

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**“RESISTENCIA A FATIGA DE MEZCLA SUPERPAVE ENVEJECIDA A CORTO
PLAZO”**

Memoria de titulación presentado por:
ANDRÉS RUPERTO VÁSQUEZ ZAMORA

Como requisito para optar al título de:
Constructor Civil

Profesor Guía
Carlos Wahr Daniel

RESUMEN EJECUTIVO

La presente memoria para optar al título de Constructor Civil, tiene por objetivo el diseño y análisis de desempeño de la mezcla asfáltica utilizada en una de las pistas de rodaje del aeropuerto Arturo Merino Benítez, ubicado en Santiago, en base al proyecto “Conservación rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Año 2016, Etapa I”. El proyecto se lleva a cabo en el departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María, haciendo uso de las dependencias y equipos de LEMCO (Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras). Como parte del proyecto se realiza la caracterización del comportamiento a fatiga de la mezcla diseñada acondicionada a un envejecimiento de corto plazo, proceso fundamental para garantizar su desempeño. El objetivo de este trabajo, es presentar los resultados obtenidos en ensayos de viga a flexión, cargada en cuatro puntos, a deformación controlada, con onda de carga de tipo sinusoidal, bajo una frecuencia de 10 [Hz] y a una temperatura de 20 [°C]. El criterio de falla utilizado en los ensayos, corresponde a la cantidad de ciclos requeridos para que la mezcla alcance una reducción de un 50% de su rigidez relativa a la rigidez inicial.

Los ensayos de viga a flexión se realizan sobre probetas prismáticas confeccionadas y cortadas en las dependencias de LEMCO, a partir de mezclas MAC (Mezcla Asfáltica en Caliente) extraídas de las pistas de prueba del aeropuerto Arturo Merino Benítez. Los ensayos se realizan para cuatro niveles de deformación y para cada uno de estos se ensayan tres probetas, por lo que se confecciona un total de 12 vigas, todas ellas acondicionadas a un envejecimiento en corto plazo. Durante la realización del proyecto se trabajó en conjunto con el memorista Nicolás Escobar Ramos, quien caracterizó el comportamiento a fatiga de la mezcla envejecida a largo plazo, con el fin de comparar los resultados con los obtenidos y presentados en la memoria “RESISTENCIA A FATIGA DE MEZCLA SUPERPAVE ENVEJECIDA A LARGO PLAZO, UTFSM, Valparaíso, 2017”

Para aplicar la metodología de diseño de la MAC, el material seleccionado corresponde a una combinación de bandas granulométricas cuyo tamaño máximo nominal (D_n) es de 19,0[mm] y un asfalto modificado con polímeros con una clasificación PG 82-22. Ambos materiales cumplen las especificaciones y criterios de diseño considerando lo establecido por SUPERPAVE.

Por otra parte, la caracterización de las curvas de fatiga, obtenidas a partir de los datos de los ensayos, fue realizada 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 $500\mu\epsilon$ (N500).

ABSTRACT

This thesis to obtain the title of Civil Constructor, has for main objective the volumetric design and performance analysis of the asphaltic mixture, which must be used in one of the taxiways of the Arturo Merino Benítez airport, located in Santiago, according to the "Routine Conservation of Arturo Merino Benítez Airport, year 2016, Stage I" project. The project is carried out at the Civil Works Department of the Federico Santa María Technical University, using the LEMCO (Essay Laboratory Materials and Construcción Control) equipment and facilities. As part of the project, it was made a study of the fatigue characterization of short-term conditioned mixture, which is fundamental in order to guarantee its performance. The aim of this thesis is to present the results obtained from beam tests in four point bending sinusoidal loading, without resting periods to constant strain, under a 10 [Hz] frequency and 20 [°C]. The failure criteria used in this test correspond to the load cycle at which the specimen exhibits a 50% reduction in stiffness relative to the initial stiffness.

This essay is made in beam specimens made and cut in LEMCO facilities, from MAC (Hot Mix Asphalt) samples extracted from one of the taxiways of Arturo Merino Benítez Airport. Test were made to four different levels of strain and for each strain three specimens were tested, for which twelve beams were made, all of them corresponding to short-term conditioned mixture. Alongside this project, the student Nicolás Escobar Ramos made a study of the fatigue characterization of long-term conditioned mixture. The purpose is to compare the results and data with those obtained in Nicolás Escobar's thesis (Nicolás Escobar, "Long-Term Aged Superpave Blend Fatigue Resistance", 2017).

To apply the volumetric mix design, the selected material is a combination of granulometric bands with a Nominal Maximum Size (D_n) of 19,0 [mm] and a performance-grade binder with a graduation of PG 82-22. Both materials meet the design requirements dictated by the SUPERPAVE methodology.

The description of the fatigue curves that were obtained from the data test, was made under a phenomenological approach from which is extracted the necessary strain levels for the mixture to fail when a million cycles (ϵ_6) are reached and the number of cycles reached until the failure at 500[$\mu\epsilon$] (N500) of strain.

GLOSARIO

BBR	:	Reómetro de viga de Flexión.
Cm	:	Centímetros.
DDT	:	Ensayo de Tracción Directa.
DP	:	Proporción de Polvo.
DSR	:	Reómetro de Corte Dinámico.
ESALs	:	Ejes Simples Equivalentes.
LEMCO	:	Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras.
FHWA	:	Administración Federal de Autopistas.
G	:	Gramos.
G_b	:	Gravedad Específica del Asfalto.
G_{mb}	:	<i>Gravedad Específica Bruta de la Mezcla Asfáltica Compactada.</i>
G_{mm}	:	Gravedad Específica Máxima de la Mezcla Asfáltica.
G_{sa}	:	Gravedad Específica Aparente.
G_{sb}	:	Gravedad Específica Neta.
G_{se}	:	Gravedad Específica Efectiva.
H	:	Hora.
Km	:	Kilómetros.
MAC	:	Mezcla Asfáltica en Caliente.
mm	:	Milímetros.
PG	:	Grado de Desempeño.
RTFO	:	Rolling Thin Film Oven.
RV	:	Viscosímetro Rotacional.
SGC	:	Compactador Giratorio SUPERPAVE.
SHRP	:	Strategic Highway Research Program.
SUPERPAVE	:	Superior Performing Asphalt Pavement.
UTFSM	:	Universidad Técnica Federico Santa María.
VA	:	Vacíos de aire.
VAM	:	Vacíos en el Agregado Mineral.
VFA	:	Vacíos llenos de asfalto.

ÍNDICE GENERAL

ABSTRACT	3
GLOSARIO.....	4
ÍNDICE GENERAL	5
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	11
1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 ANTECEDENTES GENERALES.....	12
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	13
1.2.1 Objetivos generales	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO	13
1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO	14
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	15
▪ Capítulo 1: Introducción	15
▪ Capítulo 2: Marco Teórico.....	15
▪ Capítulo 3: Método de diseño SUPERPAVE	15
▪ Capítulo 4: Parámetros Volumétricos de la Mezcla Asfáltica	15
▪ Capítulo 5: Análisis de resultados del diseño volumétrico de una mezcla SUPERPAVE	15
▪ Capítulo 6: Ensayo de Viga de Flexión en Cuatro Puntos.....	15
▪ Capítulo 7: Conclusiones	16
▪ Capítulo 8: Referencias bibliográficas	16
▪ Capítulo 9: Anexos.....	16
2 MARCO TEÓRICO	17
2.1 DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA	17
2.2 MÉTODO MARSHALL (1930'S).....	17
2.3 MÉTODO SUPERPAVE.....	18
2.4 DETERIOROS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	18
2.4.1 Deformación permanente.	18
2.4.2 Fisuración por fatiga.	20
2.4.3 Fisuración por baja temperatura.	21
3 MÉTODO DE DISEÑO SUPERPAVE	22
3.1 INTRODUCCIÓN.....	22

3.2	LIGANTES ASFÁLTICOS	22
3.3	SELECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO.....	24
3.3.1.	Efecto del tránsito: Velocidad de carga y nivel de tránsito	25
3.4	AGREGADO MINERAL	25
3.5	MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	28
4	PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	28
4.1	GRAVEDAD ESPECÍFICA	28
4.1.1	Gravedad Especifica de los Agregados	28
4.1.2	Gravedad Especifica del Ligante	30
4.1.3	Gravedad Especifica de Mezcla	30
4.2	ABSORCIÓN DE ASFALTO	31
4.3	CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO	31
4.4	VACÍOS DE AIRE (V _A)	32
4.5	VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VAM).....	32
4.6	VACÍOS LLENOS DE ASFALTO, VFA	32
4.7	DIAGRAMA DE COMPONENTES	33
5	ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DE UNA MEZCLA SUPERPAVE.....	34
5.1	SELECCIÓN DE MATERIALES	34
5.1.1	Selección del ligante.....	34
5.1.2	Selección del Agregado.....	36
5.2	SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE AGREGADO DE DISEÑO	42
5.2.1	Selección Granulométrica de las Mezclas de Pruebas	44
5.2.2	Contenido de ligante asfáltico de mezclas de prueba	50
5.3	ELABORACIÓN DE PROBETAS.....	52
5.3.1	Preparación de la mezcla	52
5.3.2	Fabricación de probetas	54
5.4	CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA DE DISEÑO.....	55
5.4.1	Selección de estructura de agregado de diseño	55
5.4.2	Selección del porcentaje de ligante asfáltico de diseño	63
6	ENSAYO DE FATIGA.....	69
6.1	MODOS DE CARGA EN UN ENSAYO A FATIGA	69
6.2	ENSAYO VIGA DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS	69
6.3	EQUIPAMIENTO.....	69
6.3.1	Compactador de Rodillo	69
6.3.2	Máquina de Viga a Flexión de 4 Puntos.....	69
6.4	PREPARACIÓN DE PROBETAS.....	69

