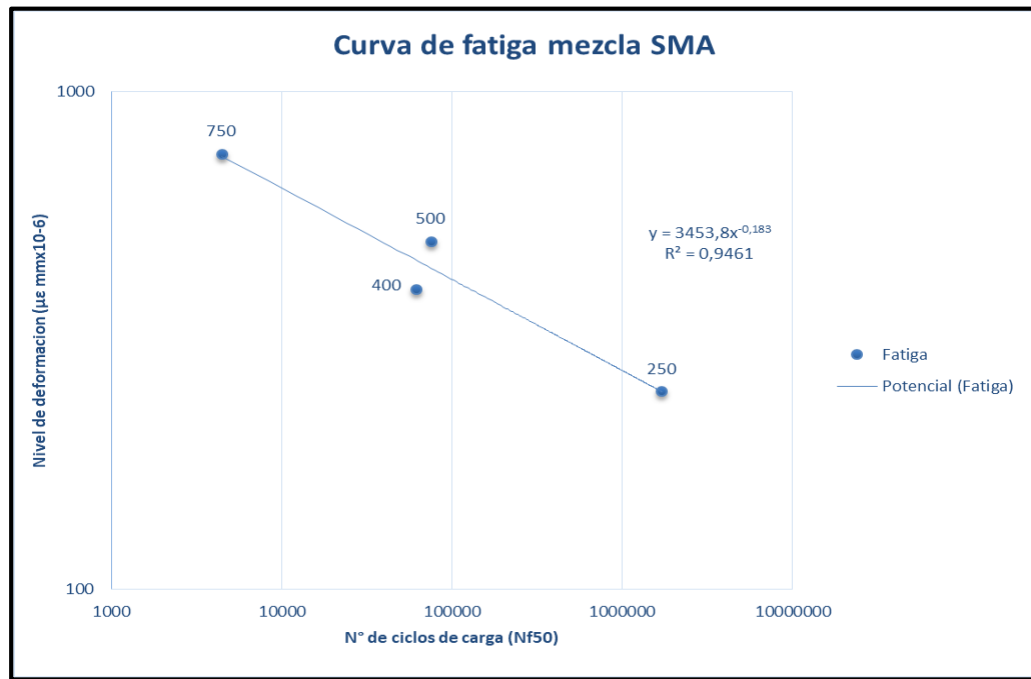
A continuación se visualiza una tabla de resumen con los datos entregados del ensayo, estos son; el valor de la cantidad de ciclos que se requiere para alcanzar el criterio de falla de reducción de la rigidez inicial en un 50% (Nf), estos ordenados según el nivel de deformación al que pertenezcan, además de incluir el promedio de las tres probetas que estén en el mismo nivel de deformación. De igual manera se incluyen porcentajes de vacíos, rigidez inicial y final.

Tabla 5-5: Resumen de resultados ensayo de fatiga. Elaboración propia.

Nivel de deformación	Nombre	Va (%)	Rigidez Inicial (MPa)	Rigidez Final (MPa)	Nº Ciclos de carga (Nf)	Promedio Nf
250	P7	2,8	4.675,9	2.410	3.102.638	1.714.426
	P8	2,9	5.205,9	2.596	1.042.562	
	P9	2,4	4.841,5	2.337	998.079	
400	P10	2,4	4.391,8	2.193	56.135	62.198
	P11	2,1	4.827,8	2.407	119.535	
	P12	2,6	7.136,4	3.564	10.924	
500	P1	2,9	3.523,4	1.761	39.218	75.934
	P3	2,0	3.879,7	1.940	42.109	
	P5	2,1	2.926,7	1.460	146.475	
750	P2	2,9	3.585,8	1.792	4.479	4.465
	P4	2,0	3.596,7	1.796	4.348	
	P6	2,1	3.622,1	1.807	4.569	

Al poseer los valores de Nf y sus correspondientes promedios en función del nivel de deformación, se puede construir la curva de fatiga. Esta debe ser del tipo $N_f = k_1(1/\varepsilon_t)^{k_2}$, ya que el ensayo es a deformación controlada. Para esto es necesario graficar los datos de Nivel de deformación v/s N° de ciclos de carga en un gráfico log-log, donde la gráfica se ajusta a una curva del tipo $Y = k_1 X^{k_2}$.

Con los datos obtenidos, se grafica la curva de fatiga, caracterizando el comportamiento de fatiga de la mezcla SMA, con el fin de determinar una ecuación que permita encontrar los parámetros ε_6 y N_{500} . Estos valores tienen como objetivo ordenar en términos de rendimiento la fatiga de la mezcla analizada. A continuación se visualiza la curva de fatiga de la mezcla SMA.



Grafica 5-1: Curva de fatiga. Elaboración propia.

En esta gráfica se puede apreciar la curva de fatiga de la mezcla SMA. A continuación se puede visualizar la ecuación que modela la curva:

$$y = 3.453,8 * x^{-0,183}$$

Ecuación 5-1: Ecuación curva de fatiga mezcla SMA.

Donde:

- y: Nivel de deformación ($\mu\epsilon$ mm/mm x 10^6) (ϵ_t).
- x: N° de ciclos de carga (N_f).

Al obtener la ecuación, esta no representa la formula característica del enfoque fenomenológico, ya que no se expresa en función del N° de ciclos de carga sino que en función del nivel de deformación, por ende esta fórmula se debe invertir quedando de la siguiente forma.

$$x = 2,163 * 10^{19} * y^{-5,464}$$

Ecuación 5-2: Ecuación curva de fatiga mezcla SMA en función de la variable y.

Lo que es igual a lo siguiente.

$$N_f = 2,163 * 10^{19} * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{5,464}$$

Ecuación 5-3: Ecuación a deformación controlada de mezcla SMA.

En base a la ecuación determinada anteriormente, se pueden obtener los coeficientes K_1 y K_2 , y calcular los valores de N_{500} y ϵ_6 . Donde N_{500} es la cantidad de

ciclos que resiste la mezcla a una deformación de 500[$\mu\epsilon$] y ϵ_6 es el nivel de deformación que presenta la mezcla al aplicarse 1.000.000 de ciclos. Los valores son los siguientes:

Tabla 5-6: Resultados ϵ_6 , N_{500} , k_1 y k_2 , Mezcla SMA Vías Chile. Elaboración Vanessa Lobos.

Mezcla	Clasificación PG	Clasificación Exacta PG	Contenido de asfalto	K_1	K_2	ϵ_6 [$\mu\epsilon$]	N_{500}
SMA Vías Chile	76-22	84-18	7,1%	2,163E19	5,464	276	38.716

5.2. Resultados Vanessa Lobos y Andrés Vázquez.

Se tiene como objetivo poder comparar los resultados obtenidos con los resultados de otras memorias que apliquen el mismo ensayo a mezclas parecidas bajo estándares similares, basándose en estos criterios se eligen las memorias de Vanessa Lobos y Andrés Vázquez para realizar las respectivas comparaciones de resultados. A continuación se presentan los resultados respectivos de cada uno.

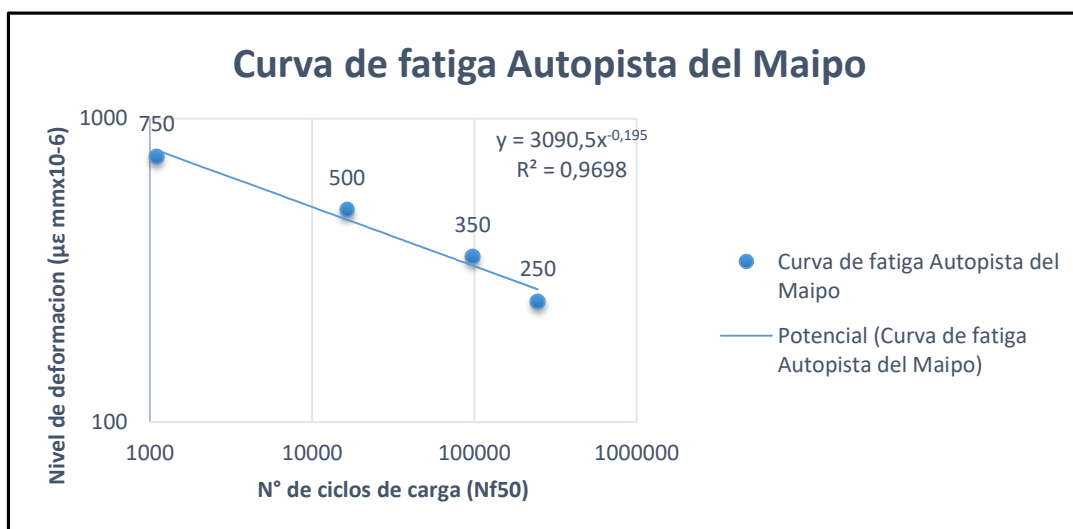
5.2.1. Vanessa lobos.

La exalumna memorista Vanessa Lobos realizó un estudio de fatiga a mezclas SMA aplicadas a la Autopista del Maipo y Autopista central. A continuación se presentan los resultados obtenidos de esta memoria.

5.2.1.1. Autopista del Maipo.

Tabla 5-7: Resumen de resultados ensayo de fatiga, Autopista del Maipo. Elaboración Vanessa Lobos.

Nivel de deformación	Nombre	Va (%)	Rigidez Inicial (MPa)	Rigidez Final (MPa)	Nº Ciclos de carga (Nf)	Promedio Nf
250	P10	2,48	4.410	186	46.438	245.925
	P11	2,48	4.365	2.179	336.176	
	P12	3,47	3.728	2.201	355.161	
350	P7	3,08	3.663	1.291	258.986	97.370
	P8	3,74	3.420	1.706	23.381	
	P9	3,74	2.584	1.828	9.742	
500	P4	3,07	4.530	1.862	15.238	16.421
	P5	3,07	4.264	2.128	14.233	
	P6	3,8	3.731	2.259	19.791	
750	P1	3,47	3.103	846	1.519	1.102
	P2	4,03	2.687	1.339	791	
	P3	4,03	1.699	1.551	995	



Grafica 5-2: Curva de fatiga, Autopista del Maipo. Elaboración Vanessa Lobos

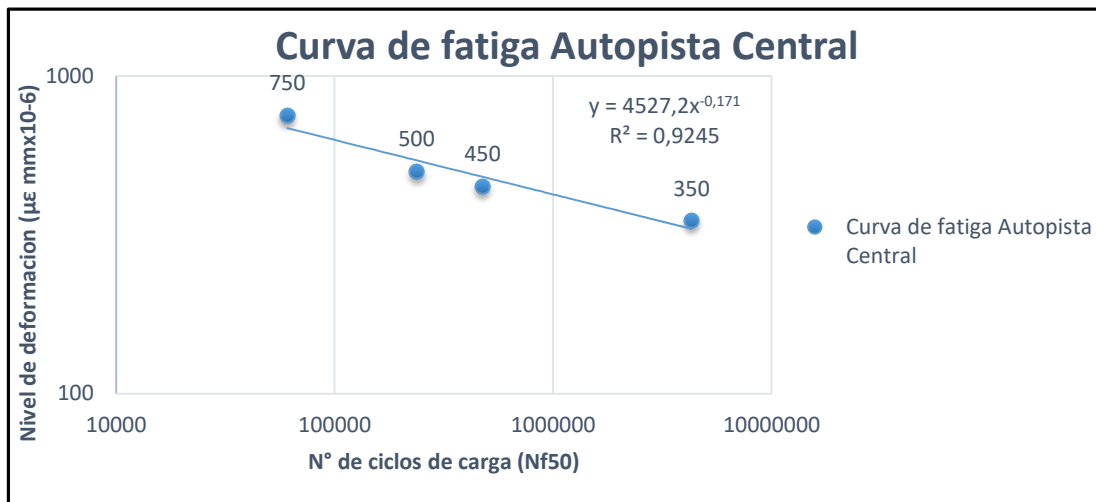
Tabla 5-8: Resultados ε_6 , N_{500} , k_1 y k_2 , Autopista del Maipo. Elaboración Vanessa Lobos.

Mezcla	Clasificación PG	Clasificación Exacta PG	Contenido de asfalto	K_1	K_2	ε_6 [με]	N_{500}
SMA Autopista del Maipo	82-28	87-30	5,9%	7,899E17	5,128	208	16.421

5.2.1.2. Autopista Central.

Tabla 5-8: Resumen de resultados ensayo de fatiga, Autopista Central. Elaboración Vanessa Lobos.

Nivel de deformación	Nombre	Va (%)	Rigidez Inicial (MPa)	Rigidez Final (MPa)	N° Ciclos de carga (Nf)	Promedio Nf
350	P10	4,01	1.813	1.206	2.334.451	4.302.995
	P11	4,01	2.930	1.193	3.944.033	
	P12	3,97	2.240	900	6.630.500	
450	P7	3,97	1.727	951	666.419	475.409
	P8	3,54	2.054	1.023	429.550	
	P9	3,54	1.905	864	330.257	
500	P4	2,18	2.066	1.042	271.168	237.261
	P5	2,18	2.008	1.004	294.458	
	P6	3,07	2.088	1.023	146.157	
750	P1	3,07	1.592	610	42.869	60.693
	P2	4,08	1.442	719	27.560	
	P3	4,08	1.226	796	111.649	



Grafica 5-3: Curva de fatiga, Autopista Central. Elaboración Vanessa Lobos.

Tabla 5-9: Resultados ε_6 , N_{500} , k_1 y k_2 , Autopista Central. Elaboración Vanessa Lobos.

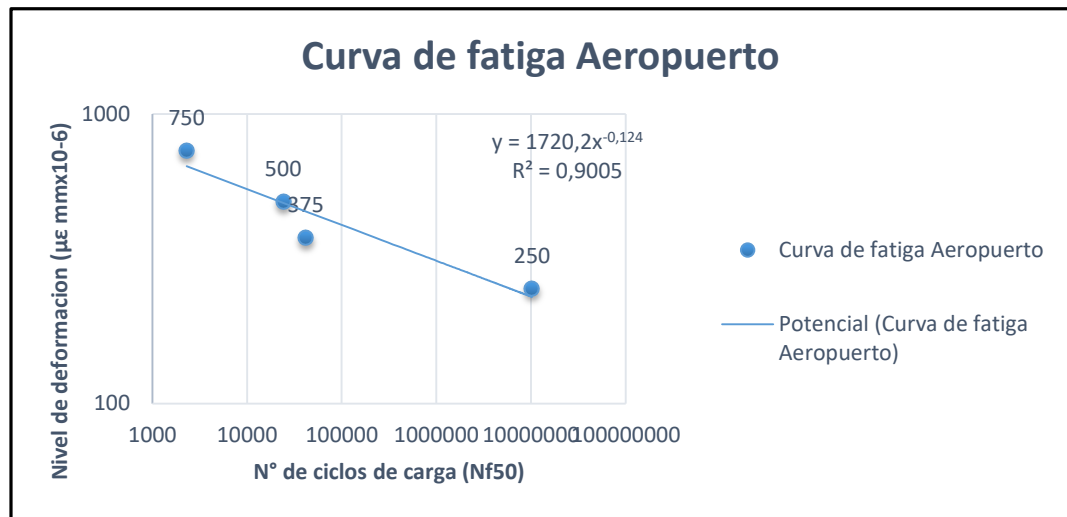
Mezcla	Clasificación PG	Clasificación Exacta PG	Contenido de asfalto	K_1	K_2	ε_6 [με]	N_{500}
SMA Autopista Central	76-28	80-34	6,8%	2,394E21	5,848	426	237.261

5.2.2. Andrés Vázquez.

El exalumno memorista Andrés Vázquez de la misma manera que Vanessa Lobos realizó una memoria que trata del estudio del análisis del desempeño en fatiga de cierta mezcla a emplearse en una de las pistas de rodaje del Aeropuerto Arturo Merino Benítez. A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron en esta memoria.