6.4.1	Procedimiento Ensayo de Densidad	70
6.5	CONDICIONES DEL ENSAYO A FATIGA.....	71
6.6	APLICACIÓN ENFOQUE FENOMENOLÓGICO	73
6.7	RESULTADOS DE ENSAYO A FATIGA.....	74
6.8	ENFOQUE DE LA ENERGÍA DISIPADA	77
6.9	COMPARACIÓN ENTRE MAC ENVEJECIDA A CORTO PLAZO Y MAC ENVEJECIDA A LARGO PLAZO	77
7	CONCLUSIONES	80
8	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.	82
9	ANEXOS	84
9.1	SELECCIÓN DE ESTRUCTURA DEL AGREGADO.....	84
9.2	SELECCIÓN DE CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO.	89
9.3	EVALUACIÓN A LA SENSIBILIDAD A LA HUMEDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	95
9.4	DETERMINACION G_{MM} MUESTRA DE TERRENO	96
9.5	DATOS FATIGA.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Ahuellamiento de una subrasante débil.....	19
Figura 2-2: Ahuellamiento de una mezcla débil.....	19
Figura 2-3: Contribución del ligante asfáltico a la resistencia por corte de la mezcla.....	20
Figura 2-4: Contribución del agregado a la resistencia por corte de la mezcla.....	20
Figura 2-5: Fisuramiento por baja temperatura.....	21
Figura 3-1: Límites granulométricos SUPERPAVE para una mezcla de 12.5 [mm].....	27
Figura 4-1: Volumen Efectivo del Agregado.....	30
Figura 4-2: Diagrama de componentes de una mezcla MAC compactada. [4].....	33
Figura 5-1: Gráfico de granulometría de los agregados.....	37
Figura 5-2: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 1.....	45
Figura 5-3: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 2.....	46
Figura 5-4: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 3.....	47
Figura 5-5: Gráfica granulometría mezclas de pruebas.....	49
Figura 5-6: Dosificación de agregados pétreos.....	52
Figura 5-7: Incorporación de asfalto a la mezcla de agregados.....	53
Figura 5-8: Mezcla de ligante asfáltico y agregados.....	53
Figura 5-9: Colocación de mezcla sobre bandeja.....	54
Figura 5-10: Cantidad de Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico.....	66
Figura 5-11 Cantidad de Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico.....	67
Figura 5-12: Vacíos lleno con asfalto versus contenido de ligante asfáltico.....	67
Figura 5-13: Proporción de polvo versus contenido de ligante asfáltico.....	68
Figura 6-1: Curva de Fatiga MAC acondicionada a Corto Plazo.....	76
Figura 9-1: Densificación MP1.....	85
Figura 9-2: Densificación MP2.....	87
Figura 9-3: Densificación MP3.....	88
Figura 9-4: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 4,9%.....	90
Figura 9-5: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 5,4%.....	92
Figura 9-6: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 5,9%.....	93
Figura 9-7: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 6,4%.....	95
Figura 9-8: Rigidez v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 250 [μ€]).....	100
Figura 9-9: Rigidez v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 375 [μ€]).....	100
Figura 9-10: Rigidez v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 500 [μ€]).....	101
Figura 9-11: Rigidez v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 750 [μ€]).....	101
Figura 9-12: Energía Disipada v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 250 [μ€]).....	102
Figura 9-13: Energía Disipada v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 375 [μ€]).....	102
Figura 9-14: Energía Disipada v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 500 [μ€]).....	103
Figura 9-15: Energía Disipada v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 750 [μ€]).....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Grados de ligantes asfálticos SUPERPAVE [22].....	24
Tabla 3-2: Denominación de las mezclas SUPERPAVE.....	27
Tabla 5-1: Equipos para determinar propiedades físicas del asfalto. [5].....	35
Tabla 5-2: Resultado de ensayos exigidos sobre el ligante y su criterio de aceptabilidad.....	35
Tabla 5-3: Granulometría de los agregados.....	36
Tabla 5-4: Resultados ensayo de Gravedades Específicas.....	37
Tabla 5-5: Propiedades de Consenso y normativa asociada.....	38
Tabla 5-6: Requerimientos de Superpave para el ensayo de Angularidad del Agregado Grueso.....	38
Tabla 5-7: Resultados ensayo de Partículas Fracturadas.....	38
Tabla 5-8: Requerimientos de Superpave para el ensayo de angularidad del agregado fino.....	39
Tabla 5-9: Resultado ensayo de Vacíos de Aire.....	39
Tabla 5-10: Requerimiento SUPERPAVE para Partículas Chatas y Alargadas.....	40
Tabla 5-11: Resultados ensayo de Partículas Chatas y Alargadas.....	40
Tabla 5-12: Requerimiento SUPERPAVE para el Contenido de Arcilla.....	40
Tabla 5-13: Resultados ensayo de Equivalente de Arena.....	41
Tabla 5-14: Resultados de las propiedades de consenso.....	41
Tabla 5-15: Propiedades de origen y normativa asociada.....	42
Tabla 5-16: Resultados propiedades de origen.....	42
Tabla 5-17: Puntos de Control según Tamaño Máximo Nominal.....	43
Tabla 5-18: Criterio Granulométrico para una mezcla nominal de 19,0 [mm].....	43
Tabla 5-19: Granulometría Graduación ¾".....	44
Tabla 5-20: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 1.....	45
Tabla 5-21: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 2.....	46
Tabla 5-22: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 3.....	47
Tabla 5-23: Resumen granulometría mezclas de pruebas.....	48
Tabla 5-24: Propiedades estimadas de las Mezclas de Prueba.....	50
Tabla 5-25: Contenido de ligante asfáltico.....	51
Tabla 5-26: Densificación para mezcla de prueba 1.....	57
Tabla 5-27: Densificación para mezcla de prueba 2.....	58
Tabla 5-28: Densificación para mezcla de prueba 3.....	58
Tabla 5-29: Promedio %Gmm para N _{inicial} , N _{diseño} y N _{máximo} para mezclas de prueba.....	58
Tabla 5-30: Resultados de V _a y V _{AM}	59
Tabla 5-31: Resumen de compactación de las Mezclas de Prueba.....	59
Tabla 5-32: Propiedades volumétricas de la mezcla estimada para N _{diseño}	61
Tabla 5-33: Propiedades estimadas de la compactación de la mezcla.....	61
Tabla 5-34: Criterios volumétricos y de densificación para mezclas SUPERPAVE.....	61
Tabla 5-35: Resultados de P _{be} , estimado y Proporción de polvo.....	62
Tabla 5-36: Propiedades Volumétricas estimadas.....	62
	9

Tabla 5-37: Densificación para Mezcla 2 con 4,9% de contenido de asfalto.....	64
Tabla 5-38: Densificación para Mezcla 2 con 5,4% de contenido de asfalto.....	64
Tabla 5-39: Densificación para Mezcla 2 con 5,9% de contenido de asfalto.....	65
Tabla 5-40 Densificación para Mezcla 2 con 6,4% de contenido de asfalto.....	65
Tabla 5-41: Resumen de compactación de la Mezcla 2.....	65
Tabla 5-42: Resumen de propiedades volumétricas de Mezcla 2, para Ndiseño.....	66
Tabla 5-43: Propiedades de la Mezcla de diseño con 5,4% de ligante asfáltico.....	68
Tabla 6-1: Geometría y propiedad volumétrica para nivel de deformación 250[$\mu\epsilon$].....	74
Tabla 6-2: Geometría y propiedad volumétrica para nivel de deformación 375[$\mu\epsilon$].....	74
Tabla 6-3: Geometría y propiedad volumétrica para nivel de deformación 500[$\mu\epsilon$].....	74
Tabla 6-4: Geometría y propiedad volumétrica para nivel de deformación 750[$\mu\epsilon$].....	74
Tabla 6-5: Resultados ensayos de fatiga.....	75
Tabla 9-1: Gravedad Específica Máxima Teórica MP1.....	84
Tabla 9-2: Gravedad Específica Bruta MP1.....	84
Tabla 9-3: Densificación MP1.....	85
Tabla 9-4: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2.....	86
Tabla 9-5: Gravedad Específica Bruta MP2.....	86
Tabla 9-6: Densificación MP2.....	86
Tabla 9-7: Gravedad Específica Máxima Teórica MP3.....	87
Tabla 9-8: Gravedad Específica Bruta MP3.....	87
Tabla 9-9: Densificación MP3.....	88
Tabla 9-10: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2. Contenido de asfalto: 4,9%.....	89
Tabla 9-11: Gravedad Específica Bruta MP2. Contenido de asfalto: 4,9%.....	89
Tabla 9-12: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 4,9%.....	90
Tabla 9-13: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2. Contenido de asfalto: 5,4%.....	91
Tabla 9-14: Gravedad Específica Bruta MP2. Contenido de asfalto: 5,4%.....	91
Tabla 9-15: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 5,4%.....	91
Tabla 9-16: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2. Contenido de asfalto: 5,9%.....	92
Tabla 9-17: Gravedad Específica Bruta MP2. Contenido de asfalto: 5,9%.....	92
Tabla 9-18: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 5,9%.....	93
Tabla 9-19: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2. Contenido de asfalto: 6,4%.....	94
Tabla 9-20: Gravedad Específica Bruta MP2. Contenido de asfalto: 6,4%.....	94
Tabla 9-21: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 6,4%.....	94

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 4-1: Gravedad Específica Neta Total.....	29
Ecuación 4-2: Gravedad Específica Aparente Total.	29
Ecuación 4-3: Gravedad Específica Efectiva Total.	29
Ecuación 4-4: Gravedad Específica Máxima.....	30
Ecuación 4-5: Absorción de Asfalto.....	31
Ecuación 4-6: Contenido de Asfalto Efectivo.	31
Ecuación 4-7: Porcentaje de vacíos de aire.	32
Ecuación 4-8: Vacíos en el agregado mineral.....	32
Ecuación 4-9: Vacíos llenos de asfalto.....	32
Ecuación 5-1: Estimación Gravedad Específica Efectiva.....	50
Ecuación 5-2: Estimación de Volumen de Ligante asfáltico absorbido.....	50
Ecuación 5-3: Estimación Volumen de Ligante efectivo.	51
Ecuación 5-4: Estimación de Contenido de prueba inicial de ligante asfáltico.	51
Ecuación 5-5: Determinación de Gmm.....	55
Ecuación 5-6: Determinación de Gmb medida.....	56
Ecuación 5-7: Determinación de G_{mb} estimada.....	56
Ecuación 5-8: Determinación de factor de corrección.....	56
Ecuación 5-9: Gravedad Específica Bruta corregida.	57
Ecuación 5-10: Cantidad de Vacíos de aire.	58
Ecuación 5-11: Cantidad de Vacíos de Agregado Mineral.....	59
Ecuación 5-12: Contenido de ligante asfáltico para lograr un 4% de Va.	59
Ecuación 5-13: Estimación de VAM para un 4% de vacíos de aire.	60
Ecuación 5-14: Estimación de VFA para un 4% de vacíos de aire.....	60
Ecuación 5-15: Estimación de %Gmm@Niñicial para un 4% de vacíos de aire.....	60
Ecuación 5-16: Estimación de %Gmm@Nmáximo para un 4% de vacíos de aire.	60
Ecuación 5-17: Estimación de ligante asfáltico efectivo a 4% de Va.	62
Ecuación 5-18: Estimación de la proporción de Polvo para un 4% de Va.	62
Ecuación 6-1: Porcentaje de agua absorbida.....	71
Ecuación 6-2: Densidad de mezcla asfáltica compactada.	71
Ecuación 6-3: Esfuerzo máximo de tracción.	72
Ecuación 6-4: Deformación máxima de tracción.	72
Ecuación 6-5: Rigidez flexural.	72
Ecuación 6-6: Ángulo de Fase.	72
Ecuación 6-7: Energía disipada por ciclo.	72
Ecuación 6-8: Energía disipada acumulada.	73
Ecuación 6-9: Ecuación para ensayo a deformación controlada.	73
Ecuación 6-10: Ecuación para ensayo a esfuerzo controlado.	73

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

Actualmente el pavimento asfáltico es el más utilizado en la estructura vial chilena, por lo que es primordial el estudio de su diseño y el mejoramiento de éste, con el fin de prolongar su tiempo de vida y reducir los costos tanto de producción como mantenimiento.

Un pavimento se ve deteriorado desde el momento de su construcción. Dicho deterioro se produce principalmente por las sollicitaciones externas producidas por el tráfico y agentes climáticos.

En Chile predomina el uso del Método Marshall en el diseño de pavimentos asfálticos. Sin embargo, se ha decidido innovar y por primera vez en el país se llama a una propuesta que implementa el diseño MAC (Mezcla Asfáltica en Caliente) bajo la metodología SUPERPAVE (SUPERior PERforming Asphalt PAVements). Dicha propuesta es detallada en el Contrato denominado "Conservación Rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Año 2016, Etapa I", ubicado en Santiago.

La metodología SUPERPAVE creada por el programa SHRP (Strategic Highway Research Program) incluye nuevas especificaciones para el ligante y los agregados, en donde el ligante se ensaya a distintas temperaturas para establecer un rango en donde se comporta adecuadamente.

Durante el tránsito vehicular el contacto de la rueda con la superficie del pavimento ejerce sobre éste una carga que produce deformaciones en las capas que componen la estructura del pavimento. Esta carga es mayor en las capas inferiores y al generarse repetidamente a lo largo de la vida del pavimento la tracción en el fondo induce la aparición de grietas que pueden propagarse a la superficie y provocar la fatiga del material. Al aparecer grietas iniciales en la superficie del pavimento éste queda expuesto a las condiciones ambientales, permitiendo el ingreso del agua al interior de la mezcla, dando paso a la pérdida de cohesión y daños por humedad.