Tabla 5-10: Resumen de resultados ensayo de fatiga, Aeropuerto. Elaboración Andrés Vázquez.

Nivel de deformación	Nombre	Va (%)	Rigidez Inicial (MPa)	Rigidez Final (MPa)	N° Ciclos de carga (Nf)	Promedio Nf
250	F9	4,0	3.356	1.677	918.086	10.273.973
	F10	4,3	3.602	1.799	12.605.065	
	F11	4,3	1.486	2.397	17.298.767	
350	F20	3,8	4.254	2.123	19.047	41.605
	F22	5,0	3.362	1.681	54.293	
	F24	3,5	3.673	1.836	51.474	
500	F1	2,3	3.150	1.575	17.557	24.100
	F27	4,7	3.257	1.320	33.569	
	F6	3,7	2.975	1.485	21.173	
750	F16	5,0	2.653	1.324	921	2.301
	F17	3,8	2.021	983	5.559	
	F18	3,8	692	110	422	



Grafica 5-4: Curva de fatiga, Aeropuerto. Elaboración Andrés Vázquez.

Tabla 5-11: Resultados ϵ_6 , N_{500} , k_1 y k_2 , Autopista Aeropuerto. Elaboración Andrés Vázquez.

Mezcla	Clasificación PG	Clasificación Exacta PG	Contenido de asfalto	K_1	K_2	ϵ_6 [$\mu\epsilon$]	N_{500}
SUPERPAVE Aeropuerto "A.M.B."	82-22	84-18	5,7%	1,239E26	8,065	300	24.485

5.3. Análisis de resultados.

5.3.1. Análisis de resultados del ensayo de fatiga en Mezcla SMA Vías Chile.

Con respecto a los resultados arrojados por el ensayo de fatiga, estos al momento de ser analizados, se encuentran dos anomalías las cuales se dan en las probetas P11 y P5. Estas se consideran de esta manera debido a que el número de ciclos de carga que resisten es muy elevado, siendo 119.536 ciclos al nivel de deformación 400 $[\mu\epsilon]$ para P11 y 146.475 ciclos a 500 $[\mu\epsilon]$ para P5, los cuales son valores extremadamente elevados en comparación con las demás probetas bajo su correspondiente deformación.

Los valores de las cantidades de ciclos de carga de las demás probetas bajo los dos niveles de deformación, van desde los 10.000 a 60.000 ciclos de carga, por lo que los valores anómalos antes mencionados están muy fuera de ese rango. De igual manera se analiza cada probeta anómala, con su probeta hermana o probeta que se hizo a partir del mismo molde de mezcla. En este caso las probetas anómalas son P11 y P5, siendo sus probetas hermanas P12 y P6. Hay que destacar que solo las probetas P11 y P12 son ensayadas bajo el mismo nivel de deformación.

Al comparar las probetas P11 y P12, se puede visualizar que poseen valores muy distintos tanto de rigidez inicial y de cantidad final de ciclos de carga, siendo que estos valores deben ser muy parecidos puesto que su confección, compactación y dimensionamiento son muy similares. Para explicar este fenómeno se debe remitir al proceso de compactación, el que se desarrolla por el equipo compactador de rodillo, este compactador teóricamente compacta uniformemente la mezcla, lo cual en la realidad es muy diferente. Para que el equipo compacte uniformemente hay que dar por lo menos tres vueltas el molde con la mezcla, lado por lado, para que así la mezcla alcance el rango de vacíos especificado, este proceso no es automático sino que tarda un periodo de tiempo, en el cual se pierde bastante temperatura. Para disminuir en lo máximo posible las pérdidas de temperatura, los moldajes se calientan sobre las temperaturas de compactación, de esta manera se puede mantener la temperatura de la mezcla más tiempo, esto es un riesgo ya que al entrar en contacto, la superficie del molde con la mezcla, se puede producir un envejecimiento de la mezcla disminuyendo las propiedades del ligante, esto se demuestra en el estudio que menciona que al manejar mezclas a temperaturas de 185 °C, aproximadamente, provoca un mayor envejecimiento que el producido a temperaturas de 143 °C (Dessouky, 2011)

El problema de la variabilidad térmica en el proceso de compactación, afecta el módulo de rigidez, en este caso al disminuir la temperatura abruptamente, se presenta un menor porcentaje de vacíos y por ende el módulo de rigidez de la mezcla aumenta. De igual manera este fenómeno afecta la compactación al hacerla más fácil a mayor temperatura, por lo que al realizar el proceso, en la última de las pasadas del rodillo, este no compacta de igual manera que la primera solo por el hecho de la pérdida de temperatura.

La problemática de la confección del molde con mezcla, se puede visualizar al determinar las densidades, porcentajes de vacíos, rigidez inicial y N° de ciclos de carga que presenta cada probeta, teniendo en el caso de las probetas P11 y P12 valores de

2,1 y 2,6% de vacíos, 4.827,8 y 7.136.4 [MPa] de rigidez inicial y 119.535 y 10.924 N° Ciclos de Carga. Esto es muy variable para ser parte del mismo molde, por ende el problema de la variabilidad al momento de compactar es complejo en el sentido de que el proceso debe estar muy bien controlado, tanto en su planificación y programación. Las más mínimas variaciones que se presenten pueden alterar los resultados considerablemente.

En base a estas probetas anómalas, los promedios de la cantidad de ciclos de carga de los niveles de deformación 400 y 500 [$\mu\epsilon$] sufren alteración, debido a que lógicamente el nivel de deformación 500 [$\mu\epsilon$] debe tener una mayor cantidad de ciclos de carga que la de 400 [$\mu\epsilon$] lo cual en el caso de la mezcla SMA Vías Chile no sucede por un pequeño rango.

Dentro de las explicaciones de este fenómeno, se tiene la anormalidad de la probeta P5, que es ensayada en función del nivel de deformación 500 [$\mu\epsilon$], la cual tiene la particularidad de arrojar un valor de 146.475 ciclos de carga, caso extraño debido a que supera aproximadamente en tres veces los valores de las probetas que se ensayan al mismo nivel de deformación. Al comparar el valor inicial de rigidez de P5 con respecto a P1 y P3 se tiene que estos superan en 20% y 33% al valor de rigidez inicial de P5. En función de lo anterior, el hecho de que P5 posea una rigidez inicial menor que P1 y P3 es correcto ya que a menor rigidez la mezcla tendrá mejor desempeño en fatiga. Lo que no se justifica es que su desempeño aumente en tal magnitud, el cual afecta considerablemente el promedio de ciclos del nivel de deformación. Esto se repite al relacionar las probetas P10 y P11 del nivel de deformación 400 [$\mu\epsilon$]. Al comparar P11 con respecto a P10, la rigidez inicial de P11 supera en un 10% a P10, por lo que el desempeño de P10 debe ser mejor y lo es, siendo dos veces más que la cantidad de ciclos de P10.

Como se muestra anteriormente, este fenómeno puede repetirse, pero en diferentes magnitudes, las cuales dependen de factores externos, los cuales son difíciles de controlar ya que se requiere de mucha experiencia al momento de realizar la mezcla y compactarla.

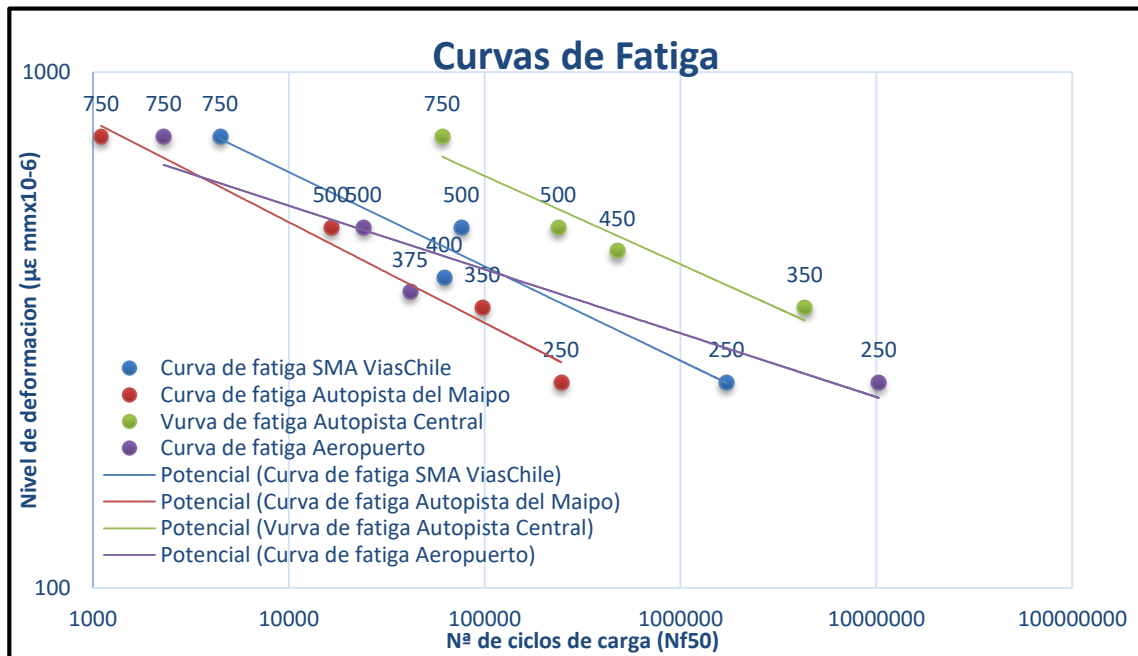
Por último, es importante considerar que la Norma AASHTO T321-17, no establece criterios de control respecto a la variabilidad en las muestras y sus resultados, lo que no permite determinar si un resultado es válido o debe ser excluido de las muestras.

5.3.2. Análisis y comparación de resultados.

En los puntos anteriores se presentaron los resultados de los ensayos de fatiga tanto de la presente memoria como de anteriores estudios, los cuales fueron elegidos para realizar la comparación. Se tiene como objetivo el poder realizar una comparación de desempeño entre las diferentes mezclas ante la fatiga. A continuación se presentan los diferentes resultados resumidos de todas las mezclas y posteriormente se representa gráficamente de manera global las curvas señaladas.

Tabla 5-13: Comparación de resultados. Elaboración propia.

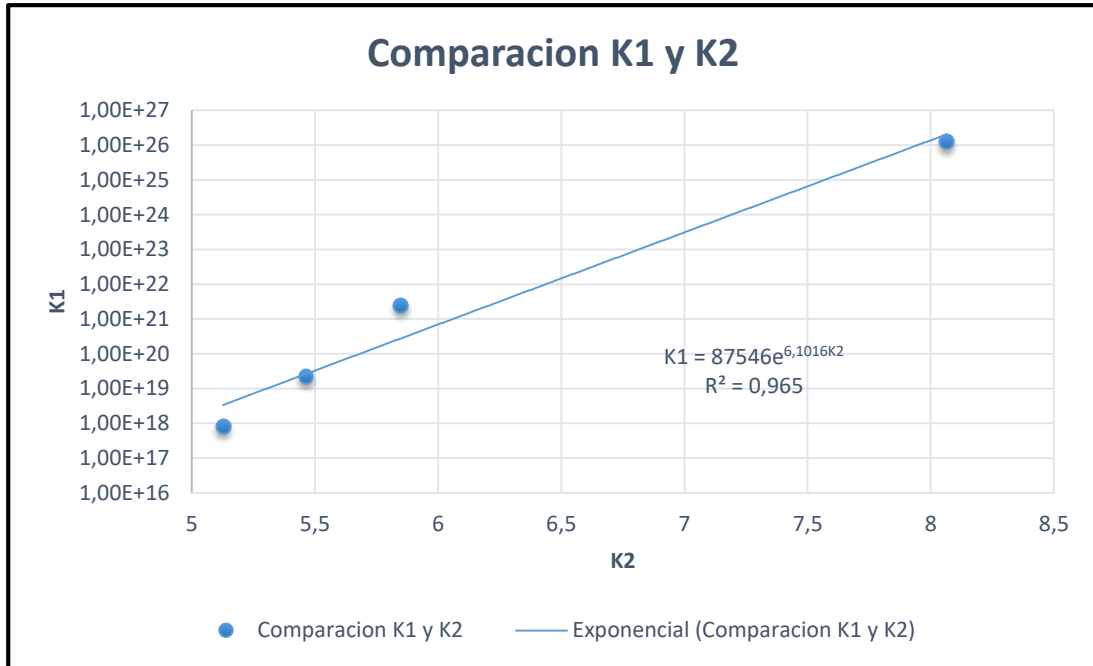
Mezcla Asfáltica	Clasificación PG	Amplitud	% Asfalto (Ref. Ag)	Intercepto K_1	Intercepto K_2	Correlación (R^2)	ε_6 [$\mu\varepsilon$]	N_{500}
SMA Autopista del Maipo	82-28	117	5,9%	7,899E17	5,128	0,9698	208	16.421
SMA Autopista Central	76-28	114	6,8%	2,394E21	5,848	0,9245	426	237.261
SUPERPAVE Aeropuerto "A.M.B."	82-22	102	5,7%	1,239E26	8,065	0,9005	300	24.485
SMA Vías Chile	76-22	102	7,1%	2,163E19	5,464	0,9461	276	38.716



Gráfica 5-5: Curvas de fatiga. Elaboración propia.

5.3.2.1. Análisis de parámetros K_1 y K_2 .

Se hace un análisis que relaciona los parámetros K_1 y K_2 de cada mezcla, con estos valores se hace una curva y se genera una fórmula que permita determinar cualquier valor de estos parámetros.



Grafica 5-6: Grafica de comparación entre k_1 y k_2 . Elaboración propia.

Según los parámetros K_1 y K_2 obtenidos, se muestra una fuerte correlación en cada una de las mezclas, siendo el menor valor de éstas el presente en la mezcla “SUPERPAVE Aeropuerto Arturo Merino Benítez”, con $R^2=0,90$ y el mayor se encuentra en la mezcla “SMA Autopista del Maipo” con $R^2=0,97$.

De la gráfica se observa que solo tres valores de K_2 se encuentran dentro del rango que indica la literatura (entre 3 y 6), siendo sólo la mezcla “SUPERPAVE Aeropuerto Arturo Merino Benítez” el que se sale del rango con un valor de $K_2=8,065$. Este valor se encuentra fuera del rango, debido a que la pendiente de la curva se ve afectada ya que el valor del nivel de deformación de $250[\mu\epsilon]$ es muy elevado con respecto al de las demás mezclas. Al estar este valor fuera del rango no significa que este sea inválido ya que según la normativa AASHTO 321-17, la cual establece las condiciones de vida de fatiga en las mezclas, no establece criterios de control para la variabilidad de los resultados obtenidos.

Como se expuso en la gráfica anteriormente, los parámetros K_1 y K_2 están fuertemente relacionados debido a que $R^2=0,965$, por esta razón se podría utilizar solo un parámetro para describir la fatiga. De esta manera se reduce el número de ensayos a uno solo por lo que se llevarían a cabo solo ensayos a altos niveles de deformación por su rapidez, para así disminuir el tiempo de ejecución. Por ende se podría introducir la ecuación que se plantea en la gráfica 5-6 en la fórmula original de deformación controlada quedando lo siguiente:

$$N_f = 87546e^{6,6016k_2} \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{k_2}$$

Ecuación 5-4: Ecuación a deformación controlada en función de ϵ_t y k_2 .

Al utilizar la ecuación anterior, si se reemplaza algún valor de N_f de un nivel elevado de deformación, se podría obtener el valor de k_2 y por ende el de k_1 , y basándose en estos dos parámetros obtenidos poder construir la curva de fatiga asociada a las mezclas, sin la necesidad de realizar una gran cantidad de ensayos, los cuales tienen un gran gasto de dinero y material así como de tiempo de realización.

5.3.2.2. Análisis de factores N_{500} y ε_6 .

De la misma manera que los parámetros K_1 y K_2 se analizan los valores de N_{500} y ε_6 de cada mezcla. De estas cuatro mezclas, se tienen tres que se fabrican en función del diseño Marshall, las cuales son SMA, mientras que se tiene solo una fabricada en base al diseño SUPERPAVE.

Los valores de N_{500} y ε_6 son indicadores estándar en el sentido que demuestran el cómo se comporta la mezcla en el tiempo, principalmente en eso radica su importancia. En base a estos parámetros se puede identificar si una mezcla tendrá un comportamiento apropiado durante su vida de servicio, es por ello que al comparar mezclas, mientras mayor sean estos valores, de mejor manera se comporta la mezcla en su vida de uso.

En el caso del valor de N_{500} , este representa la cantidad de ciclos de carga que causa la falla para un nivel de deformación de 500 [$\mu\varepsilon$], por ende bajo este criterio mientras mayor sea la cantidad de ciclos de carga, mejor desempeño presenta bajo este nivel de deformación.

Con respecto al valor de ε_6 , este representa el nivel de deformación asociada al millón de repeticiones o ciclos de carga que causan la disminución en un 50% de la rigidez inicial, por lo que a mayor valor que entregue ε_6 , este será mejor ya que significa que a una misma cantidad de ciclos de carga aplicadas, la mezcla soporta un mayor nivel de deformación.

En base a lo anterior, para cualquiera de los dos valores se puede hacer una lista que abarque de la mejor a la peor mezcla, siendo la mejor mezcla la que presente la magnitud mayor.

A continuación se muestran las listas, en orden descendente de la mejor a la peor.

Tabla 5-14: Mezclas a comparar bajo el criterio N_{500} . Elaboración Propia.

Mezclas a Comparar	N_{500}
Mezcla SMA Autopista Central	237.261
Mezcla SMA Vías Chile	38.716
Mezcla SUPERPAVE A.M.B.	24.485
Mezcla SMA Autopista del Maipo	16.421

Tabla 5-15: Mezclas a comparar bajo el criterio ε_6 . Elaboración Propia.

Mezclas a Comparar	ε_6
Mezcla SMA Autopista Central	426
Mezcla SUPERPAVE A.M.B.	300
Mezcla SMA Vías Chile	276
Mezcla SMA Autopista del Maipo	208

Se debe destacar que la comparación anterior es solo para dicho valores, ya que no se mencionan otros factores que afecten directamente la comparación. Esto se hace de esta manera debido a que todas las mezclas se realizan de forma distinta, esto se puede visualizar en el tipo de asfalto que se usa, diseño, porcentajes de vacíos en la mezcla, rigidez de la mezcla y por último el factor más importante es que cada mezcla la hicieron personas distintas.

5.3.2.3. *Análisis de Amplitud Térmica Asfáltica.*

Se pueden efectuar comparaciones entre los asfaltos que componen las diferentes mezclas, esto se realiza mediante los PG asfálticos reales correspondientes, las cuales son las temperaturas reales de falla máximas y mínimas. El parámetro de comparación se denomina Amplitud y consiste en calcular la diferencia existente entre la temperatura de falla máxima con respecto a la temperatura de falla mínima. Al realizar el cálculo de la amplitud a cada mezcla, este valor puede determinar qué asfalto es mejor, ya que acepta mayor variabilidad térmica.

A continuación se muestra la clasificación según la amplitud, la cual tendrá un orden descendente de mejor a peor asfalto.

Tabla 5-16: Comparación de amplitudes de las diferentes mezclas. Elaboración Propia.

Mezcla Asfáltica	Clasificación PG	Clasificación Exacta PG	Amplitud
SMA Autopista del Maipo	82-28	87-30	117
SMA Autopista Central	76-28	80-34	114
SUPERPAVE Aeropuerto "A.M.B."	82-22	84-18	102
SMA Vías Chile	76-22	84-18	102

Se determina que la mezcla "SMA Autopista del Maipo" es la mejor ya que su amplitud es la mayor, luego le sigue la mezcla "SMA Autopista Central" y por último se tienen a las mezclas "SUPERPAVE Aeropuerto Arturo Merino Benítez" y "SMA Vías Chile" con el mismo rango de amplitud.

5.3.2.4. *Análisis de Rigidez Inicial y Final de las Mezclas.*

Se examinan los resultados de rigidez que arroja el ensayo tanto inicialmente como finalmente. A continuación se visualizan tablas comparativas de rigidez, tanto de la mezcla SMA que se realiza en la presente memoria y las demás mezclas con las que se efectúa la comparación.

Tabla 5-17: Resumen rigidez inicial y final, SMA Vías Chile. Elaboración Propia.

Deformación [µε] SMA Vías Chile	Probeta	% Asf. (Ref.Ag.) 7,1%	SMA Vías Chile	
		Va (%)	Rigidez Inicial [MPa]	Rigidez Final [MPa]
750	P2	2,10	3.586	1.792
	P4	2,00	3.597	1.796
	P6	2,90	3.622	1.807
500	P1	2,10	3.523	1.761
	P3	2,00	3.880	1.940
	P5	2,90	2.927	1.460
400	P10	2,60	4.392	2.193
	P11	2,10	4.828	2.407
	P12	2,40	7.136	3.564
250	P7	2,40	4.676	2.337
	P8	2,90	5.206	2.596
	P9	2,80	4.842	2.410
Promedio			4.351	2.172

Tabla 5-18: Resumen rigidez inicial y final, Autopista Central. Elaboración Propia.

Deformación [µε] Autopista Central	Probeta	% Asf. (Ref.Ag.) 6,8%	Autopista Central	
		Va (%)	Rigidez Inicial [MPa]	Rigidez Final [MPa]
750	P1	3,07	1.592	610
	P2	4,08	1.442	719
	P3	4,08	1.226	796
500	P4	2,18	2.066	1.042
	P5	2,18	2.008	1.004
	P6	3,07	2.088	1.023
450	P7	3,97	1.727	951
	P8	3,54	2.054	1.023
	P9	3,54	1.905	864
350	P10	4,01	1.813	1.206
	P11	4,01	2.930	1.193
	P12	3,97	2.240	900
Promedio			1.879	944

Tabla 5-19: Resumen rigidez inicial y final, Autopista del Maipo. Elaboración Propia.

Deformación [µε] Autopista del Maipo	Probeta	% Asf. (Ref.Ag.) 5,9%	Autopista Central	
		Va (%)	Rigidez Inicial [MPa]	Rigidez Final [MPa]
750	P1	3,47	3.103	846
	P2	4,03	2.687	1.339
	P3	4,03	1.699	1.551
500	P4	3,07	4.530	1.862
	P5	3,07	4.264	2.128
	P6	3,8	3.731	2.259
350	P7	3,08	3.663	1.291
	P8	3,74	3.420	1.706
	P9	3,74	2.584	1.828
250	P10	2,48	4.410	186
	P11	2,48	4.365	2.179
	P12	3,47	3.728	2.201
Promedio			3.515	1.614

Tabla 5-20: Resumen rigidez inicial y final, Aeropuerto. Elaboración Propia.

Deformación [$\mu\epsilon$] SUPERPAVE Aeropuerto A.M.B.	Probeta	% Asf. (Ref.Ag.) 5,7%	SMA Vías Chile	
		Va (%)	Rigidez Inicial [MPa]	Rigidez Final [MPa]
750	F16	5,00	2.653	1.324
	F17	3,80	2.021	983
	F18	3,80	692	110
500	F1	2,30	3.150	1.575
	F27	4,70	3.257	1.320
	F6	3,70	2.975	1.485
350	F20	3,80	4.254	2.123
	F22	5,00	3.362	1.681
	F24	3,50	3.673	1.836
250	F9	4,00	3.356	1.677
	F10	4,30	3.602	1.799
	F11	4,30	1.486	2.397
Promedio			2.893	1.526

Tabla 5-21: Resumen promedios rigidez inicial y final de todas las mezclas. Elaboración propia.

Mezcla Asfáltica	% Asfalto (Ref. Ag)	Promedio Va %	Promedio Rigidez Inicial [MPa]	Promedio Rigidez Final [MPa]
SMA Vías Chile	7,1%	2,4%	4.351	2.172
SMA Autopista del Maipo	5,9%	3,4%	3.515	1.614
SUPERPAVE Aeropuerto "A.M.B."	5,7%	4,0%	2.893	1.526
SMA Autopista Central	6,8%	3,5%	1.879	944

Antes de realizar la comparación se debe mencionar que al visualizar algunos valores de las mezclas del Aeropuerto y de las Autopistas del Maipo y Central, estas entregan resultados singulares, los cuales no se explican en la presente memoria, ya que estos simplemente se obtuvieron de las correspondientes memorias de Vanessa Lobos y Andrés Vázquez. De la confección y compactación de las probetas no hay registros de cómo se realizaron, por ende la variabilidad en sus resultados es elevada.

De las cuatro mezclas, la SMA Vías Chile es la que presenta el promedio más elevado de rigidez tanto inicial como final, esto en base a la teoría significa que la mezcla tendrá poca tendencia a deformarse y una capacidad de retorno a su estado original más elevada, bajo condiciones estándar. La elevada rigidez que presenta la mezcla, no se contrasta con su elevado porcentaje de ligante, ya que teóricamente la rigidez es inversamente proporcional al porcentaje de asfalto. Este resultado se explica debido al proceso de compactación, el cual consta de tres compactaciones en el molde de mezcla por lado. Este proceso, en base a trabajos anteriores solo es compactado dos veces por lado, por ende se decide compactar tres veces por lado ya que de esta manera es la única forma de poder alcanzar el rango de vacíos especificados (2-4%), así los

porcentajes de vacíos dan como promedio un 2,4%, con respecto a todas las probetas calculadas. Por ende teóricamente a menor porcentaje de vacíos que presente la mezcla, mayor será el módulo de rigidez.

Al analizar las demás mezclas, se visualiza que estas poseen menos porcentaje de ligante y más porcentaje de vacíos promedios, estos reflejan los valores de rigidez arrojados por el ensayo.

Con respecto a las mezclas de la Autopista del Maipo y Central, estas poseen un porcentaje de vacíos muy parecido (3,4-3,5%), pero un porcentaje de asfalto y rigidez inicial bastante diferente. En este caso se observa que la diferencia de porcentajes de asfalto entre la mezcla de la Autopista Central y Maipo, es aproximadamente 1%, lo cual hace variar considerablemente la rigidez inicial, siendo la rigidez inicial de la Autopista del Maipo superior en un 87% a la presentada por la Autopista Central, esto se corrobora con los resultados de los valores de ε_6 calculados. Estos estiman que la mezcla de la Autopista del Maipo soporta más del doble de deformación que la Autopista Central al millón de ciclos de carga.

Al visualizar los resultados entregados por la mezcla SUPERPAVE del aeropuerto, este posee un promedio alto de porcentaje de vacíos (4,0%) y un porcentaje bajo de ligante (5,7%). De todas las mezclas posee el mayor porcentaje de vacíos y el menor porcentaje de ligante. En base a solo el porcentaje de vacíos, debería presentar la rigidez más pequeña de las demás mezclas, pero el hecho de poseer el menor porcentaje de asfalto de todas las mezclas compensan haciéndola más rígida. Además hay que destacar que su diseño es más completo y acabado que el diseño Marshall de las mezclas SMA, mejorando su performance.

6. CONCLUSIÓN.

En base a la experiencia realizada, se lleva a cabo la confección de la mezcla asfáltica SMA, ésta forma parte del proyecto de recapados asfálticos de la empresa Vías Chile. El proceso comienza con la entrega del diseño de mezcla bajo los parámetros de la empresa Bitumix, en colaboración con el laboratorio LEMCO que verifica y corrobora la mezcla.

Considerando la elaboración asfáltica SMA, se puede decir que esta es una mezcla dificultosa de llevar a cabo, debido a que los porcentajes de asfalto son muy elevados a comparación con los porcentajes de otras mezclas asfálticas comunes. El hecho de que tenga un elevado porcentaje de asfalto dificulta la combinación de los elementos constitutivos de ésta. El elemento que mejora la trabajabilidad de la mezcla es la fibra Viatop, la cual se constituye de celulosa, mejorando la absorción del asfalto por parte de los áridos, impidiendo el escurrimiento del ligante.

Con respecto al ensayo de fatiga, y en base a los resultados presentados, se demuestra que estos presentan una alta variabilidad, lo cual se refleja en los tiempos y temperaturas de ejecución que se da en dos procesos específicos; mezcla y compactación, influyendo finalmente en los resultados presentados por el ensayo de fatiga como; rigidez inicial y el número de ciclos de carga que resiste la mezcla a deformación constante.

Dentro de la alta variabilidad que presenta el ensayo de fatiga, los valores que más variación presentan son los correspondientes a la cantidad de ciclos de carga. Dentro de todas las mezclas analizadas, se presentan valores de ciclos de carga anómalos. Con respecto a este tipo de resultados presentados por la mezcla SMA Vías Chile, se comprueba que al realizar la curva de fatiga, los valores de los niveles de deformación de 500 y 400 $[\mu\epsilon]$ presentan resultados cambiados con respecto al promedio de ciclos de carga que resiste la mezcla. Estos arrojan que la deformación 500 $[\mu\epsilon]$ resiste más ciclos de carga que el nivel de deformación de 400 $[\mu\epsilon]$, no obstante esto debería ser al revés. Este fenómeno sucede debido a la existencia de dos probetas anómalas en los niveles de deformación 500 $[\mu\epsilon]$ y 400 $[\mu\epsilon]$. Estas probetas entregan valores muy elevados de números de ciclos de carga (146.475 y 119.535 ciclos de carga), las cuales afectan los promedios de los ciclos de cada deformación. Al comparar estos dos valores, la probeta P5 correspondiente al nivel de deformación 500 $[\mu\epsilon]$ supera al valor de la probeta P11 del nivel de deformación 400 $[\mu\epsilon]$ en aproximadamente un 23%, elevando así el promedio de la deformación 500 $[\mu\epsilon]$ y superando la de 400 $[\mu\epsilon]$ en un 22%, lo cual es considerable.

Si se quisiera mejorar estos promedios quitando estos dos valores anómalos mencionados anteriormente, no se soluciona el problema ya que en el nivel de deformación de 400 $[\mu\epsilon]$ existe otra probeta anómala, P12 que posee un valor de 10.924 ciclos de carga, valor muy reducido comparado con la probeta P11 (probeta fabricada a partir del mismo molde). La proporción que existe en los resultados del número de ciclos de carga, es que la probeta P11 es aproximadamente once veces mayor a la P12. Basándose en esta relación, se recomienda eliminar estas dos probetas, debido a la enorme variabilidad que presentan siendo estas dos pertenecientes al mismo molde.