Actualmente existen distintos tipos de equipos para medir la resistencia a fatiga de una MAC, aunque el usado mayoritariamente es el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos. En este ensayo la viga es sometida a dos cargas centrales y un par de cargas iguales y opuestas en los extremos, de esta forma en el centro de la viga la cara superior se encuentra en compresión y la cara inferior, en tracción. Al aplicar cargas periódicas sobre la probeta prismática se simula de forma cercana a la realidad el comportamiento del pavimento al ser sometido a las cargas del tránsito, caracterizando el comportamiento de éste a la fatiga y permitiéndonos estimar su desempeño a lo largo de su vida.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.2.1 Objetivos generales

- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente cuyas propiedades cumplan con especificación para diseño de mezclas volumétricas SUPERPAVE.
- Cumplir con exigencias relativas al diseño y desempeño de la mezcla asfáltica detalladas en las especificaciones técnicas del contrato “Conservación Rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Año 2016, Etapa I”
- Llevar a cabo ensayos de fatiga para MAC envejecida a corto plazo, mediante ensayo a Viga de Flexión en Cuatro Puntos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar proporciones adecuadas de material pétreo que conformarán la dosificación granulométrica que cumple con las especificaciones de diseño.
- Determinar el contenido óptimo de ligante asfáltico.
- Elaborar Mezclas de Prueba en laboratorio, para distintas proporciones de agregados y contenido de asfalto según metodología SUPERPAVE.
- Someter a ensayo las probetas confeccionadas y analizar los resultados obtenidos de las Mezclas de Prueba, evaluando los vacíos de aire (VA), vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA) y proporción de polvo.
- Confeccionar 12 probetas según la Norma AASHTO T321-14, las cuales son sometidas a ensayo de fatiga para cuatro niveles de deformación controlada de tipo sinusoidal sin periodos de reposo con una frecuencia de 10 [Hz].
- Caracterizar comportamiento de MAC mediante curvas de fatiga para distintos niveles de deformación.
- Determinar el parámetro ϵ_6 (épsilon 6), correspondiente a la deformación obtenida para un millón de ciclos.
- Comparar resultados de fatiga a corto plazo con los resultados de fatiga a largo plazo obtenidos por Nicolás Escobar Ramos en su Memoria “RESISTENCIA A FATIGA DE MEZCLA SUPERPAVE ENVEJECIDA A LARGO PLAZO”, UTFSM, Casa Central, 2017 [1].

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO

- La presente memoria de título da a conocer el procedimiento empleado para el diseño volumétrico de MAC, satisfaciendo los parámetros especificados en la Metodología SUPERPAVE. Estos parámetros corresponden a los vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA) y las proporciones de polvo y asfalto de la mezcla.
- Los ensayos concernientes a la determinación de la calidad de los materiales empleados en el diseño, corresponderán nada más, a aquellos que permitan determinar la máxima capacidad de soporte ante sollicitaciones (ESAL's).
- El ligante asfáltico a emplear en la elaboración de las mezclas, será del tipo PG (Grado de Desempeño), puesto que éste es el tipo de asfalto que propone la metodología SUPERPAVE. En lo que respecta a la información técnica que se requiera de éste, como resultados de ensayos para su clasificación, etc.; éstos

serán proporcionados por estudios anteriores realizados en las dependencias del Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras, LEMCO.

- Se considera Mezcla de Prueba de diseño intermedias, en donde la granulometría a utilizar en el diseño, se basará en un tamaño máximo nominal del agregado de 12,5[mm] y un espesor de carpeta asfáltica menor a 100[mm].
- El tráfico a considerar en el diseño de la mezcla estará en función de los resultados que arrojen las pruebas a los agregados pétreos.
- La compactación de los especímenes se realizó mediante el Compactador Giratorio SUPERPAVE (SGC).
- Los ensayos de fatiga a viga de flexión en cuatro puntos son llevados a cabo según Norma AASHTO 321-14 “Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending” [2].
- Se realizan ensayos a fatiga para MAC provenientes de pista de prueba en Aeropuerto Arturo Merino Benítez. Las muestras son calentadas y compactadas en LEMCO, mediante Compactador de Rodillo para posteriormente ser cortadas y dimensionadas en probetas prismáticas de 380[mm] de largo, 50[mm] de alto y 63[mm] de ancho.
- Se realizan ensayos de densidad que permitan corroborar el porcentaje de vacíos y densidad esperada según diseño.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El trabajo se realiza según la siguiente metodología:

1. Estudio Bibliográfico

- Revisión bibliográfica y lectura de normas AASHTO, ASTM, Manual de Carreteras y Memorias de título relacionadas con el diseño bajo Metodología SUPERPAVE y ensayo de Viga en Flexión de Cuatro Puntos.
- Capacitación y estudio previo sobre la utilización de los equipos necesarios para el desarrollo de esta memoria.
- Breve descripción de cada prueba, procedimiento de trabajo y parámetros involucrados.

2. Desarrollo Experimental Diseño de Mezcla

- Selección de material pétreo y ligante asfáltico.
- Preparación de especímenes en laboratorio.
- Realización de ensayos pertinentes.
- Selección de la estructura del agregado de diseño.
- Selección del contenido de ligante asfáltico.
- Evaluación de la mezcla de diseño a la Susceptibilidad a la Humedad.

3. Desarrollo Experimental: Determinación de Resistencia a la Fatiga

- Elaboración de probetas prismáticas a partir de la mezcla diseñada.
- Corroboración de porcentajes de vacíos y densidades de mezcla requeridos por el diseño.

- Realización de ensayo de fatiga a un total de 12 probetas, bajo 4 niveles de deformación distintas.
- Confección de gráficos y curvas de fatiga.
- Obtención de parámetros ϵ_6 y N500.

4. Análisis de Resultados

- Análisis e interpretación de resultados obtenidos.
- Conclusiones generales.

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

▪ **Capítulo 1: Introducción**

Se presentan los antecedentes generales del presente estudio, dando a conocer la importancia de éste, los objetivos a cumplir y su alcance. Se entrega la estructura de trabajo en forma simple, para un mejor entendimiento global del tema.

▪ **Capítulo 2: Marco Teórico**

Trata temas asociados a la composición y estructura de una mezcla bituminosa del tipo MAC. Además, se abarca el comportamiento de una mezcla MAC frente a los distintos deterioros que puede presentar en sus años de servicios.

▪ **Capítulo 3: Método de diseño SUPERPAVE**

Se presenta una explicación detallada del método de diseño Superpave, abarcando aristas importantes de éste, como: comportamiento del ligante asfáltico y su clasificación por grado de desempeño, especificaciones de pruebas a los agregados minerales y a la mezcla asfáltica como tal; y de la innovación en lo que respecta al método de compactación de los especímenes.

▪ **Capítulo 4: Parámetros Volumétricos de la Mezcla Asfáltica**

Define los parámetros y propiedades volumétricas tanto del asfalto como de los componentes del agregado.

▪ **Capítulo 5: Análisis de resultados del diseño volumétrico de una mezcla SUPERPAVE**

Se realizan análisis de resultados correspondientes al diseño volumétrico de MAC mediante metodología SUPERPAVE.

▪ **Capítulo 6: Ensayo de Viga de Flexión en Cuatro Puntos**

Se presenta el ensayo de Viga de Flexión en Cuatro Puntos

- **Capítulo 7: Conclusiones**
Se presentan las conclusiones finales de la presente memoria de título.
- **Capítulo 8: Referencias bibliográficas**
- **Capítulo 9: Anexos**

2 MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

Una mezcla asfáltica en caliente está formada por una combinación de áridos, polvo mineral y ligante asfáltico, en donde los agregados pétreos quedan unidos y completamente cubiertos por una delgada película de dicho ligante. El agregado debe secarse y el ligante asfáltico debe alcanzar una fluidez que permita la trabajabilidad y mezclado, es por esto que tanto el agregado pétreo y el ligante asfáltico deben calentarse, otorgando el nombre de “Mezcla Asfáltica en Caliente”. Las proporciones en que se encuentran estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y su desempeño en terreno, por lo que el objetivo del diseño de una mezcla es determinar la cantidad óptima de contenido de asfalto y agregado que entregarán un desempeño duradero como parte de la estructura del pavimento.

Según Asphalt Mix Design Methods [3], el objetivo general para el diseño de mezclas de pavimento asfáltico es una graduación de agregados y contenido de ligante tal que la mezcla tenga:

- Suficiente asfalto para asegurar un pavimento durable;
- Suficiente estabilidad de la mezcla para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsiones o desplazamientos;
- Suficientes vacíos de aire en el total de la mezcla compactada para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas de tránsito y una leve expansión térmica del ligante sin exudación o pérdida de estabilidad;
- Un contenido máximo de vacíos para limitar la permeabilidad de aire y humedad perjudicial para la mezcla;
- Suficiente trabajabilidad para permitir un posicionamiento de la mezcla sin segregación y sin sacrificar estabilidad y desempeño;
- Textura y dureza del agregado que otorguen suficiente resistencia al deslizamiento en condiciones climáticas desfavorables.

2.2 MÉTODO MARSHALL (1930's)

Método desarrollado durante los años 30 por Bruce Marshall del Departamento de Carreteras de Mississippi. Él indica que la compactación en laboratorio debe producir una densidad que representa la densidad alcanzada por la mezcla en terreno luego de ser sometida al tránsito. El método de Marshall original es aplicable a MAC que contengan agregados con tamaño máximo de 25[mm]. Luego se desarrolló un método Marshall modificado para agregados con tamaño máximo hasta 38[mm].

El método Marshall alcanzó su auge durante la Segunda Guerra Mundial, por la necesidad de construir pistas en áreas remotas. Esto requirió un procedimiento de diseño de mezclas que usara equipo de laboratorio simple y portátil, por lo que el método Marshall fue adaptado para el diseño de pavimentos que pudieran soportar las cargas y presiones producidas por las ruedas de las aeronaves.

2.3 MÉTODO SUPERPAVE

El año 1987 la Administración Federal de Autopistas (FHWA) financió una investigación por medio del Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP), cuyo propósito era desarrollar una tecnología basada en el desempeño y especificaciones que pudieran resultar en mejoras importantes en la forma en que las autopistas eran diseñadas y construidas, dirigida al incremento de tránsito a nivel nacional. El resultado de esta investigación fue el sistema de Graduación por Desempeño o "Performance Grading" (PG) para ligantes y un nuevo sistema de diseño de mezclas llamado SUPERPAVE [3]. El método de diseño de mezclas SUPERPAVE incorpora el uso del compactador giratorio para hacer especímenes de prueba y volumetría para determinar el contenido óptimo de ligante.

2.4 DETERIOROS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

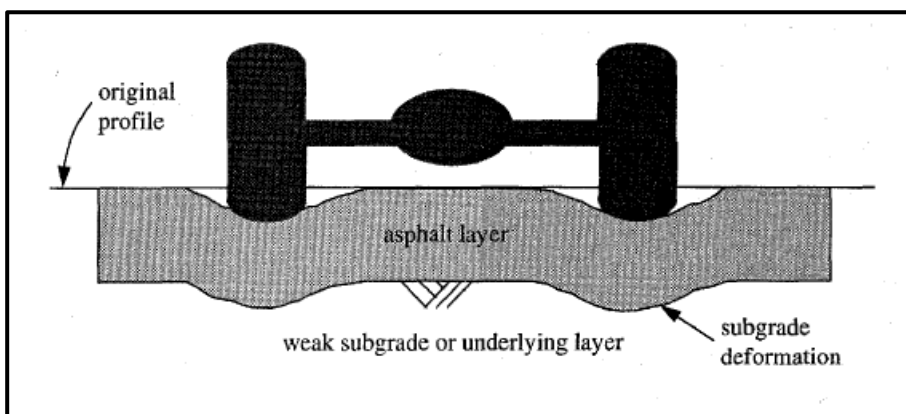
Las propiedades que las mezclas MAC poseen, se deben a los componentes que componen su estructura y a la función que en conjunto desarrollan. Si bien las propiedades individuales de los componentes de las MAC son importantes, el comportamiento de una mezcla asfáltica se explica mejor al considerar que el cemento asfáltico y el agregado mineral actúan como un sistema. Una forma de entender de mejor manera el comportamiento de una mezcla asfáltica es observar los distintos deterioros que se busca evitar [4]. A continuación, se entrega una breve descripción de los principales tipos de fallas.

2.4.1 Deformación permanente.

La deformación permanente es un deterioro en el cual una sección transversal de la superficie ya no ocupa su posición original. Recibe su nombre debido a que esta deformación "permanente" es la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga y cuyo resultado final es irrecuperable. Existen variadas causas para este tipo de deterioro, pero se distinguen dos principales.