En base a los resultados del comportamiento de fatiga, este se analiza con los valores de N_{500} y ε_6 . De todas las mezclas, la que tiene un mejor desempeño es la Mezcla SMA Autopista Central, esta presenta el valor de ε_6 mayor, por lo que es la mezcla que frente al millón de repeticiones de carga, es capaz de soportar un mayor nivel de deformación con respecto a las demás (426 $[\mu\varepsilon]$). Además presenta el mayor valor de N_{500} (237.261 ciclos). Al comparar solo las mezclas SMA, se puede observar que la baja cantidad de asfalto que posee la mezcla SMA Autopista del Maipo, provoca una disminución de la cohesión interna de las partículas, impidiendo alcanzar una baja cantidad de vacíos al ser compactada. Para lograr entrar en el rango de vacíos especificados, se aumenta la temperatura y el tiempo de exposición de la mezcla en el horno, provocando envejecimiento en el ligante. Esta es la razón de los deficientes resultados de fatiga de esta mezcla, con respecto a las demás. El hecho de que una mezcla este expuesta a mayor temperatura de la especificada, independiente que posea el mejor ligante de todas las mezclas, es totalmente perjudicial para el asfalto, produciendo envejecimiento, el cual se refleja en un cambio en su comportamiento reológico y su composición, caracterizándose por un endurecimiento del betún, produciendo un aumento en los valores de rigidez, que a su vez disminuyen los valores de ductilidad en la mezcla, volviéndola propensa a los daños por fatiga.

Al comparar las mezclas SMA con respecto a la mezcla SUPERPAVE del Aeropuerto, se puede mencionar que estas poseen un comportamiento excelente respecto al agrietamiento de fatiga con respecto a la SUPERPAVE, siendo ésta superada en el parámetro ε_6 por la mezcla SMA Autopista Central, y en el parámetro N_{500} por las mezclas SMA Autopista Central y Vías Chile. Esto marca un precedente en el sentido de que lógicamente se piensa que una mezcla SUPERPAVE tiene mejor desempeño frente a una mezcla con diseño Marshall, lo cual en este caso se observa lo contrario. De esta manera se demuestra que las mezclas SMA están muy bien diseñadas, en el sentido que todos sus componentes son aprovechados al máximo, pudiendo igualar “teóricamente” a una SUPERPAVE.

El estudio realizado y la curva de fatiga obtenida mediante los ensayos de fatiga, constituye netamente un trabajo de laboratorio bajo condiciones controladas. Esto representa de manera teórica el comportamiento de las mezclas, las cuales no se pueden comparar con la realidad de los pavimentos, debido a que ningún ensayo representa de manera fidedigna lo que sucede en terreno, que tiene múltiples variables que no son consideradas en el proceso.

Por esta razón, los resultados obtenidos, para poder ser llevados a la realidad, deben poseer factores de corrección que incluyan más variables que traten de emularla. De igual manera la ejecución de ensayos de fatiga a diferentes mezclas es positivo para el área Vial, ya que de a poco se va generando una base de datos, con los correspondientes desempeños de este tipo de mezclas.

En consideración a todo lo anterior como resultado, la curva de fatiga SMA no es aplicable. Esta curva no se puede modificar debido a que no se pueden volver a ensayar nuevas probetas en estos puntos, ya que se utiliza todo el material entregado por la empresa Bitumix. En vista a que los resultados de la mezcla SMA Vías Chile no cumplen con los parámetros esperados en función al ensayo de fatiga, ésta no puede ser incorporada dentro de una base de datos.

BIBLIOGRAFIA.

1. AASHTO Designation: T 321-17, Determining the fatigue life of compacted asphalt mixtures subjected to repeated flexural bending, T 321-17, USA, 2017, 12 P.
2. AASHTO Designation: PP3-94, Standard practice for preparing hot-mix asphalt (HMA) specimens by means of the rolling wheel compactor, PP3-94, USA, 1996, 8P.
3. Asphalt institute. Mixtures performance testing, En su: MS-2 Asphalt mix design methods, séptima edición, USA, Library of Congress control, 2014, pp 119-134.
4. National Asphalt Pavement Association. Designing and Constructing SMA Mixtures State of the Practice. Quality Improvement Series 122. NAPA, 57 P.
5. Norma Española. Mezclas bituminosas, Especificaciones de material, Parte 5: Mezclas bituminosas de tipo SMA. UNE-EN 13108-5. Noviembre 20007. 32 P.
6. Norma Española. Mezclas bituminosas, Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 24: Resistencia a la fatiga. UNE-EN 12697-24, Diciembre 2017. 57 P.
7. Manual de Carreteras, Ministerio de Obras Públicas, Volumen N°8 especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control, edición 2018, Chile, 2018, pp 329-735.
8. Lobos Cuevas, Vanessa Sonia. "Estudio de comportamiento a fatiga de mezclas SMA de Autopista Central y Autopista del Maipo". Memoria (Construcción Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2016. 81 h.
9. Vázquez Zamora, Andrés Ruperto. "Resistencia a fatiga de mezcla SUPERPAVE envejecida a corto plazo". Memoria (Construcción Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2016, 96 h.
10. Marín Gaete, Esteban Daniel. "Caracterización del desempeño a fatiga mediante el enfoque fenomenológico y de disipación de energía de mezclas asfálticas Chilenas". Memoria (Ing. Civil y Magister en Ciencias de la Ing. Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2013. 119 h.
11. Miranda Rebolledo, Ricardo Javier. "Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos". Tesis (Ingeniero Constructor). Valdivia. UACH, Escuela de Construcción Civil, 2010, 85 h.
12. Barrera Cervantes, Carlos Eduardo. "Diseño y construcción de pavimentos tipo Stone Mastic Asphalt en México". C.F. México. UNAM, Tesis (Maestro en ingeniería), Facultad de Ingeniería, 2008, 191 h.
13. Jorge Silva Friderichsen (Estudios de innovación, determinación de grado de desempeño PG en cementos asfálticos). Santiago. Ministerio de Obras Públicas, Publicación Laboratorio Nacional 2015, 20 h.
14. Wahr C., Apuntes Curso Ingeniería Vial, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, 2010.
15. Dirección de explotación, Gerencia Técnica, Documentación - Especificaciones Técnicas Reparación de Pavimentos, Abertis Chile, Noviembre 2017, pp. 151.
16. Dessouky, S., C. Reyes, M. Ilias, D. Contreras y A.T. Papagiannakis, 2011. Effect of pre-heating duration and temperature conditioning on the rheological properties of bitumen. Const. Build. Mat., 25(6), pp. 2785-2792.

ANEXOS.

A. Datos obtenidos del ensayo a fatiga.

Tabla A-1: Resumen datos registrados para probeta P1, ensayada a 500 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P1)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	771,92	0,00026258	1674672	0,00049757	3365723000	37,30	1,59	152,23
200	736,24	0,00026190	1597270	0,00049627	3218567000	38,35	1,55	311,60
300	717,48	0,00026384	1556579	0,00049995	3113451000	38,93	1,54	467,08
400	700,83	0,00026376	1520444	0,00049980	3042126000	39,36	1,51	620,22
500	688,43	0,00026452	1493551	0,00050124	2979721000	39,47	1,50	771,35
1000	643,81	0,00026307	1396736	0,00049849	2801944000	40,79	1,43	1504,18
2000	596,73	0,00026340	1294612	0,00049912	2593777000	41,57	1,35	2891,59
4000	547,90	0,00026320	1188660	0,00049873	2383350000	42,93	1,27	5502,64
6000	518,45	0,00026288	1124774	0,00049814	2257958000	43,52	1,21	7985,67
8000	498,50	0,00026474	1081488	0,00050165	2155868000	43,97	1,18	10375,04
10000	481,37	0,00026542	1044326	0,00050294	2076426000	44,20	1,15	12685,47
20000	445,35	0,00026446	966191	0,00050112	1928054000	44,97	1,08	23764,39
30000	423,89	0,00026259	919621	0,00049758	1848174000	45,18	1,02	34276,38
39218	408,93	0,00026587	887178	0,00050380	1760973000	45,66	1,00	43613,39

Tabla A-2: Resumen datos registrados para probeta P2, ensayada a 750 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P2)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	1149,04	0,0004055	2513750	0,0007533	3336827000	40,13	3,83	382,75
200	1061,05	0,0004054	2321255	0,0007531	3082098000	41,48	3,64	758,80
300	1002,64	0,0004061	2193462	0,0007545	2907353000	42,11	3,49	1115,05
400	959,01	0,0004042	2098012	0,0007510	2793723000	42,73	3,36	1457,55
500	928,44	0,0004040	2031137	0,0007505	2706382000	43,07	3,27	1788,96
1000	834,95	0,0004049	1826621	0,0007522	2428212000	44,27	3,01	3350,26
2000	734,69	0,0004049	1607279	0,0007522	2136762000	45,59	2,71	6185,06
4000	636,12	0,0004048	1391625	0,0007521	1850326000	47,21	2,41	11258,43
4479	614,34	0,0004037	1343979	0,0007499	1792150000	47,79	2,35	12395,36

Tabla A-3: Resumen datos registrados para probeta P3, ensayada a 500 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P3)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	929,53	0,0002604	1851617	0,0005031	3680420000	36,15	1,73	166,03
200	883,22	0,0002591	1759367	0,0005006	3514617000	37,21	1,67	336,64
300	853,60	0,0002593	1700362	0,0005010	3394050000	37,73	1,64	502,26
400	834,37	0,0002593	1662059	0,0005010	3317561000	37,87	1,61	664,65
500	816,74	0,0002589	1626944	0,0005003	3252025000	38,29	1,58	823,70
1000	770,49	0,0002583	1534809	0,0004991	3075053000	39,28	1,52	1598,88
2000	719,38	0,0002587	1433002	0,0004999	2866655000	40,26	1,45	3082,19
4000	667,47	0,0002598	1329601	0,0005020	2648716000	41,16	1,38	5896,45
10000	587,89	0,0002589	1171080	0,0005002	2341202000	43,00	1,26	13724,30
20000	540,77	0,0002588	1077204	0,0005000	2154437000	43,66	1,17	25809,40
30000	511,97	0,0002589	1019844	0,0005002	2038691000	43,69	1,11	37173,42
40000	491,53	0,0002591	979136	0,0005006	1956117000	43,50	1,06	48049,39
42109	488,46	0,0002596	973016	0,0005016	1939710000	43,39	1,05	50277,71

Tabla A-4: Resumen datos registrados para probeta P4, ensayada a 750 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P4)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	1250,05	0,0003920	2528403	0,0007574	3338351000	39,18	3,80	373,00
200	1158,26	0,0003913	2342750	0,0007560	3098883000	40,26	3,60	743,76
300	1100,23	0,0003905	2225373	0,0007545	2949586000	40,98	3,46	1095,87
400	1057,28	0,0003894	2138493	0,0007523	2842644000	41,58	3,35	1435,71
500	1022,13	0,0003891	2067398	0,0007518	2749962000	41,97	3,27	1766,25
600	998,62	0,0003890	2019845	0,0007515	2687604000	42,20	3,20	2089,58
700	979,61	0,0003895	1981404	0,0007526	2632693000	42,54	3,17	2407,39
800	960,39	0,0003916	1942536	0,0007566	2567420000	42,80	3,14	2720,96
900	938,37	0,0003885	1897996	0,0007506	2528591000	43,07	3,06	3028,71
1000	921,39	0,0003879	1863638	0,0007494	2486834000	43,26	3,01	3332,20
2000	804,44	0,0003885	1627097	0,0007505	2167943000	44,69	2,70	6172,18
4000	683,19	0,0003896	1381854	0,0007527	1835894000	46,52	2,37	11196,71
4348	665,55	0,0003879	1346165	0,0007495	1796007000	46,70	2,31	12008,67

Tabla A-5: Resumen datos registrados para probeta P5, ensayada a 500 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P5)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	693,65	0,0002617	1403010,00	0,0005057	2774477000	40,04	1,43	138,77
200	654,62	0,0002602	1324068,00	0,0005027	2633690000	40,75	1,37	279,23
300	636,91	0,0002602	1288244,00	0,0005027	2562491000	41,35	1,34	414,39
400	622,70	0,0002595	1259498,00	0,0005014	2512139000	41,68	1,32	547,14
500	611,11	0,0002590	1236058,00	0,0005004	2470327000	41,79	1,29	677,67
1000	586,15	0,0002588	1185568,00	0,0005000	2371038000	42,58	1,26	1313,54
2000	559,85	0,0002592	1132386,00	0,0005008	2261234000	42,94	1,21	2539,88
4000	534,75	0,0002581	1081612,00	0,0004986	2169284000	43,36	1,16	4915,51
6000	526,03	0,0002596	1063967,00	0,0005016	2121235000	43,69	1,16	7236,13
8000	520,30	0,0002590	1052383,00	0,0005005	2102799000	43,66	1,14	9524,00
10000	515,65	0,0002587	1042974,00	0,0004999	2086510000	43,91	1,14	11804,31
50000	457,96	0,0002583	926297,90	0,0004991	1855846000	43,92	1,01	54589,71
100000	410,70	0,0002587	830693,50	0,0004998	1662110000	44,25	0,91	102615,20
146475	363,11	0,0002603	734447,20	0,0005029	1460367000	45,11	0,82	142900,80

Tabla A-6: Resumen datos registrados para probeta P6, ensayada a 750 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P6)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	1183,39	0,0004064	2549659	0,0007550	3377102000	38,53	3,77	374,69
200	1100,79	0,0004063	2371710	0,0007548	3141976000	39,90	3,61	746,21
300	1048,54	0,0004056	2259129	0,0007535	2998040000	40,65	3,48	1100,51
500	970,66	0,0004045	2091341	0,0007515	2783020000	41,81	3,29	1778,11
1000	872,30	0,0004035	1879411	0,0007496	2507097000	43,21	3,03	3355,29
2000	765,08	0,0004038	1648396	0,0007502	2197237000	44,78	2,74	6232,83
4000	653,41	0,0004040	1407793	0,0007505	1875747000	46,86	2,42	11344,14
4569	632,17	0,0004057	1362049	0,0007538	1806965000	47,04	2,36	12697,22

Tabla A-7: Resumen datos registrados para probeta P7, ensayada a 250 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P7)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	568,42	0,0001321	1186219,00	0,0002552	4649052000	31,30	0,49	44,51
500	527,52	0,0001296	1100855,00	0,0002503	4397448000	32,66	0,47	233,94
50000	412,59	0,0001300	861017,80	0,0002512	3427645000	37,16	0,41	20820,23
100000	390,09	0,0001305	814068,80	0,0002520	3229819000	37,24	0,39	40338,54
200000	366,27	0,0001288	764356,20	0,0002489	3070790000	37,64	0,37	77596,94
400000	340,94	0,0001291	711489,00	0,0002494	2852818000	37,65	0,34	148651,50
800000	331,63	0,0001286	692063,90	0,0002485	2784970000	38,49	0,34	285951,50
1000000	328,46	0,0001302	685447,10	0,0002515	2725677000	38,64	0,34	353759,60
1500000	318,85	0,0001303	665386,40	0,0002518	2642985000	39,51	0,33	520299,20
2000000	307,63	0,0001293	641987,10	0,0002497	2570624000	39,73	0,32	682937,00
2500000	296,72	0,0001290	619212,60	0,0002492	2485204000	40,08	0,31	840228,60
3000000	285,09	0,0001292	594949,80	0,0002495	2384324000	39,84	0,30	993109,10
3102638	283,37	0,0001310	591362,40	0,0002531	2336878000	39,52	0,30	1023640,00

Tabla A-8: Resumen datos registrados para probeta P8, ensayada a 250 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P8)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	621,39	0,0001333	1296741	0,0002576	5034019000	29,66	0,52	42,39
500	597,71	0,0001296	1247326	0,0002504	4980570000	31,74	0,52	239,74
50000	417,57	0,0001303	871417	0,0002517	3462349000	35,23	0,40	20566,01
100000	407,09	0,0001285	849539	0,0002483	3421501000	37,29	0,40	40904,07
200000	390,13	0,0001295	814139	0,0002503	3253041000	37,68	0,39	80715,20
400000	366,68	0,0001287	765209	0,0002487	3076833000	38,41	0,37	156904,20
600000	350,91	0,0001296	732295	0,0002505	2923520000	38,63	0,36	229486,40
800000	335,35	0,0001294	699834	0,0002499	2800309000	38,76	0,34	299850,80
1000000	324,25	0,0001307	676661	0,0002525	2679884000	38,65	0,34	367015,40
1042562	313,84	0,0001306	654931	0,0002522	2596412000	38,97	0,33	380885,60

Tabla A-9: Resumen datos registrados para probeta P9, ensayada a 250 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P9)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	575,24	0,0001339	1191259	0,0002538	4693743000	30,98	0,49	40,97
200	551,61	0,0001310	1142316	0,0002483	4601271000	31,04	0,46	87,89
300	548,01	0,0001325	1134873	0,0002511	4519822000	31,27	0,46	133,32
400	533,83	0,0001330	1105508	0,0002519	4387921000	30,45	0,44	178,49
500	529,87	0,0001325	1097305	0,0002511	4370013000	31,12	0,45	222,65
10000	435,59	0,0001321	902055	0,0002504	3602754000	33,77	0,39	4102,63
50000	380,82	0,0001314	788637	0,0002489	3168043000	35,22	0,36	19023,78
100000	363,44	0,0001328	752644	0,0002517	2990495000	36,02	0,35	36744,07
200000	340,50	0,0001314	705131	0,0002490	2832175000	36,65	0,33	70796,32
300000	329,14	0,0001320	681618	0,0002501	2725002000	37,10	0,32	103689,40
400000	325,73	0,0001316	674553	0,0002493	2705784000	37,55	0,32	136001,80
500000	316,92	0,0001324	656296	0,0002510	2614964000	37,78	0,32	167892,90
600000	315,77	0,0001326	653927	0,0002513	2602417000	37,81	0,32	199346,70
700000	305,38	0,0001312	632398	0,0002487	2543018000	38,09	0,30	230362,60
800000	302,71	0,0001315	626877	0,0002492	2515299000	37,93	0,30	260821,30
900000	301,50	0,0001323	624376	0,0002508	2489930000	38,25	0,30	291016,80
998079	293,99	0,0001333	608808	0,0002527	2409546000	38,17	0,30	320429,20

Tabla A-10: Resumen datos registrados para probeta P10, ensayada a 400 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P10)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	821,63	0,0002098	1714624	0,0004054	4229749000	32,78	1,18	107,84
200	785,30	0,0002094	1638809	0,0004046	4050680000	33,62	1,15	223,42
300	760,85	0,0002085	1587777	0,0004028	3941977000	34,21	1,13	336,95
400	743,19	0,0002089	1550931	0,0004035	3843520000	34,53	1,11	448,91
500	733,59	0,0002078	1530898	0,0004014	3813953000	34,89	1,10	559,69
5000	575,09	0,0002072	1200134	0,0004003	2998361000	38,36	0,94	5047,50
10000	531,78	0,0002081	1109742	0,0004021	2760024000	39,61	0,89	9592,90
20000	483,19	0,0002096	1008344	0,0004049	2490102000	40,67	0,84	18072,50
30000	458,41	0,0002054	956645	0,0003969	2410069000	41,09	0,78	26146,97
40000	446,37	0,0002078	931518	0,0004014	2320547000	41,51	0,78	33971,65
50000	429,75	0,0002073	896833	0,0004006	2238850000	41,47	0,75	41553,83
56135	423,76	0,0002087	884322	0,0004032	2193342000	41,46	0,74	46096,14

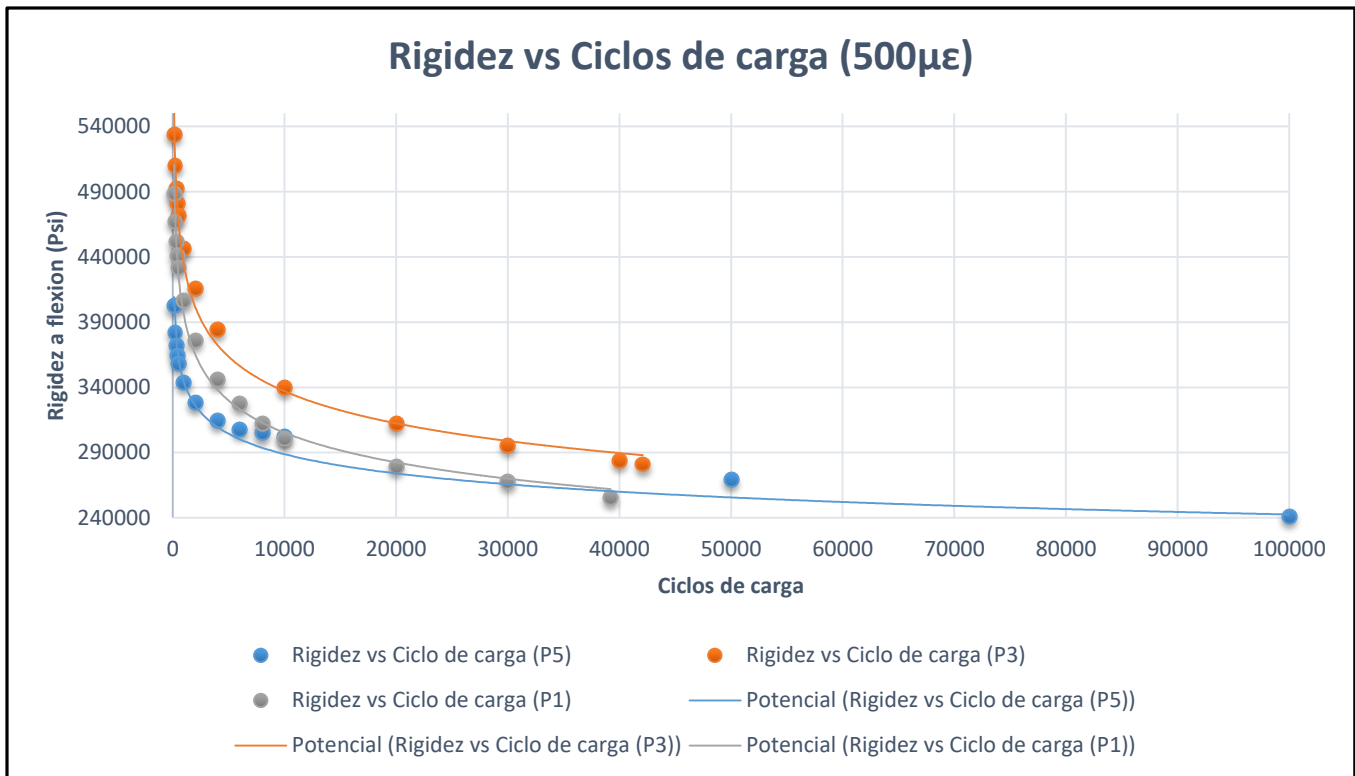
Tabla A-11: Resumen datos registrados para probeta P11, ensayada a 400 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P11)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	895,49	0,0002128	1882978	0,0004032	4670245000	31,75	1,25	116,94
200	858,81	0,0002113	1805852	0,0004004	4510372000	32,47	1,22	240,16
300	845,13	0,0002110	1777080	0,0003997	4445581000	32,99	1,22	362,04
400	832,89	0,0002111	1751362	0,0004000	4378341000	33,40	1,21	483,95
500	819,89	0,0002119	1724024	0,0004016	4292838000	33,72	1,21	604,79
1000	783,17	0,0002111	1646812	0,0004000	4116733000	34,65	1,18	1197,12
2000	733,93	0,0002113	1543263	0,0004003	3855281000	35,88	1,14	2347,83
4000	687,22	0,0002111	1445052	0,0004001	3612034000	37,13	1,10	4560,83
6000	652,48	0,0002112	1371988	0,0004002	3428070000	37,84	1,06	6705,71
8000	627,99	0,0002105	1320509	0,0003990	3309940000	38,29	1,03	8788,49
10000	608,05	0,0002120	1278568	0,0004017	3183091000	38,80	1,01	10821,93
20000	563,18	0,0002108	1184222	0,0003995	2964390000	39,81	0,95	20565,85
40000	528,46	0,0002107	1111208	0,0003993	2783023000	40,79	0,91	39123,50
60000	507,13	0,0002107	1066357	0,0003993	2670782000	41,40	0,88	57007,65
80000	484,54	0,0002111	1018854	0,0004000	2546865000	41,45	0,85	74345,11
100000	472,32	0,0002110	993157	0,0003998	2483895000	41,83	0,83	91256,75
119535	459,64	0,0002119	966501	0,0004015	2407318000	41,62	0,81	107325,10

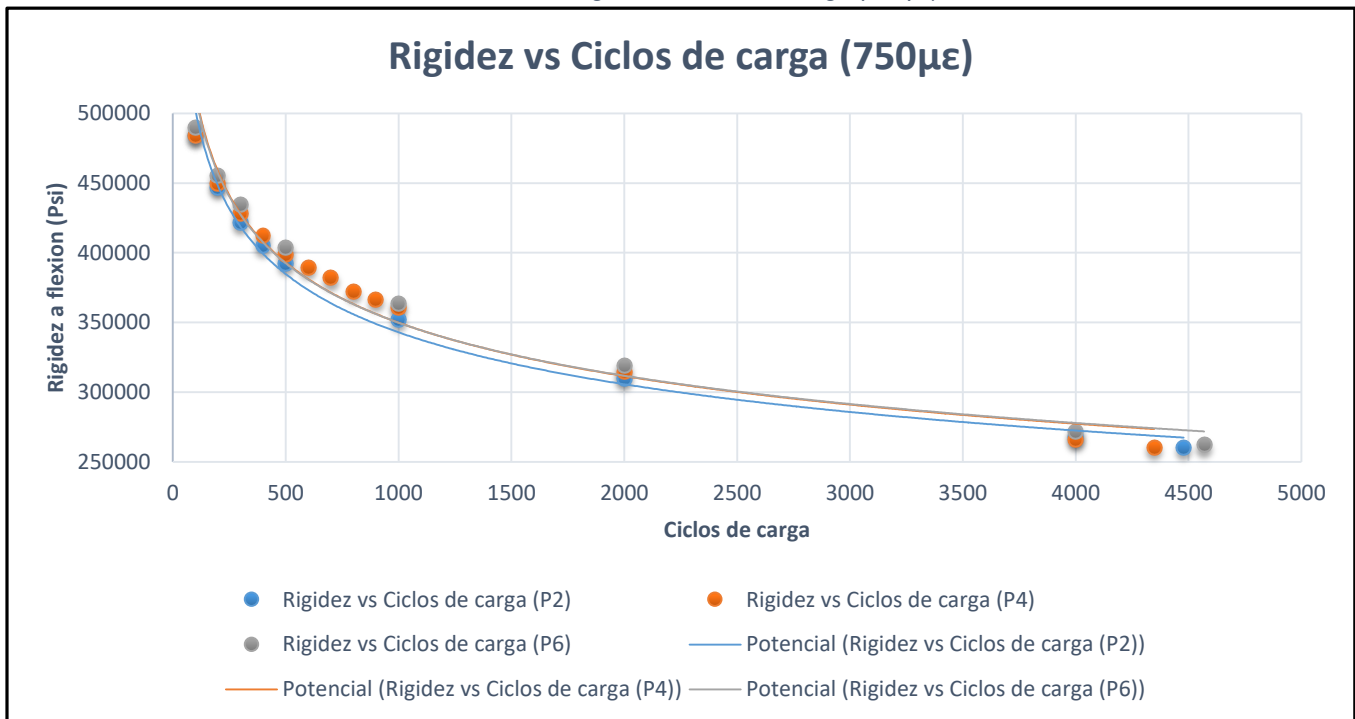
Tabla A-12: Resumen datos registrados para probeta P12, ensayada a 400 $\mu\epsilon$.

Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015) (P12)								
Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga [m]	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]
100	1119,23	0,0003022	2738330	0,0004103	6674051000	34,44	2,00	182,83
200	1038,11	0,0002979	2539855	0,0004044	6280392000	35,40	1,87	374,28
300	997,85	0,0002964	2441354	0,0004024	6066481000	36,12	1,82	557,99
400	964,44	0,0002940	2359622	0,0003991	5912135000	37,17	1,79	738,50
500	946,71	0,0002956	2316226	0,0004013	5771145000	37,49	1,78	916,94
1000	868,51	0,0002955	2124896	0,0004011	5297514000	38,42	1,66	1770,43
2000	796,90	0,0002943	1949699	0,0003996	4879497000	39,93	1,57	3389,99
4000	711,36	0,0002948	1740418	0,0004003	4348105000	41,72	1,46	6407,20
6000	657,93	0,0002946	1609707	0,0003999	4024815000	42,65	1,37	9225,65
8000	622,13	0,0002946	1522115	0,0004000	3805310000	43,07	1,31	11907,02
10000	593,97	0,0002947	1453208	0,0004001	3632543000	43,51	1,26	14475,38
10924	583,67	0,0002951	1428004	0,0004007	3564019000	43,66	1,24	15630,18

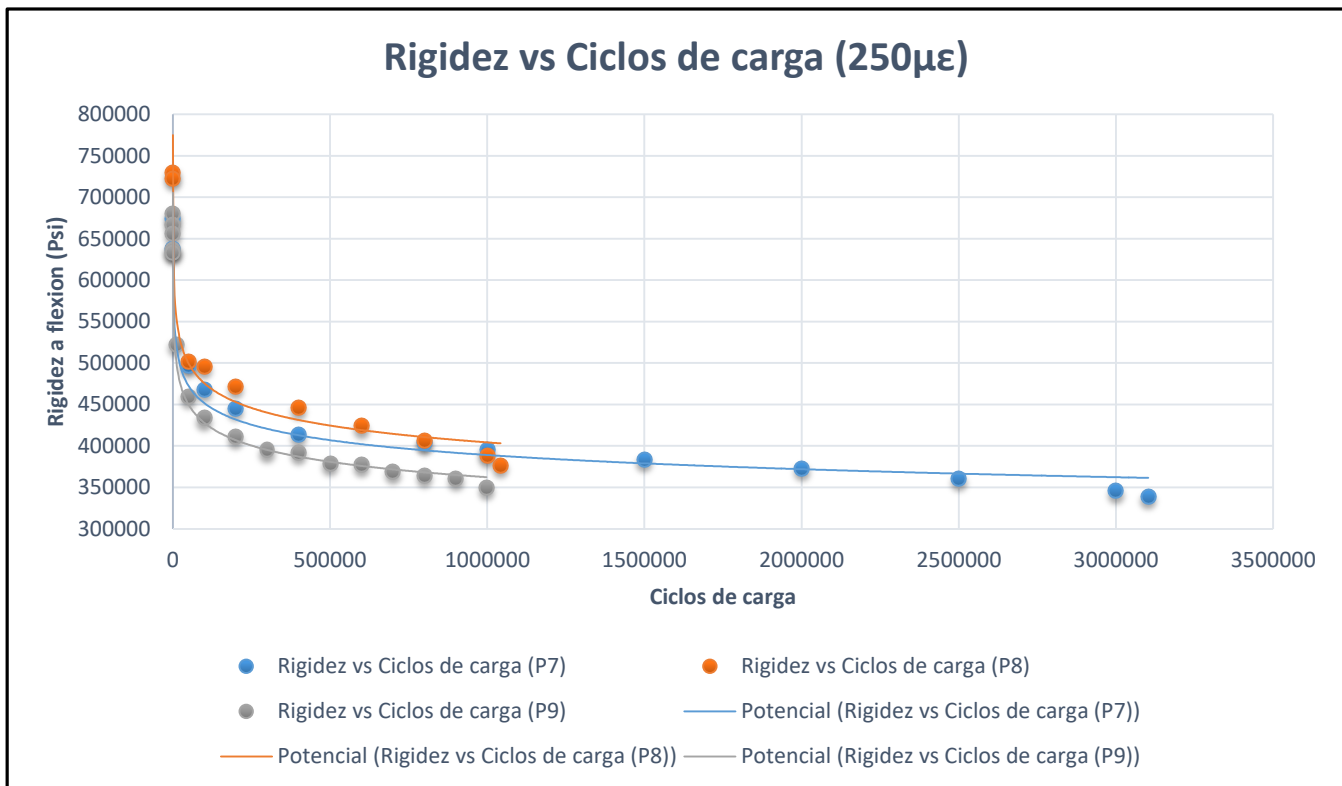
B. Gráficos obtenidos en base al ensayo de fatiga.