En el primer caso, el ahuellamiento es causado por muchas aplicaciones repetidas de carga al suelo natural (sub-rasante), la subbase, o la base por debajo de la capa asfáltica (Figura 2-1). Si bien la utilización de materiales viales más rígidos reduce parcialmente este tipo de ahuellamiento, este fenómeno es normalmente considerado más un problema estructural que un problema de los materiales. En este caso, la deformación permanente ocurre más en la sub-rasante que en las capas asfálticas.

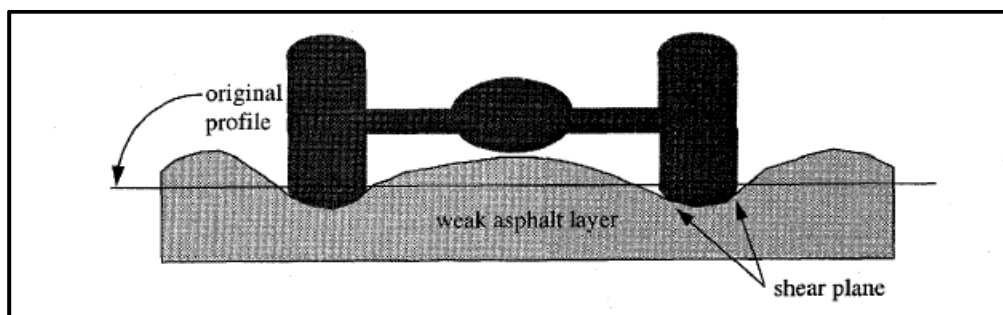
Figura 2-1: Ahuellamiento de una subrasante débil.



Fuente: Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis.

El otro tipo principal de ahuellamiento (el que más concierne en este trabajo de título) se debe a la acumulación de deformaciones en las capas asfálticas. Este tipo de ahuellamiento es causado por una mezcla asfáltica cuya resistencia al corte es demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las cuáles está sometida (Figura 2-2). A veces el ahuellamiento ocurre en una capa superficial débil. En otros casos, la capa superficial no es en sí misma propensa al ahuellamiento, pero acompaña la deformación de una capa inferior más débil, que se ve reflejada en la superficie.

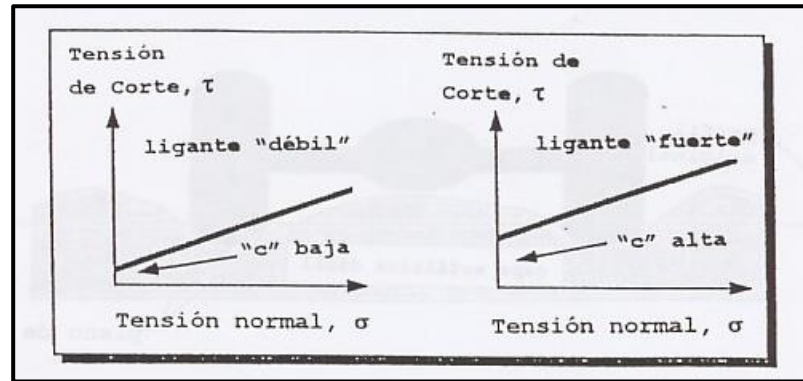
Figura 2-2: Ahuellamiento de una mezcla débil.



Fuente: Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis.

El ahuellamiento de las mezclas asfálticas débiles es un fenómeno asociado a las altas temperaturas, por lo que ocurre con mayor frecuencia en verano. Debido a que el ahuellamiento es una acumulación de deformaciones permanentes muy pequeñas, una forma de asegurar que el cemento asfáltico aporte una aceptable resistencia al corte es usar un cemento asfáltico no sólo duro sino de comportamiento lo más próximo posible a un sólido elástico a altas temperaturas del pavimento (Figura 2-3). De esta forma, cuando una carga es aplicada al cemento asfáltico en la mezcla, aquel tiende a actuar como una banda de goma y a recuperar su posición original en lugar de permanecer deformado.

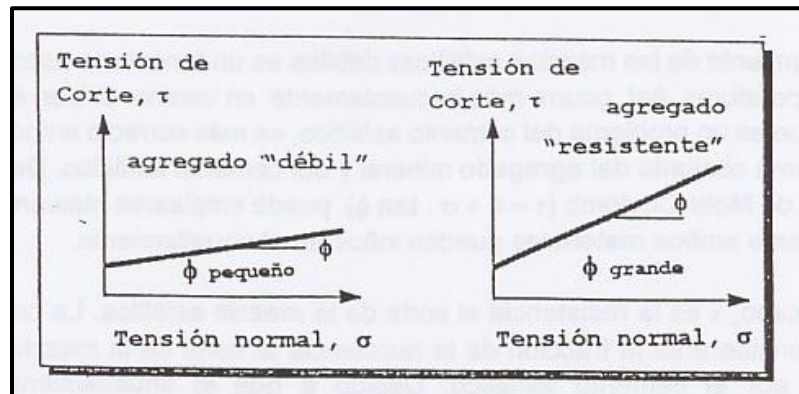
Figura 2-3: Contribución del ligante asfáltico a la resistencia por corte de la mezcla.



Fuente: Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis.

Otra forma de incrementar la resistencia al corte de las mezclas asfálticas es eligiendo un agregado con un ángulo de fricción interna alto. Esto se logra con la selección de un agregado de buenas cubicidad y rugosidad, y con una granulometría tal que se consiga un buen contacto partícula-partícula. En la Figura 2-4 se compara la contribución de dos agregados a la resistencia al corte de la mezcla.

Figura 2-4: Contribución del agregado a la resistencia por corte de la mezcla.



Fuente: Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis.

2.4.2 Fisuración por fatiga.

La fisuración por fatiga se produce normalmente en la huella donde las cargas pesadas son aplicadas. Este es un deterioro de tipo progresivo, porque en algún momento las fisuras iniciales se unirán con otras causando aún más fisuras. Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo prematuro de la fisuración por fatiga. Un estado intermedio de la fisuración por fatiga es la denominada "piel de cocodrilo", así llamado porque su forma se asemeja a la piel de un cocodrilo.

Se ha determinado que una mezcla asfáltica muy rígida presenta poca resistencia a la fatiga cuando la estructura permite la deflexión de la capa asfáltica.

Materiales rígidos, altas deflexiones y altos niveles de tensiones conducen a vidas útiles reducidas por la fatiga.

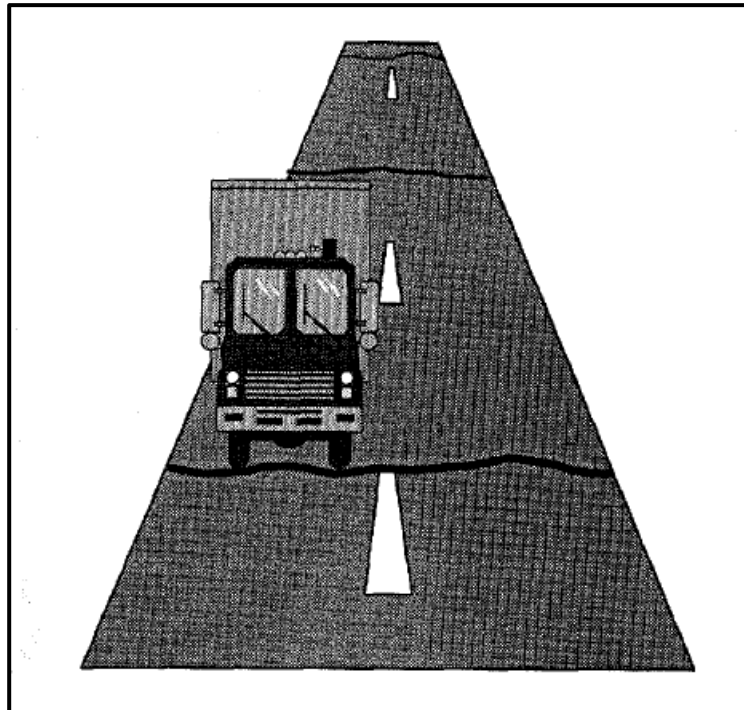
La fisuración por fatiga es usualmente causada por un número de factores que deben producirse simultáneamente. Obviamente, las cargas pesadas repetidas deben estar presentes. Otra de las razones es una subrasante con pobre drenaje, que resulta en pavimentos blandos con altas deflexiones. Pobres diseños y/o deficiente construcción de capas del pavimento, que son también propensas a sufrir altas deflexiones cuando son cargadas, también contribuyen al fisuramiento por fatiga. Así, capas de pavimentos delgadas, muy rígidas, sujetas a altas deflexiones por cargas repetidas son más susceptibles al fisuramiento por fatiga.

Para vencer el fisuramiento por fatiga desde la perspectiva de los materiales, la MAC debe ser seleccionada de modo tal que se comporte como un material elástico blando.

2.4.3 Fisuración por baja temperatura.

La fisuración por baja temperatura es un deterioro causado más por las condiciones adversas del medio ambiente que por la aplicación de las cargas del tránsito. Se caracteriza por fisuras transversales (perpendiculares a la dirección del tránsito) intermitentes que se producen con un espaciamiento notablemente uniforme.

Figura 2-5: Fisuramiento por baja temperatura.



Fuente: Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis.

Las fisuras por baja temperatura se forman cuando una capa de pavimento asfáltico se contrae en climas fríos. Cuando el pavimento se contrae, se originan

tensiones de tracción dentro de la capa. Cuando la tensión de tracción excede la resistencia de tracción, la capa asfáltica se fisura.

El ligante asfáltico juega un rol central en la fisuración por baja temperatura. En general, los ligantes asfálticos duros son más propensos a la fisuración por baja temperatura. Para evitar este deterioro, los ingenieros deben usar un ligante blando, no muy propenso al envejecimiento, y controlar in situ el contenido de vacíos de aire de forma tal que el ligante no resulte excesivamente oxidado.

3 MÉTODO DE DISEÑO SUPERPAVE

3.1 INTRODUCCIÓN

SUPERPAVE representa una tecnología que nos provee de un sistema más avanzado de especificación para los materiales componentes, diseños de mezclas asfálticas y su análisis y predicción del desempeño del pavimento; incluyendo equipos y métodos de ensayo además de criterios [4]. Este sistema nos proporciona un medio completo para diseñar mezclas en base a criterios específicos de comportamiento y aquellos elementos que lo afectan directamente, como lo son el tránsito, el clima y la sección estructural del pavimento en una determinada localización geográfica.

3.2 LIGANTES ASFÁLTICOS

SUPERPAVE cuenta con una nueva especificación sobre ligantes asfálticos, con un renovado conjunto de ensayos. Una característica que sobresale del nuevo sistema de especificación es el hecho de que está basado en el desempeño, especificando ligantes según la región geográfica, es decir, en base al clima y la temperatura previstos para el pavimento.

El grado de desempeño o performance grade (PG) de un ligante se denota como PG XX-YY, en donde XX representa el “grado de alta temperatura”. Esto significa que el ligante poseerá sus propiedades físicas hasta al menos los XX [°C], que es la alta temperatura correspondiente al clima donde el ligante estará en servicio. De la misma forma YY representa el “grado de baja temperatura” y significa que el ligante poseerá sus propiedades físicas hasta los -YY [°C]. Además, se hacen consideraciones sobre el tiempo de carga y la magnitud de carga.

Otro aspecto clave en lo que respecta a la evaluación de ligantes asfálticos es que las propiedades físicas son medidas sobre ligantes que previamente han sido envejecidos en laboratorio para simular las condiciones de envejecimiento que ocurren en un pavimento real. Sin embargo, algunas mediciones de dichas propiedades se ejecutan sobre ligantes sin envejecer. Las propiedades físicas son también medidas sobre ligantes que han sido envejecidos en el horno de película delgada rotatoria (RTFO) para simular el endurecimiento por oxidación que ocurre durante las etapas de mezclado y colocación. Adicionalmente, un equipo de envejecimiento a presión (PAV) se usa en laboratorio para simular el severo envejecimiento que sufre el ligante después de varios años de servicio. [4]

Los ensayos a los ligantes asfálticos se han desarrollado con la finalidad de controlar los 3 tipos de fallas más comunes que sufren los pavimentos: deformaciones permanentes, agrietamientos por fatiga y agrietamiento térmico.