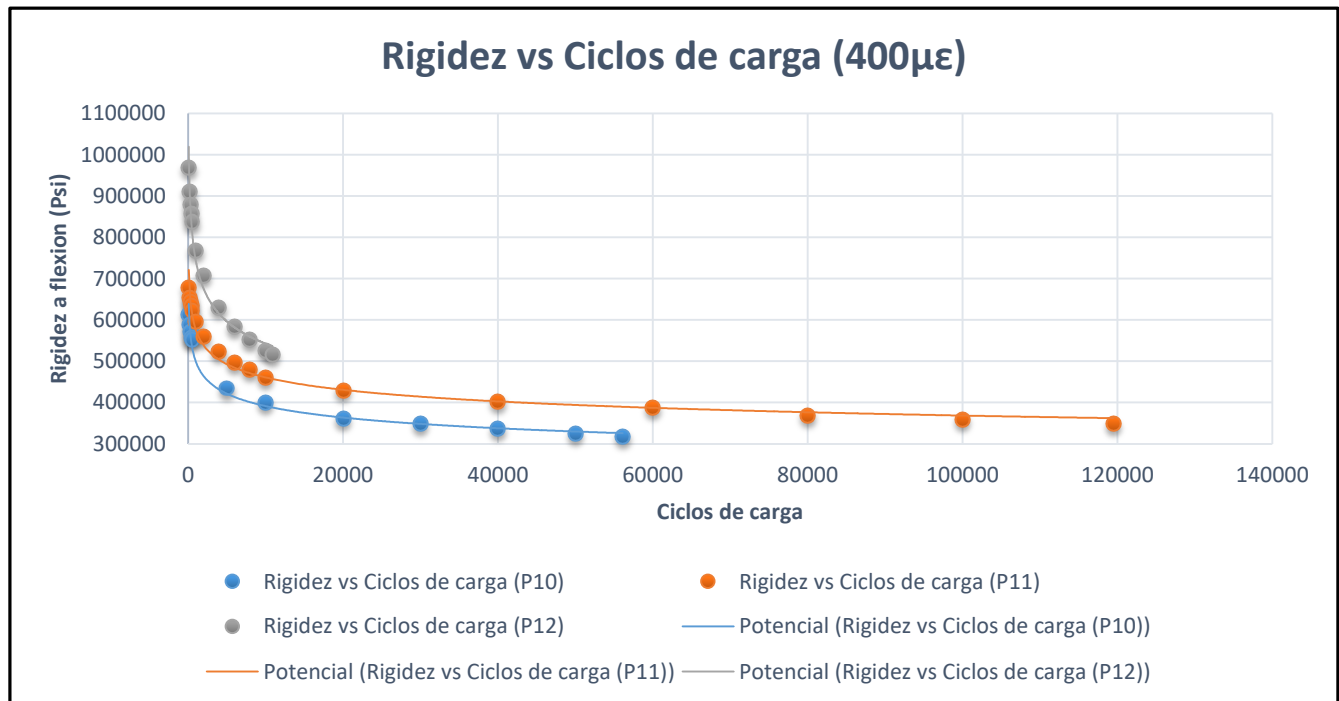
Grafica B-0-1: Rigidez vs Ciclos de carga (500 $\mu\epsilon$).



Grafica B-0-2: Rigidez vs Ciclos de carga (750 $\mu\epsilon$).

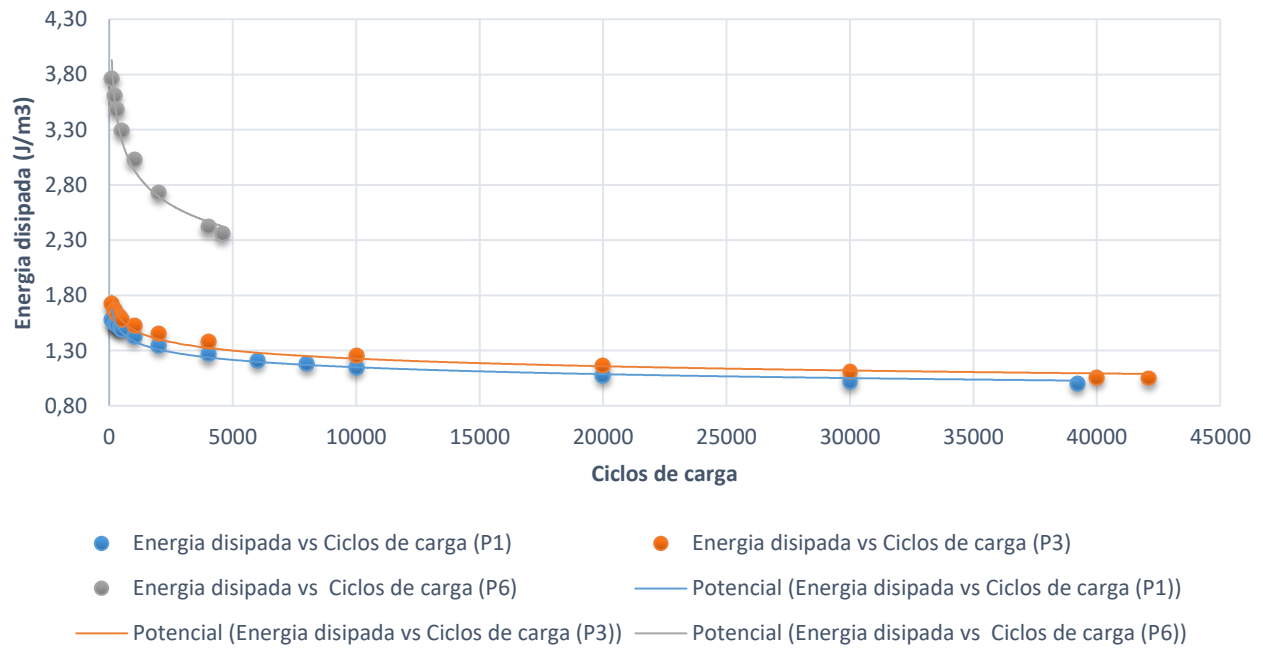


Grafica B-0-3: Rigidez vs Ciclos de carga (250με).



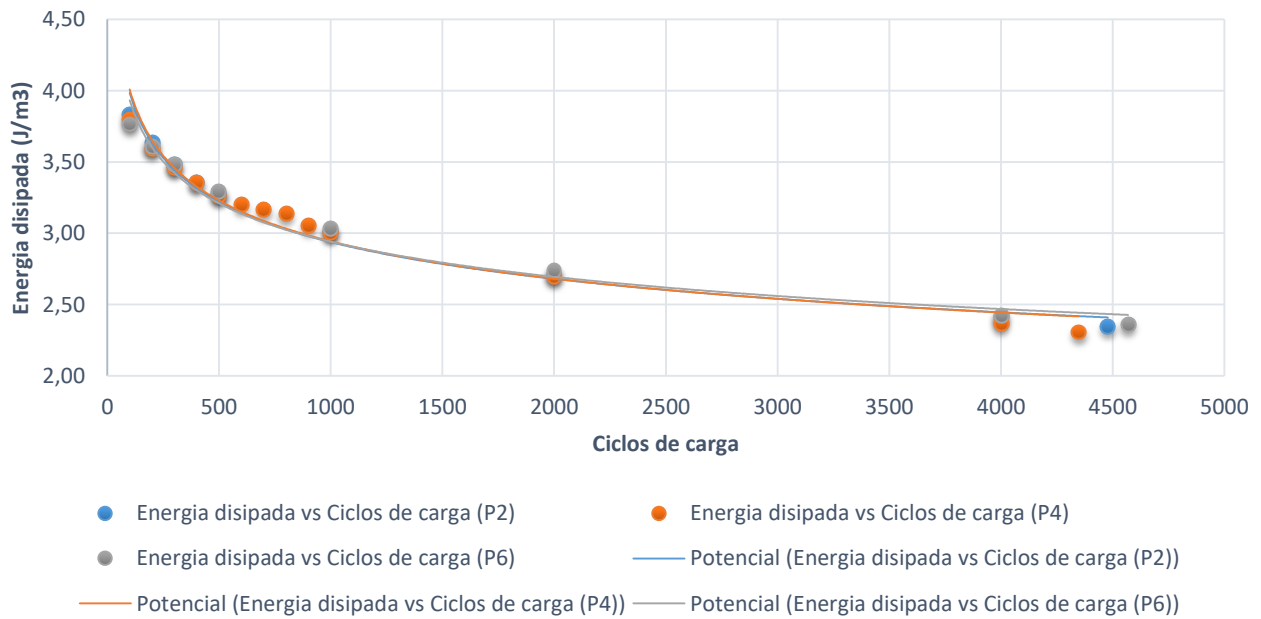
Grafica B-4: Rigidez vs Ciclos de carga (400με).

Energia disipada vs Ciclos de carga (500 $\mu\epsilon$)



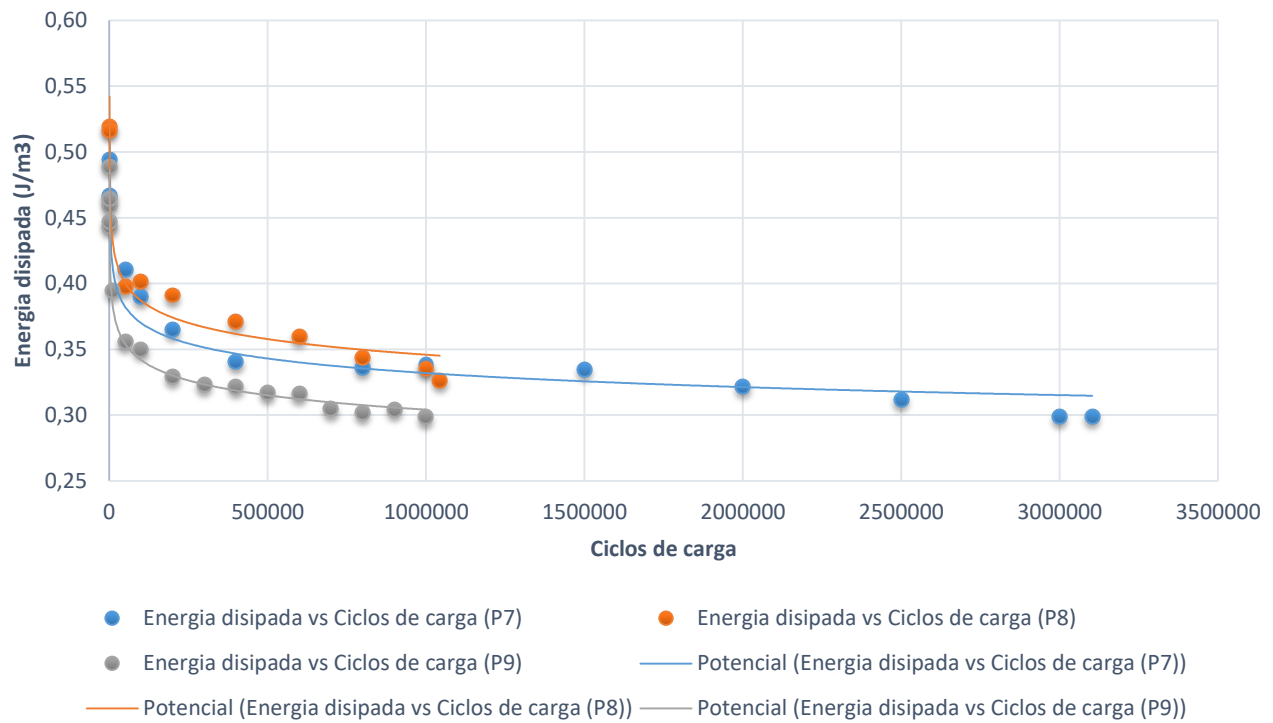
Grafica B-5: Rigidez vs Ciclos de carga (400 $\mu\epsilon$).

Energia disipada vs Ciclos de carga (750 $\mu\epsilon$)



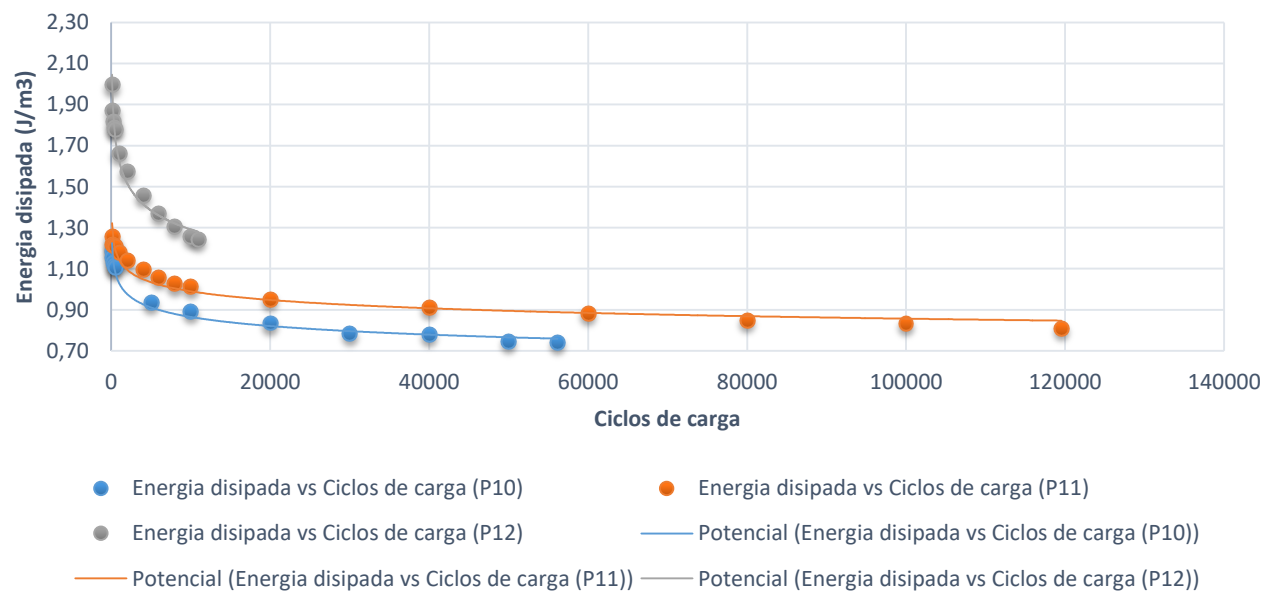
Grafica B-6: Rigidez vs Ciclos de carga (750 $\mu\epsilon$).

Energia disipada vs Ciclos de carga (250μ€)



Grafica B-7: Rigidez vs Ciclos de carga (250μ€).

Energia disipada vs Ciclos de carga (400μ€)



Grafica B-8: Rigidez vs Ciclos de carga (400μ€).