Las propiedades físicas de los ligantes asfálticos, son medidas con 4 dispositivos:

- Reómetro de Corte Dinámico (DSR).
- Viscosímetro Rotacional o de Brookfield (RV).
- Reómetro de viga de Flexión (BBR).
- Ensayo de Tracción Directa (DTT).

El Reómetro de Corte Dinámico (DSR) se emplea para caracterizar las propiedades viscoelásticas del ligante para medias y altas temperaturas. Para ello, mide el módulo complejo en corte (G^*) y el ángulo de fase (δ), sometiendo a una pequeña muestra de ligante a tensiones de corte oscilantes colocando la muestra entre dos platos paralelos. Este ensayo es utilizado para evaluar la capacidad del ligante para resistir deformaciones permanentes. Este ensayo calcula G^* y δ al someter la muestra de ligante a un torque y midiendo la respuesta de la deformación específica de corte del espécimen. Dicha respuesta, está desfasada un cierto intervalo de tiempo (Δt) con relación a la tensión aplicada. El desfase es normalmente entregado en medidas angulares, multiplicando el retraso de tiempo (Δt) por la frecuencia angular (ω) para obtener el ángulo de fase (δ).

Los materiales viscoelásticos como los ligantes asfálticos tienen un ángulo de fase que va entre 0 y 90°, dependiendo de la temperatura de ensayo. A altas temperaturas, δ se aproxima a 90°; a bajas temperaturas δ se aproxima a 0°. La especificación de ligantes utiliza, como medio para controlar la rigidez del asfalto, tanto la relación $G^*/\text{sen}\delta$ a altas temperaturas (>46°C) como $G^*\text{sen}\delta$ a temperaturas intermedias (entre 7° y 34°C). [4]

La especificación de ligantes, al controlar la rigidez a altas temperaturas, asegura que el asfalto entregue su mayor aporte a la resistencia global al corte de la mezcla en términos de la elasticidad a altas temperaturas. De la misma forma asegura que el ligante no contribuya a la fisuración por fatiga al limitar su rigidez a temperaturas intermedias.

El viscosímetro rotacional (RV) evalúa la viscosidad del asfalto a 135 [°C], temperatura alcanzada generalmente en las fases de fabricación y construcción. Durante el ensayo, debido a las altas temperaturas, el asfalto se comporta casi completamente como un fluido. En una muestra de asfalto caliente, se sumerge un cilindro rotacional coaxial, que mide la viscosidad por medio del torque necesario para rotar un eje a una velocidad constante. La especificación SUPERPAVE recomienda que la viscosidad sea menor a 3 [Pa*s].

El reómetro de viga de flexión (BBR) determina las propiedades de rigidez de los ligantes a baja temperatura, que previamente ha sido envejecido a largo plazo mediante horno PAV. Este ensayo mide la rigidez en “creep” (S) (Creep=Deformación por fluencia lenta) y el logaritmo de la velocidad de deformación en “creep” (m). Para obtener estas propiedades se mide la respuesta de una probeta de ligante, en forma de viga pequeña, la cual es sometida a un ensayo de “creep” a bajas temperaturas.

Los ligantes con un bajo stiffness en creep (S) no se fisurarán en tiempos fríos y aquellos con altos valores de m son mejores en la relajación de tensiones presentes en la estructura del pavimento cuando la temperatura desciende, asegurando un mínimo de fisuramiento debido a bajas temperaturas.

El ensayo de tracción directa (DDT) entrega la deformación específica de falla (rotura) en tracción, la cual es medida sobre una muestra pequeña con forma de hueso de perro que es estirada a bajas temperaturas hasta que se corta. Al igual que el BBR, el DDT asegura, para una dada baja temperatura, la máxima resistencia del ligante a la fisuración. Los resultados del ensayo de tracción directa pueden utilizarse en conjunto con el ensayo BBR para determinar el “grado de baja temperatura” PG de un ligante asfáltico, ya que algunos ligantes podrían, a bajas temperaturas, tener un stiffness en creep más alto que el deseado.

3.3 SELECCIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO

La metodología SUPERPAVE presenta un rasgo único, ya que las nuevas especificaciones para la selección del ligante asfáltico están basadas en su desempeño vial (PG) y se seleccionan en función del clima. Si bien las propiedades físicas requeridas (creep stiffness, $G^*/\text{sen}\delta$, etc.) son las mismas para todos los grados de ligantes, lo que los diferencia es la temperatura para la cual deben cumplirse dichas propiedades.

La nueva nomenclatura que define la metodología por Grado de Desempeño (PG) es PG XX-YY, donde:

- PG= Performance Grade.
- XX= Temperatura Máxima (temperatura máxima a la cual el asfalto debe mantener sus propiedades durante la vida en servicio)
- YY= Temperatura Mínima (temperatura mínima a la cual el asfalto debe mantener sus propiedades durante la vida de servicio)

En la Tabla 3-1 se muestran los grados de ligantes definidos en la metodología SUPERPAVE. Al momento de realizar un diseño, el grado de comportamiento PG de los ligantes asfálticos se selecciona acorde a la región geográfica y las temperaturas a las cuales estará sometido el pavimento.

Tabla 3-1: Grados de ligantes asfálticos SUPERPAVE [22]

Performance Grade	Alta Temperatura	Baja Temperatura
PG	46	-34,-40, -46
PG	52	-10,-16,-22,-28,-34,-40,-46
PG	58	-16,-22,-28,-34,-40
PG	64	-10,-16,-22,-28,-34,-40
PG	70	-10,-16,-22,-28,-34,-40
PG	76	-10,-16,-22,-28,-34
PG	82	-10,-16,-22,-28,-34

Lo que diferencia a los varios grados de ligantes es la temperatura a la cual deben cumplirse los requerimientos. Por ejemplo, un ligante que está clasificado como PG 58-16 debe satisfacer con los requerimientos de las propiedades físicas a altas temperaturas hasta los 58[°C] y bajas temperaturas hasta los -16[°C].

Por lo general, los grados PG 76 y 82 son utilizados sólo cuando existen cargas a bajas velocidades, cargas estacionadas o tránsito excesivo de camiones.

Para hacer uso de este criterio, se debe contar con una base de datos de información meteorológica recabada por estaciones climáticas, las cuales deben contar con un registro de temperatura ambiente de por al menos 20 años (estaciones con menos de 20 años de registro se descartan). Para cada año se debe determinar lo siguiente:

- El promedio de las temperaturas máximas de los 7 días consecutivos más cálidos del año (temperatura del aire).
- La temperatura mínima del día más frío del año.

3.3.1. Efecto del tránsito: Velocidad de carga y nivel de tránsito.

Al seleccionar el ligante en base al clima, se hace el supuesto de que el ligante se ocupará en mezclas sometidas a cargas rápidas. El Reómetro de corte dinámico aplica su carga a una velocidad de 10 [radianes/segundo], lo cual simula la carga de un vehículo a 90 [km/H]. Sin embargo, en pavimentos cercanos a intersecciones, casetas de peaje, etc. se tienen velocidades de tránsito mucho más bajas y en algunas ocasiones las cargas son estacionarias; por lo que el tiempo de carga es mayor y la rigidez de la mezcla debe ser más alta para soportarlas. Para compensar esto, se requiere aumentar el grado de alta temperatura en al menos uno, y hasta dos grados. Por ejemplo, si al escoger en base a la temperatura se obtiene un grado de ligante PG 64-22, al considerar cargas lentas de tránsito, se seleccionará un grado de ligante más alto, PG 70-22. Además, si se contempla la existencia de cargas estáticas, se seleccionará un PG 76-22. La velocidad de carga no tiene efecto sobre la selección del grado de baja temperatura.

Se recomienda que el nivel de tránsito también sea considerado al momento de escoger los ligantes. Cuando el nivel de tránsito de diseño supera los 10 millones de ejes simples equivalentes (ESALs) es recomendado considerar un incremento en un grado en el grado de altas temperaturas. El nivel de tránsito no tiene efecto sobre la selección del grado de baja temperatura.

3.4 AGREGADO MINERAL

Las propiedades del agregado mineral desempeñan un papel fundamental en la deformación permanente. Es por esto que se definieron dos categorías de propiedades de los agregados necesarias en la metodología SUPERPAVE: propiedades de consenso y propiedades de origen.

Las propiedades de consenso son ciertas características del agregado que son consideradas críticas e imprescindibles para alcanzar un alto nivel de desempeño de las mezclas asfálticas y dependen del nivel de tránsito y la posición del agregado en la

estructura del pavimento. Aquellos materiales que se encuentran ubicados cerca de la superficie del pavimento se encuentran sujetos a altos niveles de tránsito y por lo tanto requieren propiedades de consenso mucho más rigurosas. Dichas propiedades son:

- Angularidad del agregado grueso,
- Angularidad del agregado fino,
- Partículas alargadas y chatas, y
- Contenido de arcilla. [4]

Al especificar angularidades tanto del agregado grueso como del agregado fino lo que se busca es alcanzar un alto grado de fricción interna del agregado, obteniendo una alta resistencia al corte y por consiguiente una alta resistencia al ahuellamiento.

Se limita el porcentaje de partículas alargadas y chatas, ya que estas tienden a quebrarse durante el proceso de construcción y bajo tránsito. Por otro lado, la limitación del contenido de arcilla en los agregados mejora la adherencia de los áridos con el ligante asfáltico.

Además de las propiedades de consenso, otras características críticas del agregado son las propiedades de origen. Sin embargo, para estas propiedades no se consideran valores críticos, debido a que dichos valores son específicos de cada fuente de origen. Las propiedades de origen del agregado son:

- Tenacidad,
- Durabilidad, y
- Materiales deletéreos. [4]

La tenacidad estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante la manipulación, construcción y servicio; y corresponde al porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de abrasión de Los Ángeles.

La durabilidad estima la resistencia del agregado, tanto grueso como fino, al deterioro por acción del clima durante la vida útil del pavimento. Se mide como el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados que es sometida al ataque con sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

Los materiales deletéreos corresponden al porcentaje en peso de distintos contaminantes que vienen mezclados con los agregados. Dichos contaminantes pueden ser elementos como madera, carbón, esquisto, mica, etc. Esto puede aplicarse tanto a agregados fino como gruesos.

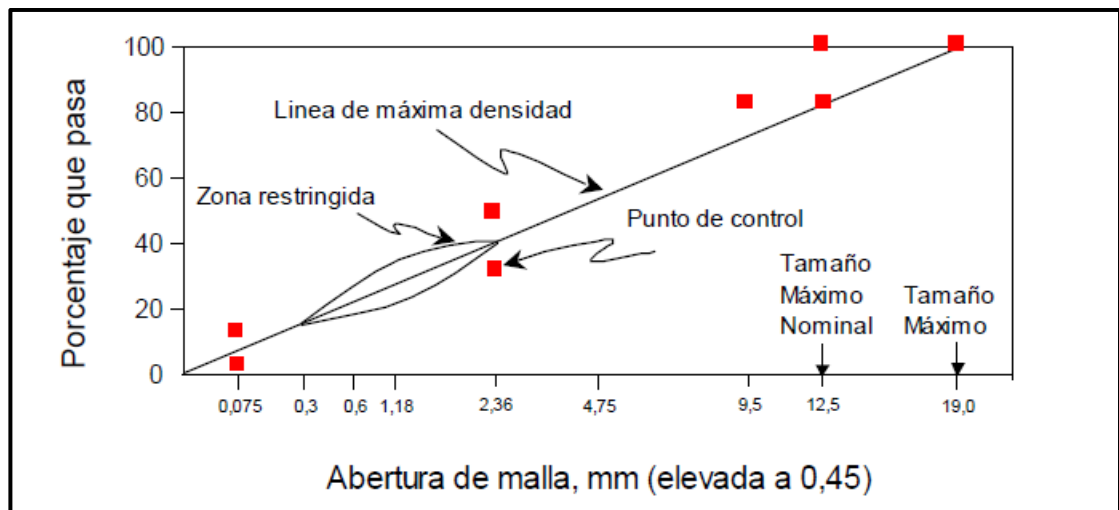
Para especificar la granulometría, SUPERPAVE ha modificado un enfoque ya usado con anterioridad. Utiliza el exponencial 0.45 en la carta granulométrica para definir una granulometría permitida. Esta carta usa una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan y las abscisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45. [4]

Un rasgo importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad, la cual corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100% hasta el origen (0%, 0 mm). SUPERPAVE emplea la serie estándar de tamices de ASTM y las siguientes definiciones son respecto al tamaño del agregado: [4]

- Tamaño máximo nominal: tamaño de tamiz mayor que el primer tamiz que retiene más del 10%.
- Tamaño máximo: tamaño del tamiz mayor que el tamaño máximo nominal.

Esta granulometría (de máxima densidad) representa la graduación para la cual las partículas del agregado se acomodan entre sí conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Esta granulometría no es apta para utilizarse, debido a que habría muy pocos vacíos en el agregado mineral como para permitir la formación de una película de asfalto lo suficientemente gruesa para obtener una mezcla durable. Es por esto que se han incluido dos conceptos adicionales: Puntos de Control y Zona Restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. Corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm), y un tamaño de polvo (0.075 mm). En cuanto a la zona restringida, en 2004 se decidió prescindir de ella, ya que SUPERPAVE la consideró innecesaria. La Figura 3-1, ilustra los puntos de control y la zona restringida para la mezcla SUPERPAVE de tamaño máximo nominal 12.5 [mm] y tamaño máximo 19 [mm].

Figura 3-1: Límites granulométricos SUPERPAVE para una mezcla de 12.5 [mm].



El término utilizado para describir la frecuencia de distribución acumulada del tamaño de las partículas del agregado es el de “estructura del agregado de diseño”. Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control satisface los requerimientos granulométricos de SUPERPAVE. Esta metodología define 6 mezclas tipos en base al tamaño máximo nominal, las cuales son detalladas en la Tabla 3-2:

Tabla 3-2: Denominación de las mezclas SUPERPAVE.

Denominación para SUPERPAVE	Tamaño máximo nominal, [mm]	Tamaño máximo, [mm]
37,5 [mm]	37,5	50
25 [mm]	25	37,5
19 [mm]	19	25
12,5 [mm]	12,5	19
9,5 [mm]	9,5	12,5

SUPERPAVE recomienda que, si el nivel de tránsito de proyecto aumenta, la granulometría se acerque más a los puntos de control de tamaño grueso. Además, los requerimientos de control de SUPERPAVE de la granulometría no fueron hechos para ser aplicados a tipos de mezcla especiales tales como las “Stone Matrix Asphalt” o las mezclas abiertas.

3.5 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Uno de los aspectos fundamentales en el diseño de la mezcla volumétrica es la compactación en laboratorio. Lo más importante es utilizar un equipo capaz de compactar en forma realista los especímenes de mezcla, a la densidad alcanzada bajo las condiciones de clima y carga de pavimento requeridas. Para lograr esto, un nuevo compactador fue desarrollado, el Compactador Giratorio Superpave (SGC). Una prioridad era lograr un equipo apropiado para el control y la verificación de calidad.

4 PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Al momento de diseñar una mezcla asfáltica es importante considerar las proporciones volumétricas de sus componentes, ya que estas definen su comportamiento y el desempeño de la superficie de rodamiento durante su vida de servicio. Por esta razón, es fundamental simular adecuadamente en laboratorio la densificación que ocurre en terreno, tanto en la etapa de construcción como durante el tránsito vehicular, y de esta forma llegar a métodos de trabajo que permitan obtener mezclas con un comportamiento óptimo para condiciones de tránsito y clima específicas.

Son tres los principales requerimientos volumétricos de la mezcla: vacíos de aire (VA), vacíos de agregado mineral (VAM) y vacíos llenos con asfalto (VFA).

4.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA

La gravedad específica es la relación o cociente entre la densidad de una sustancia dada y la densidad del agua, que se usa como referencia, cuando ambos se encuentran en las mismas condiciones de temperatura y presión.

4.1.1 Gravedad Específica de los Agregados

4.1.1.1 Gravedad Específica Neta (G_{sb})

Proporción de la masa al aire de una unidad de volumen, de un material permeable, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen de agua; ambos a la misma temperatura indicada. Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, fino y filler, con diferentes gravedades específicas, la Gravedad Específica Neta se calcula como:

$$G_{sb} = \frac{P1 + P2 \dots + Pn}{\left(\frac{P1}{G1}\right) + \left(\frac{P2}{G2}\right) + \dots + \left(\frac{Pn}{Gn}\right)}$$

Ecuación 4-1: Gravedad Específica Neta Total

Donde:

- G_{sb} : Gravedad Específica Neta Total.
- P1, P2, Pn [%]: Porcentajes individuales por masa de agregado.
- G1, G2, Gn : Gravedad Específica Neta individual.

4.1.1.2 Gravedad Específica Aparente (G_{sa})

Relación que existe entre la masa al aire de una unidad de volumen de un material impermeable, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen de agua; ambos a la misma temperatura indicada. De igual forma que la gravedad específica neta, cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, fino y filler, con diferentes gravedades específicas, la gravedad específica aparente se calcula como:

$$G_{sa} = \frac{P1 + P2 \dots + Pn}{\left(\frac{P1}{G1}\right) + \left(\frac{P2}{G2}\right) + \dots + \left(\frac{Pn}{Gn}\right)}$$

Ecuación 4-2: Gravedad Específica Aparente Total.

Donde:

- G_{sa} : Gravedad Específica Aparente Total.
- P1, P2, Pn [%]: Porcentajes individuales por masa de agregado.
- G1, G2, Gn : Gravedad Específica Neta individual.

4.1.1.3 Gravedad Específica Efectiva (G_{se})

Relación que existe entre la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto), con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen de agua; ambos a la misma temperatura indicada. Esta gravedad se encuentra en función del volumen de asfalto absorbido, por lo que se debe determinar a partir de la Gravedad Específica Máxima Teórica (G_{mm}) de la mezcla. Al basarse en esta gravedad, incluye todos los espacios de vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto; por lo tanto, se determina de la siguiente forma:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\left(\frac{P_{mm}}{G_{mm}}\right) - \left(\frac{P_b}{G_b}\right)}$$

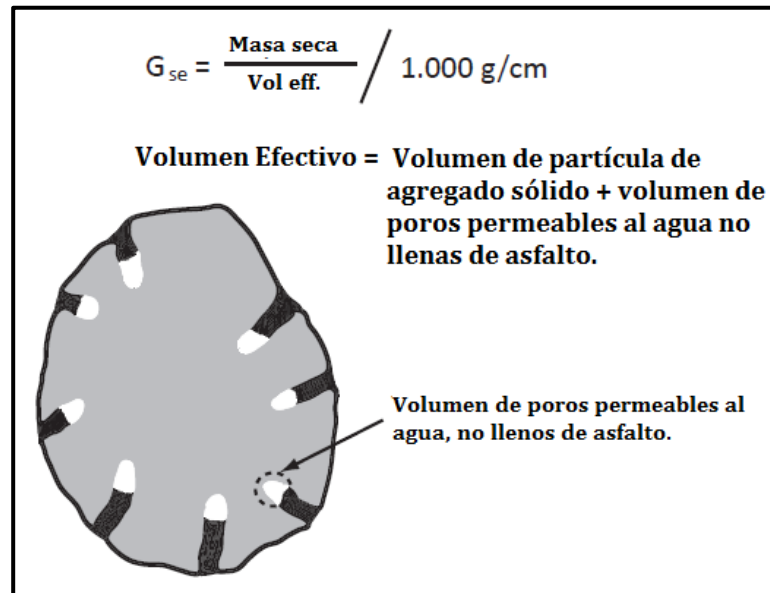
Ecuación 4-3: Gravedad Específica Efectiva Total.

Donde:

- G_{se} : Gravedad Específica Efectiva Total.
- P_{mm} [%]: Masa del total de la mezcla suelta (100%).
- G_{mm} : Gravedad Específica Máxima de la mezcla suelta.
- P_b [%] : Contenido de Asfalto.
- G_b [%] : Gravedad Específica del Asfalto.

La gravedad específica efectiva queda graficada en la Figura 4-1.

Figura 4-1: Volumen Efectivo del Agregado.



4.1.2 Gravedad Específica del Ligante

4.1.2.1 Gravedad Específica del Asfalto, G_b .

Relación entre la masa al aire de una unidad de volumen dado de asfalto y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura y presión. La gravedad varía típicamente entre 1,00 y 1,05.

4.1.3 Gravedad Específica de Mezcla

4.1.3.1 Gravedad Específica Máxima de la Mezcla Asfáltica (G_{mm})

Relación de la masa seca de una unidad de volumen de mezcla de asfalto (incluyendo sólo los volúmenes del agregado y aglutinante) a la masa del mismo volumen de agua. Se calcula como:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\left(\frac{P_s}{G_{se}}\right) - \left(\frac{P_b}{G_b}\right)}$$

Ecuación 4-4: Gravedad Específica Máxima.

Donde:

- G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla suelta.
- G_{se} : Gravedad específica efectiva.

- P_{mm} : Masa total de la mezcla suelta [%].
- P_b : Contenido de asfalto [%].
- P_s : Contenido de agregado [%].
- G_b : Gravedad específica del asfalto.

4.1.3.2 Gravedad Específica Bruta de la Mezcla Asfáltica Compactada, G_{mb} .

Relación entre la masa seca de una unidad de volumen dado de mezcla asfáltica compactada (incluyendo los volúmenes de agregados, ligante y aire) y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura.

4.2 ABSORCIÓN DE ASFALTO

La Absorción del Asfalto se expresa como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica. Esta propiedad fundamental, se determina de la siguiente forma:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} * G_b$$

Ecuación 4-5: Absorción de Asfalto

Donde:

- P_{ba} : Asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.
- G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado.
- G_{sb} : Gravedad específica neta del agregado.
- G_b : Gravedad específica del asfalto.

4.3 CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO

El contenido de asfalto efectivo de una mezcla, se define como el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la parte del contenido total de asfalto, que se queda como una película de asfalto en la cara superficial de las partículas de agregado. Esta propiedad se determina de la siguiente forma:

$$P_{be} = P_b - P_{ba} * P_s * 100$$

Ecuación 4-6: Contenido de Asfalto Efectivo.

Donde:

- P_{be} [%]: Contenido de asfalto efectivo.
- P_b [%] : Contenido de asfalto.
- P_{ba} [%]: Asfalto absorbido.
- P_s : Contenido de agregado.

4.4 VACÍOS DE AIRE (V_A)

El contenido de vacíos de aire es la concentración, en volumen, del aire entre las partículas de agregado de una mezcla compactada. Los vacíos de aire se expresan siempre como un porcentaje del volumen total de la mezcla. Los vacíos de aire en una mezcla compactada, se calculan como:

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100$$

Ecuación 4-7: Porcentaje de vacíos de aire.

Donde:

- V_a[%]: Vacíos de aire en la mezcla.
- G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla.
- G_{mb} : Gravedad específica bruta de la mezcla.

4.5 VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VAM)

El VAM corresponde al espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compactada. VAM representa la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo (no considera asfalto absorbido) expresado como porcentaje del volumen total. Se calcula como:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$$

Ecuación 4-8: Vacíos en el agregado mineral

Donde:

- VAM: Vacíos en el agregado mineral [%].
- G_{sb} : Gravedad específica bruta del agregado.
- G_{mb} : Gravedad específica bruta de la mezcla compactada.
- P_s : Contenido de agregado [%].