C. Datos arrojados por el equipo.

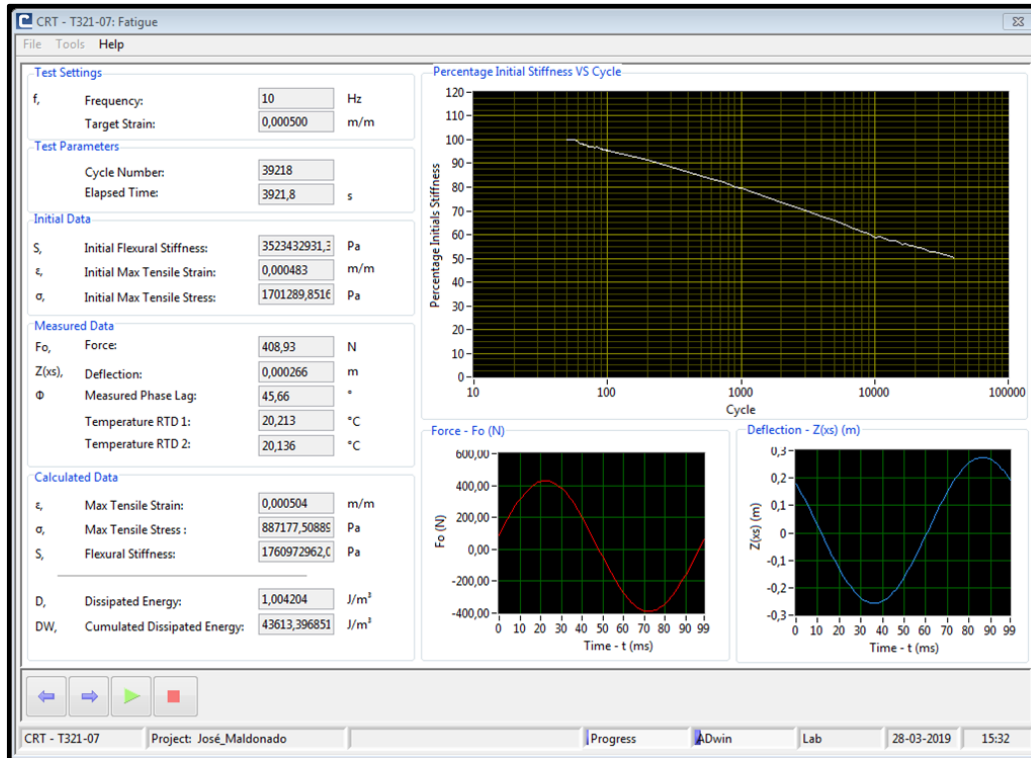


Figura C-1: Datos probeta 1.

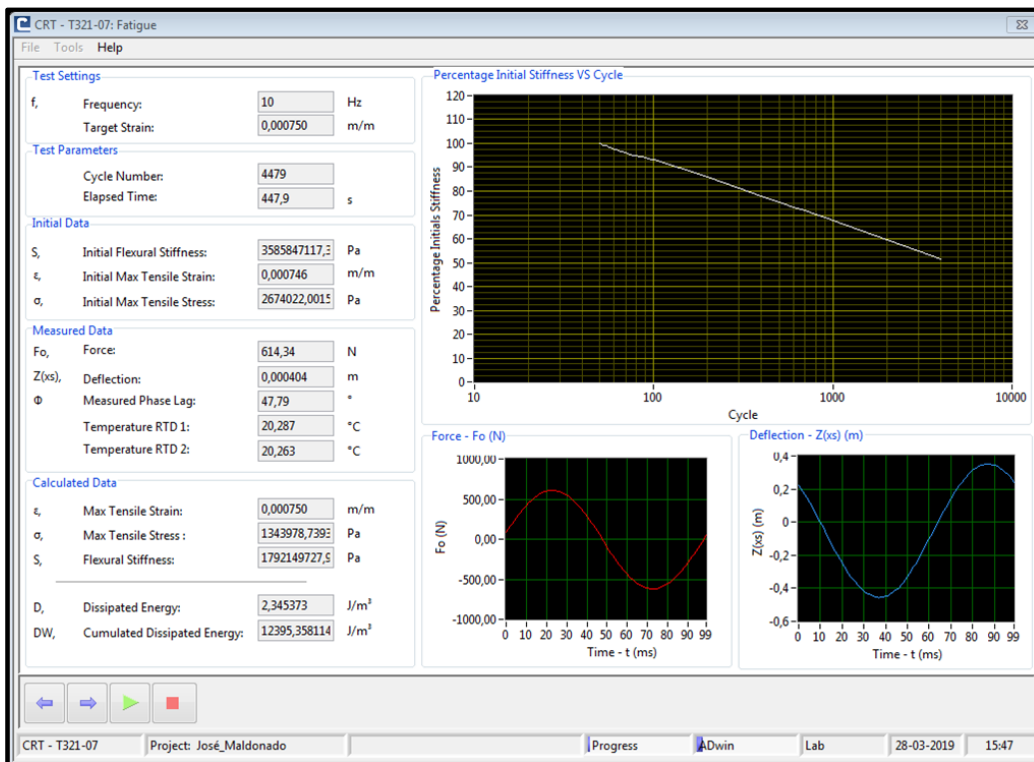


Figura C-2: Datos probeta 2.

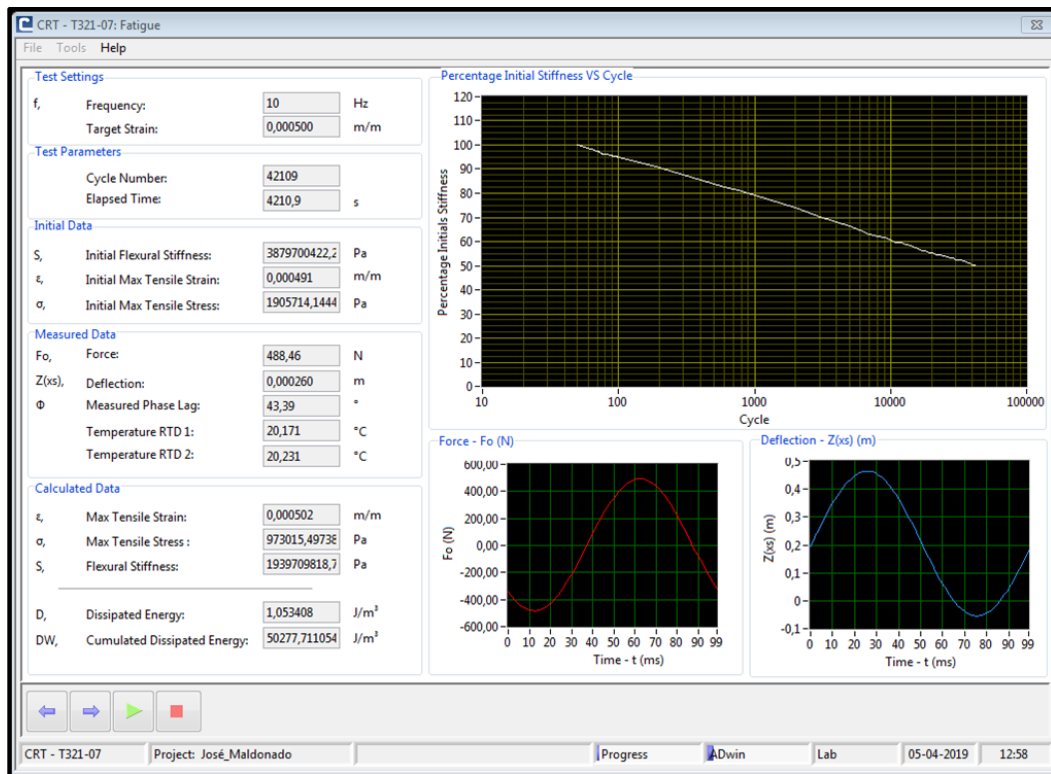


Figura C-3: Datos probeta 3.

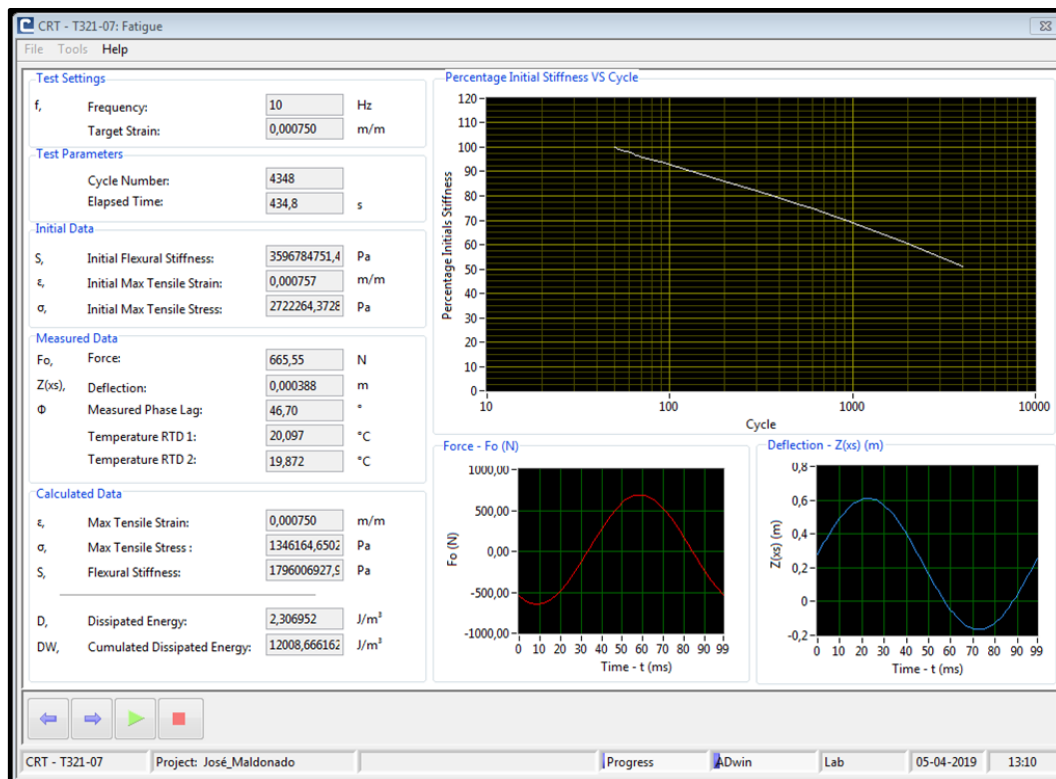


Figura C-4: Datos probeta 4.

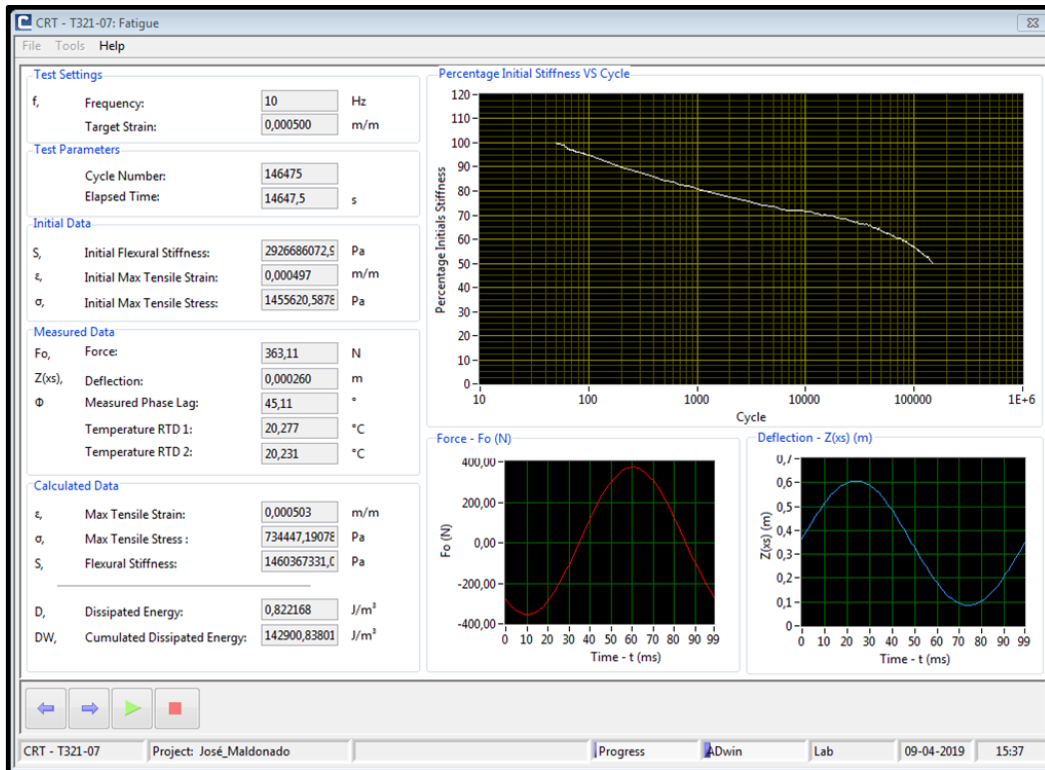


Figura C-5: Datos probeta 5.

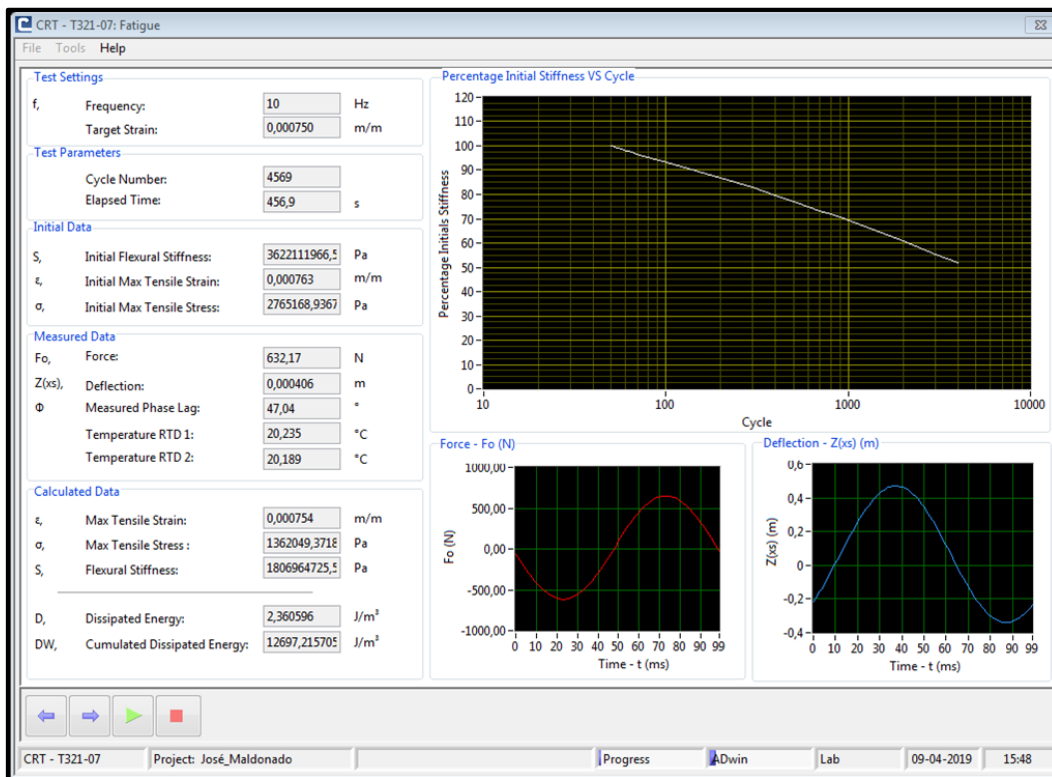


Figura C-6: Datos probeta 6.