4.6 VACÍOS LLENOS DE ASFALTO, VFA

Corresponde al porcentaje de los vacíos de agregado mineral que son llenados por el asfalto, sin considerar el asfalto absorbido. Se calcula como:

$$VFA = \frac{VAM * V_a}{VAM} * 100$$

Ecuación 4-9: Vacíos llenos de asfalto.

Donde:

- VFA: Vacíos llenos con asfalto, porcentaje de VAM.
- VAM: Vacíos en el agregado mineral.
- V_a: Vacíos de aire en la mezcla.

4.7 DIAGRAMA DE COMPONENTES

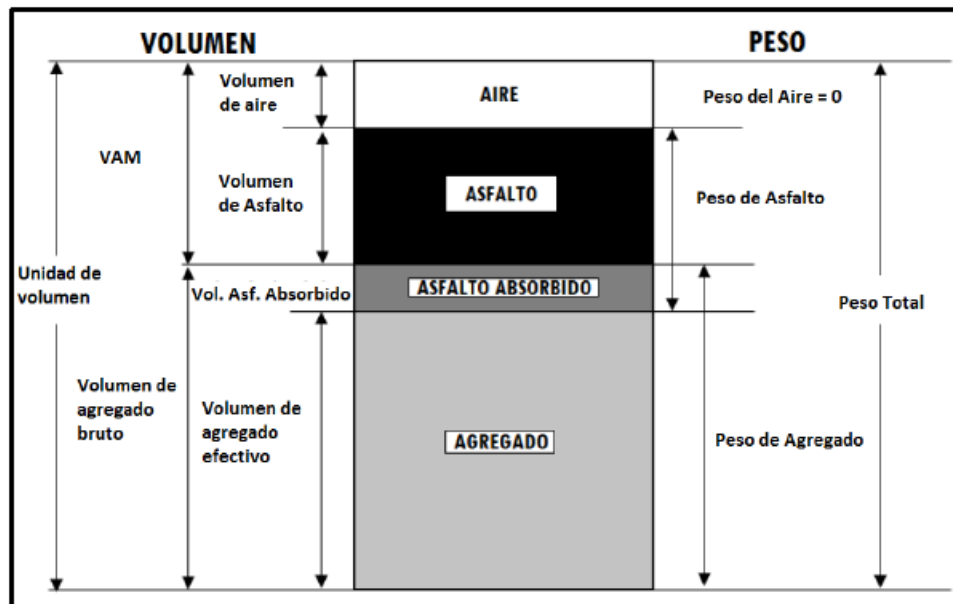
El modelo utilizado para describir las propiedades de masa y de volumen de una mezcla asfáltica en caliente, es el diagrama de componentes. Este considera una muestra compactada de MAC con los vacíos de aire, cemento asfáltico, y agregado mineral como componentes discretas, ver Figura 4-2. A la muestra compactada se le asigna un volumen unitario, por ejemplo: un m^3 , un cm^3 , etc.), con peso conocido (por ejemplo: kg o g). El diagrama de componentes se adapta de buena forma a las unidades métricas, puesto que en este sistema el peso específico y la gravedad específica son numéricamente iguales, ya que el peso específico del agua es muy cercano a 1 [g/cm^3] y su gravedad específica es 1 a 25 [$^{\circ}C$].

El diagrama de componentes ofrece una clara definición de peso específico, esto es, el peso dividido por el volumen del material compactado. Como el modelo está compuesto de diferentes materiales, el peso específico de la muestra completa se llama con frecuencia "Peso específico bruto" y se calcula dividiendo el peso total de la muestra por su volumen total.

Para un dado contenido de asfalto, el máximo peso específico teórico es el peso de agregado más asfalto dividido por el volumen de ambos componentes, sin incluir el volumen de los vacíos de aire. Esta propiedad resulta ser útil ya que puede emplearse para calcular otras importantes propiedades, como el contenido de vacíos de aire.

El contenido de asfalto es la concentración de peso del ligante asfáltico en una mezcla. Se expresa como porcentaje del peso total de la mezcla o como porcentaje del peso total del agregado.

Figura 4-2: Diagrama de componentes de una mezcla MAC compactada. [4]



5 ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DE UNA MEZCLA SUPERPAVE

El diseño volumétrico de la mezcla juega un rol central en el diseño de mezclas de Superpave. La información que se expone a continuación sigue el proceso lógico de ensayos y análisis de datos que involucra al Nivel I de diseño de mezclas.

Existen 4 pasos básicos en los ensayos y proceso de análisis: [4]

- 1- Selección de los materiales (agregado, ligante, modificadores, etc).
- 2- Selección de la estructura de agregado de diseño.
- 3- Selección del contenido de ligante asfáltico de diseño.
- 4- Evaluación de la sensibilidad a la humedad de la mezcla diseñada.

5.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

El agregado pétreo, tiene como procedencia el Acopio Planta San Guillermo y el ligante asfáltico, modificado con polímeros, tiene como procedencia Oil Malal.

Los materiales son seleccionados según su capacidad de satisfacer los criterios requeridos. Al realizar el diseño para un proyecto, éste especifica un nivel de tránsito (número de ESALs o ejes simples equivalentes) que es empleado para determinar los requerimientos de diseño tales como el número de giros de diseño para la compactación, propiedades físicas exigidas al agregado y requerimientos volumétricos de la mezcla.

5.1.1 Selección del ligante

El ligante debe seleccionarse de acuerdo a su grado de desempeño (PG), el cual está asociado a las altas y bajas temperaturas. Para efectos de esta memoria, según el proyecto y sus exigencias, el ligante a utilizar en el diseño debe tener un grado PG de al menos PG 76-22. Una vez determinada la necesidad de un PG 76-22, el ligante es seleccionado y ensayado para cumplir las especificaciones. El grado obtenido en el ligante que se utilizará en el diseño es de valor PG 82-22.

En las especificaciones Superpave, se simula mediante ensayos de laboratorio los 3 estados críticos a los que se ve expuesto el asfalto durante su vida útil: [5]

- **Primer Estado:** Asfalto Original, estado que se da durante el transporte, almacenamiento y manejo del ligante asfáltico.
- **Segundo Estado:** Envejecimiento Primario producido luego de la fabricación y colocación de la mezcla asfáltica. Este estado es simulado mediante el ensayo en horno de película delgada rotatoria (RTFO).
- **Tercer Estado:** Envejecimiento Secundario de la mezcla asfáltica cuando ha permanecido en servicio por un largo periodo. El envejecimiento es la pérdida de las propiedades del asfalto por oxidación de sus componentes más sensibles. Estado simulado a través de ensayo PAV (Pressure Aging Vessel).

Las propiedades físicas del asfalto utilizado son medidas sobre asfaltos envejecidos en laboratorio, simulando de esta forma las condiciones reales que el pavimento experimente en su fase operativa. Para la medición de dichas propiedades se hace uso de los equipos detallados en la Tabla 5-1:

Tabla 5-1: Equipos para determinar propiedades físicas del asfalto. [5]

EQUIPO	OBJETIVO
Reómetro de corte dinámico DSR	Mide las propiedades del asfalto, a temperaturas altas e intermedias.
Viscosímetro rotacional RV	Mide las propiedades del asfalto, a altas temperaturas.
Reómetro de viga de flexión BBR	Mide las propiedades del asfalto, a bajas temperaturas.

Existe una variedad de equipos para evaluar los ligantes asfálticos. Para este diseño de mezcla se realizan pruebas en el viscosímetro rotacional a 135[°C]. Adicionalmente, se realiza el ensayo de Punto de Inflamación, DSR, pérdida de masa y BBR. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 5-2:

Tabla 5-2: Resultado de ensayos exigidos sobre el ligante y su criterio de aceptabilidad.

Ensayo Propiedad	Resultados del Ensayo	Criterio
Ligante Original		
Punto de Inflamación	306	230 [°C] mín.
Viscosidad Rotacional 135°C	2,23	3 Pa.s. máx.
Reómetro Dinámico de Corte G*/Senð @82°C	1,14	1,00 kPa mín.
RFTO- Ligante Envejecido		
Pérdida de Masa	0,06	1,00% máx.
Reómetro Dinámico de Corte G*/Senð @82°C	2,6	2,20 kPa mín.
PAV - Envejecimiento del ligante		
Reómetro Dinámico de Corte G*/Senð @34°C	4095	5000 kPa máx.
Reómetro de Flexión Stiffness @-12°C	28,95	300 Mpa máx.
Reómetro de Flexión Valor m @-12°C	0,392	0,300 mín.
Grado de Desempeño PG		
		82-22
Temperatura de Mezclado		
		174 ± 5°C
Temperatura de Compactación		
		157 ± 10°C

Los resultados obtenidos y detallados en la Tabla 5-2 cumplen los criterios exigidos por la metodología SUPERPAVE y por lo tanto nuestro cemento asfáltico grado PG 88-22, cumple con las especificaciones.

5.1.2 Selección del Agregado

Los agregados utilizados en el diseño de mezcla, provienen de tres pilas de acopio, de las cuales dos son de material grueso (Grava ¾" y Gravilla ½") y una de material fino (Polvo roca 3/8").

5.1.2.1 Análisis Granulométrico

Se realiza el análisis granulométrico para determinar las fracciones granulométricas del agregado. A través de este procedimiento se corrobora que el material cumpla con la correcta distribución de sus partículas, con el fin de elaborar una mezcla acorde a lo exigido.

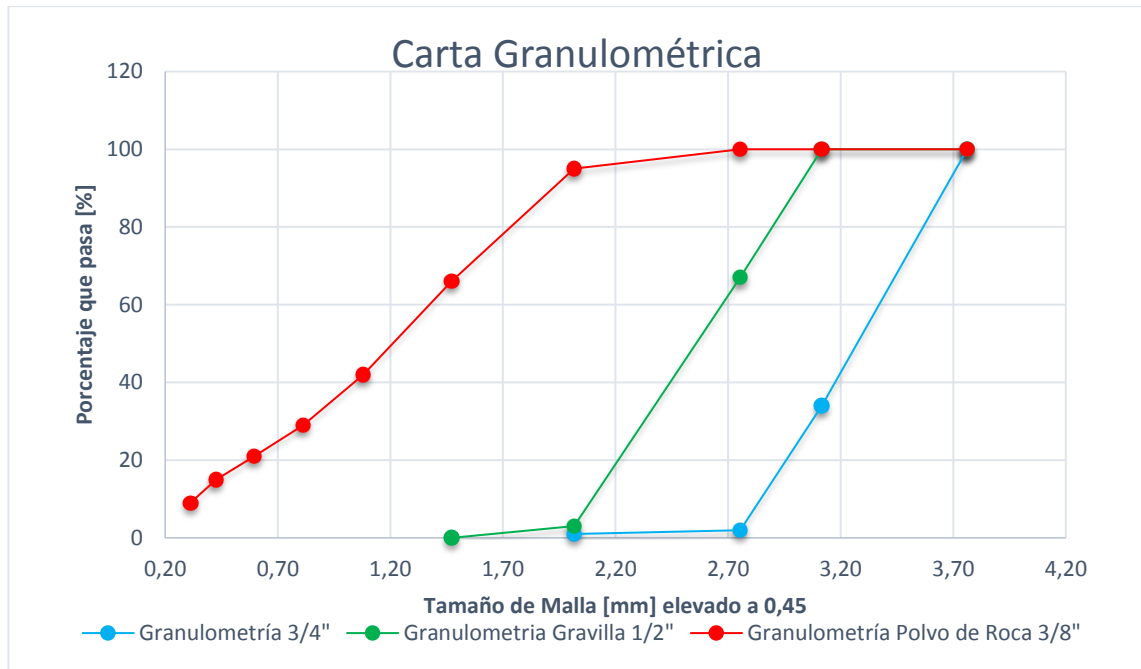
El análisis granulométrico del agregado grueso fino se lleva a cabo según el Volumen 8 del Manual de Carreteras (MC V8), Sección 8.202.3 y 8.202.4 [6], respectivamente.

Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la Tabla 5-3 y en la Figura 5-1.

Tabla 5-3: Granulometría de los agregados.