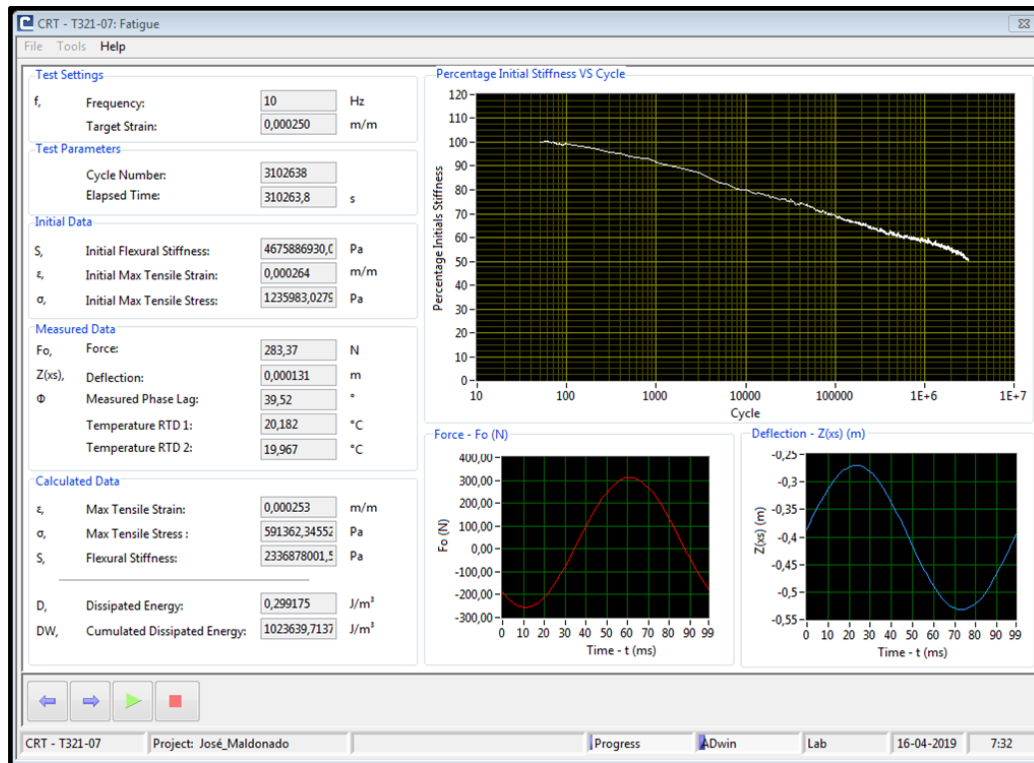


Figura C-7: Datos probeta 7.

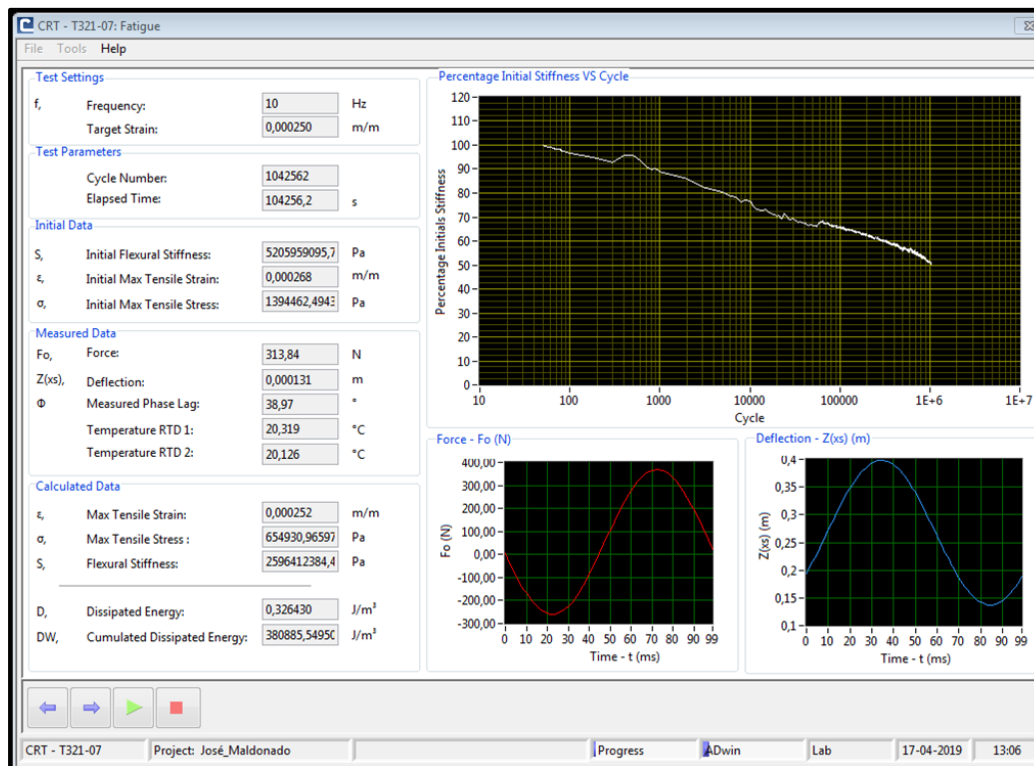


Figura C-8: Datos probeta 8.

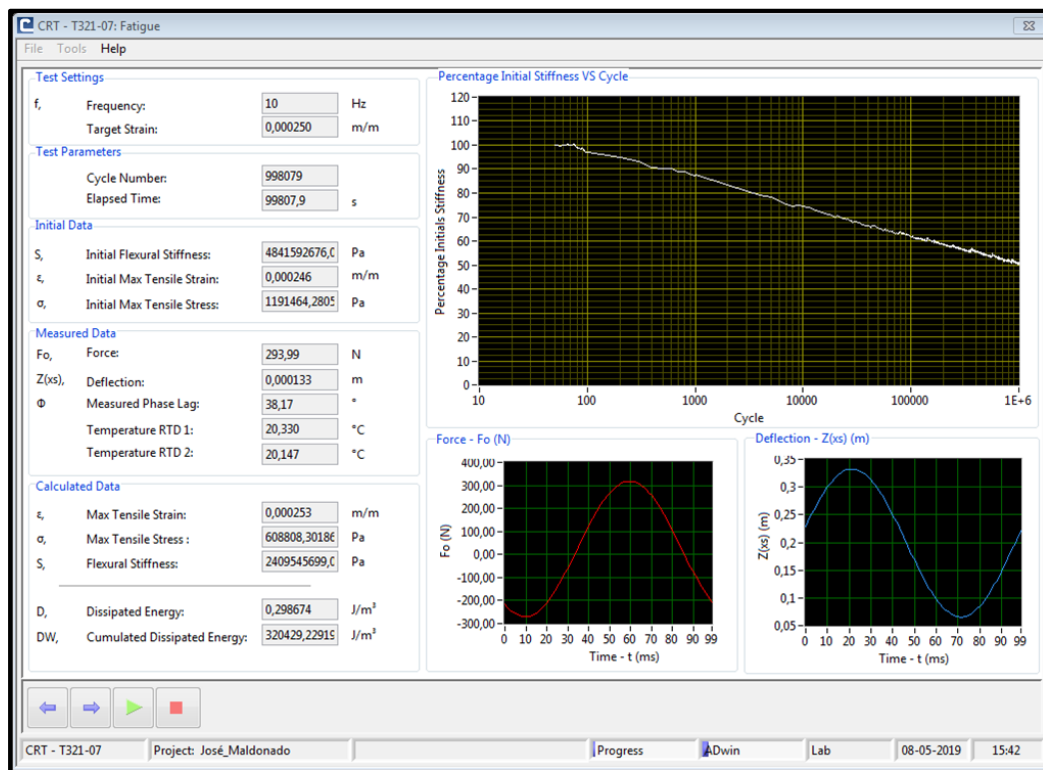


Figura C-9: Datos probeta 9.

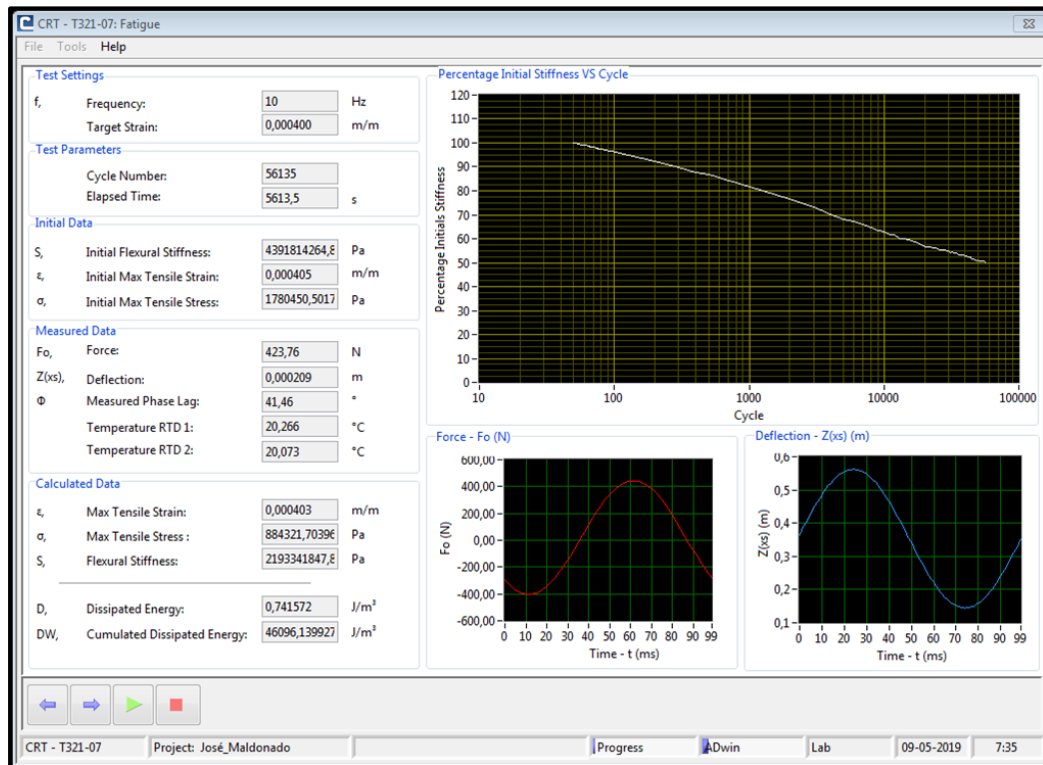


Figura C-10: Datos probeta 10.

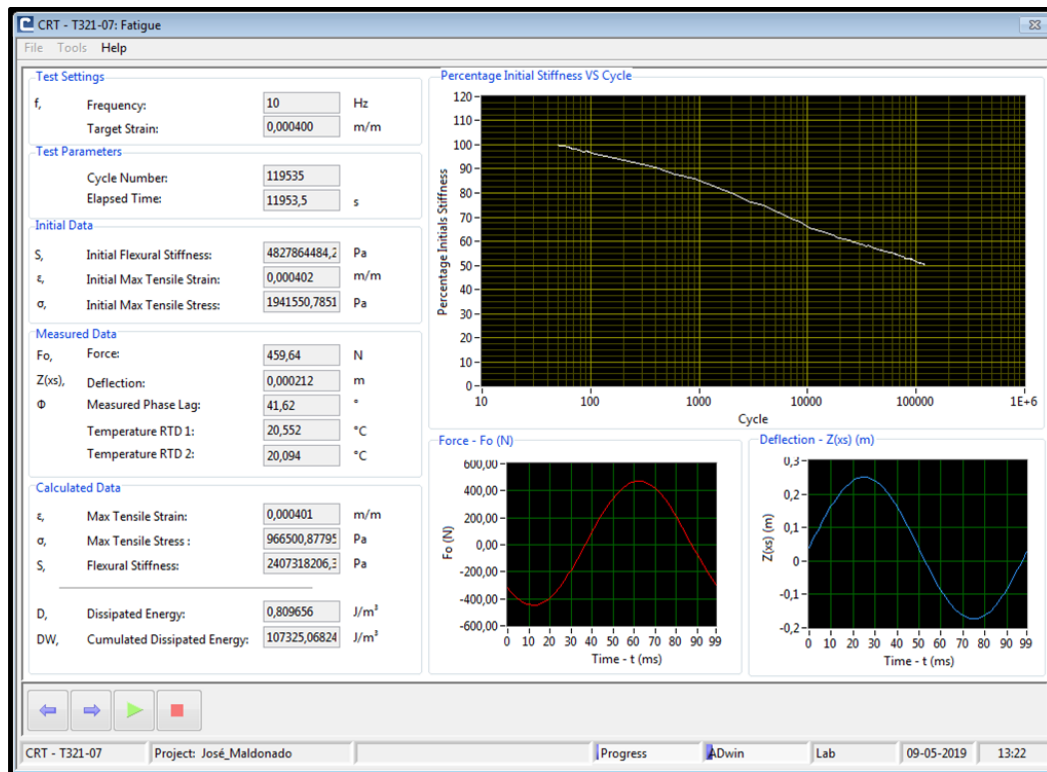


Figura C-11: Datos probeta 11.

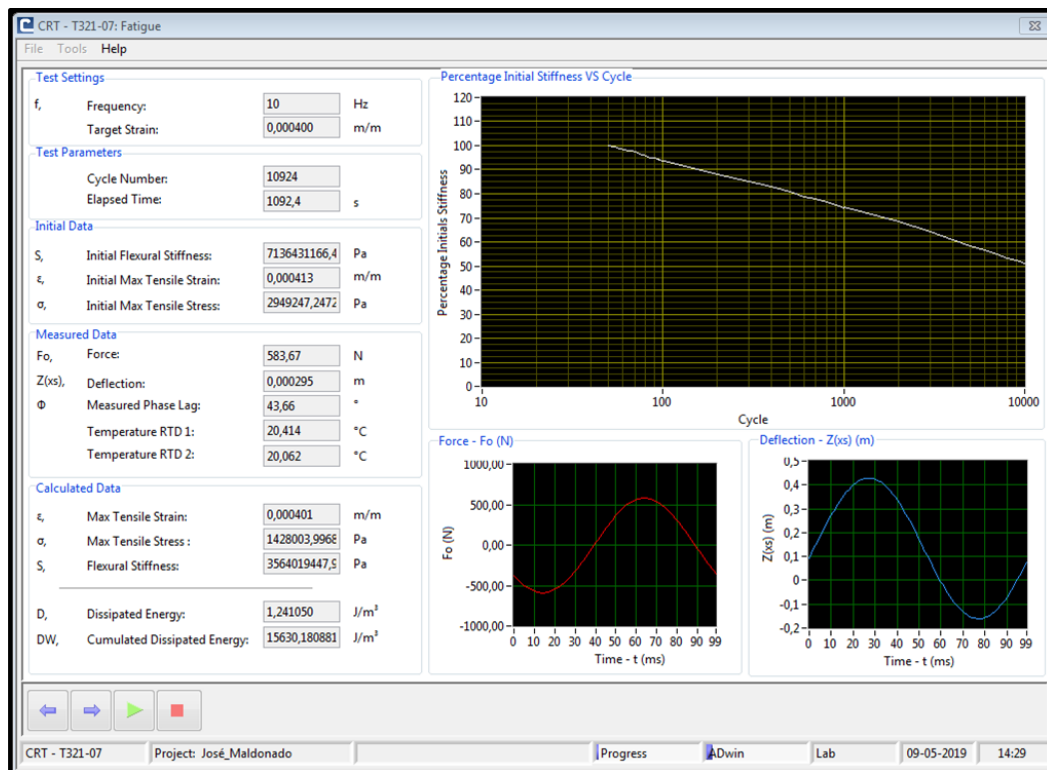


Figura C-12: Datos probeta 12.