GRANULOMETRÍA					
Porcentaje que pasa (%)					
Tamiz			Grava ¾"	Gravilla ½"	Polvo Roca 3/8"
[mm]	Gráfico	ASTM			
80	7,18	3"			
63	6,45	2 1/2"			
50	5,81	2"			
37,5	5,11	1 1/2"			
25	4,26	1"			
19	3,76	¾"	100	100	100
12,5	3,12	½"	34	100	100
9,5	2,75	3/8"	2	67	100
4,75	2,02	N°4	1	3	95
2,36	1,47	N°8		0	66
1,18	1,08	N°16			42
0,63	0,81	N°30			29
0,315	0,59	N°50			21
0,15	0,43	N°100			15
0,075	0,31	N°200			9,0

Figura 5-1: Gráfico de granulometría de los agregados.



Para cada agregado se determinan las gravedades específicas bruta (G_{sb}) y aparente (G_{sa}), siguiendo el procedimiento indicado en la sección 8.202.20 y 8.202.21 del Manual de Carreteras. En la tabla 5-4, se presentan los resultados de los ensayos.

Tabla 5-4: Resultados ensayo de Gravedades Específicas.

Gravedades específicas del agregado		
Agregado	Gsb	Gsa
3/4"	2688	2774
1/2"	2684	2780
Polvo Roca	2655	2779

5.1.2.2 Propiedades de Consenso

Las propiedades de consenso son consideradas críticas para alcanzar un alto desempeño de la mezcla. Se asocian a la calidad el agregado para producir una muestra resistente y durable.

Las propiedades de consenso se determinan según ensayos, regidos por las normativas descritas en la Tabla 5-5:

Tabla 5-5: Propiedades de Consenso y normativa asociada.

Propiedad de Consenso	Norma
Angularidad del Agregado Grueso	ASTM D 5821 [7] Y M.C. 8.202.6 [8]
Angularidad del Agregado Fino	AASHTO T-304 [9]
Partículas Chatas y Alargadas	ASTM D 4791-99 [10]
Contenido de Arcilla (o Equivalente de Arena)	AASHTO T-176 [11] Y M.C. 8.202.9 [12]

Las propiedades de consenso para agregados de Superpave apuntan a ser aplicadas a los agregados graduados combinados antes que a los agregados individuales [4]. Por lo tanto, si algunos de los componentes individuales no cumplen los criterios, pueden ser utilizado si la mezcla de agregados en que interviene satisface los criterios del diseño Superpave.

5.1.2.2.1 Angularidad del Agregado Grueso

Este ensayo se realiza sobre las partículas gruesas (mayores de 4.75 [mm]) del agregado en las pilas de acopio. En la Tabla 5-6 se especifican los requerimientos de Superpave para la angularidad del agregado grueso: [4]

Tabla 5-6: Requerimientos de Superpave para el ensayo de Angularidad del Agregado Grueso.

Tránsito, en 10 ⁶ ESALs	Profundidad desde la superficie	
	<100[mm]	>100[mm]
<0,3	55/-	-/-
<1	65/-	-/-
<3	75/-	50/-
<10	85/80	60/-
<30	95/90	80/75
<100	100/100	95/90
≥100	100/100	100/100

*Nota: "85/80" significa que el 85% del agregado grueso tiene una sola cara fracturada y 80% tiene dos caras fracturadas.

Los resultados de este ensayo se presentan a continuación, en la Tabla 5-7:

Tabla 5-7: Resultados ensayo de Partículas Fracturadas.

Agregado	1 o más caras fracturadas	2 o más caras fracturadas
Grava 3/4"	98%	91%
Gravilla 1/2"	99%	95%

5.1.2.2.2 Angularidad del Agregado Fino

Este ensayo se realiza sobre las partículas de agregado fino (menores de 2.36 [mm]) de las pilas de acopio. En la tabla 5-8 se especifican los requerimientos de Superpave para la angularidad del agregado fino: [4]

Tabla 5-8: Requerimientos de Superpave para el ensayo de angularidad del agregado fino.

Tránsito, en 10 ⁶ ESALs	Profundidad desde la superficie	
	<100[mm]	>100[mm]
<0,3	-	-
<1	40	-
<3	40	40
<10	45	40
<30	45	40
<100	45	45
≥100	45	45

***Nota:** Los valores se presentan como porcentaje de vacíos de aire en el agregado fino ligeramente compactado.

Los resultados de este ensayo se presentan a continuación, en la Tabla 5-9:

Tabla 5-9: Resultado ensayo de Vacíos de Aire.

Resultado ensayo Vacíos de Aire	
Agregado	Vacíos de Aire [%]
Polvo de Roca 3/8"	50

El resultado obtenido indica que se encuentra en la categoría de más de 100 millones de ESAL's.

5.1.2.2.3 Partículas Chatas y Alargadas

Este ensayo se realiza sobre las partículas gruesas (mayores de 4.75 [mm]) del agregado en las pilas de acopio. En la tabla 5-10 se especifican los requerimientos de Superpave para la angularidad del agregado grueso: [4]

Tabla 5-10: Requerimiento SUPERPAVE para Partículas Chatas y Alargadas.

Tránsito, en 10 ⁶ ESALs	Máx. porcentaje en peso
<0,3	-
<1	-
<3	10
<10	10
<30	10
<100	10
≥100	10

Los resultados de este ensayo se presentan a continuación, en la Tabla 5-11:

Tabla 5-11: Resultados ensayo de Partículas Chatas y Alargadas.

Resultados ensayo de Partículas Chatas y Alargadas	
Agregado	Porcentaje [%]
Grava 3/4"	0,93
Gravilla 1/2"	2,51

El resultado obtenido indica que se encuentra en la categoría de más de 100 millones de ESAL's.

5.1.2.2.4 Contenido de Arcilla o Equivalente de Arena

Este ensayo se realiza sobre las partículas de agregado fino -menores de 4.75 [mm]- de los agregados de las pilas de acopio. En la Tabla 5-12 se especifican los requerimientos de SUPERPAVE para contenido de arcilla: [4]

Tabla 5-12: Requerimiento SUPERPAVE para el Contenido de Arcilla.

Tránsito, en 10 ⁶ ESALs	Máx. porcentaje en peso
<0,3	40
<1	40
<3	40
<10	45
<30	45
<100	50
≥100	50

Los resultados de este ensayo se presentan a continuación, en la Tabla 5-13:

Tabla 5-13: Resultados ensayo de Equivalente de Arena.

Resultados ensayo Equivalente de Arena	
Agregado	Equivalente de Arena [%]
Polvo de Roca 3/8"	65%

El resultado obtenido indica que se encuentra en la categoría de más de 100 millones de ESAL's.

Los resultados de las propiedades de consenso analizadas para cada pila de acopio, se presentan en la Tabla 5-14, junto con los requerimientos exigidos por la metodología SUPERPAVE:

Tabla 5-14: Resultados de las propiedades de consenso.

Propiedades de consenso	Grava 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca 3/8"	Requerimiento SUPERPAVE
Angularidad del Agregado Grueso (1) [%]	98	99	-	80% Mínimo
Angularidad del Agregado Grueso (2) [%]	91	95	-	75% Mínimo
Angularidad del Agregado Fino [%]	-	-	50,1	40% Mínimo
Partículas Chatas y Alargadas [%]	0,93	2,51	0	10% Máximo
Equivalente de Arena [%]			66	45% Mínimo
(1) Porcentaje de una o más caras fracturadas				
(2) Porcentaje de dos o más caras fracturadas				

5.1.2.3 Propiedades de Origen

Son aquellas propiedades asociadas a la calidad de la fuente del agregado. No obstante, los expertos viales del programa SHRP no pudieron acordar valores críticos para dichas propiedades, ya que estos son específicos para cada fuente de origen.

Las propiedades de origen son:

- Tenacidad.
- Durabilidad.
- Materiales deletéreos.

Las propiedades de consenso se determinan según ensayos, regidos por las normativas descritas en la Tabla 5-15:

Tabla 5-15: Propiedades de origen y normativa asociada.

Propiedades de Origen	Norma
Tenacidad	AASHTO T-96 [13] y M.C. 8.202.11 [14]
Durabilidad	AASHTO T-104 [15] y M.C. 8.202.17 [16]
Materiales deletéreos	ASTM 4791-99 [10] y M.C. 8.202.16 [17]

Los resultados para las propiedades de origen, analizadas para cada pila de agregados, se presentan en la Tabla 5-16, donde se aprecia que todas las propiedades cumplen con los requerimientos exigidos por el proyecto especificado en ETE N°1ª.

Tabla 5-16: Resultados propiedades de origen.

Propiedades de origen	Grava 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca 3/8"	Requerimiento ETE N°1A
Tenacidad [%]	12	15	16	25% Máximo
Durabilidad [%]				
Desintegración por sulfato de Sodio	1	1	0,7	10% Máximo
Desintegración por sulfato de Magnesio	1,2	1,2	0,9	13% Máximo
Materiales deletéreos [%]	0,03	0,13	0	5% Máximo

5.2 SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE AGREGADO DE DISEÑO

Para seleccionar la estructura del agregado de diseño, se deben calcular las granulometrías de las mezclas de prueba por medio de combinaciones de las granulometrías individuales de cada una de las pilas de acopio de agregados. La selección de la estructura del agregado es un proceso de prueba y error, ya que consiste en mezclar, en distintos porcentajes, los agregados disponibles hasta conseguir una dosificación que satisfaga los requerimientos de SUPERPAVE. Normalmente, son empleadas 3 mezclas de pruebas para este propósito. Una mezcla de prueba se considera aceptable, si posee las propiedades volumétricas adecuadas (en base a las condiciones de tránsito y medio ambiente) para un determinado contenido de ligante asfáltico de diseño [4]. Luego, se evalúa la mejor mezcla de prueba que cumpla con los requerimientos y esta se convierte en la estructura del agregado de diseño.

La granulometría de control se basa en 4 tamices de control (control sieves): el máximo, el máximo nominal, el de 2.36 [mm], y el de 75 [micrones].

El tamaño máximo nominal (nominal maximum sieve) es un tamaño mayor que el primer tamiz que retiene más del 10% del agregado combinado.

El tamaño máximo (maximum sieve size) es un tamaño mayor que el tamiz máximo nominal.

La mezcla de prueba debe pasar entre los puntos de control y los rangos de la banda granulométrica especificada por proyecto. Dichos puntos de control aseguran una buena graduación para el agregado, evitando de esta forma la segregación.

La Tabla 5-17, detalla los puntos de control existentes en SUPERPAVE según el tamaño máximo nominal del agregado.

Tabla 5-17: Puntos de Control según Tamaño Máximo Nominal.

Tamaño Máximo Nominal del Agregado-Puntos de Control (% que pasa)												
Tamaño Tamiz [mm]	37.5 [mm]		25.0 [mm]		19.0 [mm]		12.5 [mm]		9.5 [mm]		4.75 [mm]	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
50.0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37.5	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.0	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-
19.0	-	-	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-
12.5	-	-	-	-	-	90	90	100	100	-	100	-
9.5	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100	95	100
4.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100
2.36	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67	-	-
1.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	55
0.075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10	6	13

Al cambiar el tamaño nominal de la mezcla, cambian los valores mínimos y máximos requeridos para los tamices de control. La Tabla 5-18, indica los requerimientos granulométricos para esta memoria:

Tabla 5-18: Criterio Granulométrico para una mezcla nominal de 19,0 [mm].

Criterio Granulométrico para una mezcla nominal de 19,0 [mm]		
Tamaño Tamiz [mm]	19.0	
	Min.	Max.
50.0	-	-
37.5	-	-
25.0	100	-
19.0	90	100
12.5	-	90
9.5	-	-
4.75	-	-
2.36	23	49
1.18	-	-
0.075	2	8

5.2.1 Selección Granulométrica de las Mezclas de Pruebas

La selección granulométrica de las mezclas busca encontrar una dosificación que cumpla con los requisitos expuestos anteriormente. Para esto, se realizan combinaciones matemáticas de las granulometrías individuales de los materiales. Luego, las mezclas de prueba deben compararse con los requerimientos SUPERPAVE (Puntos de Control) y además, las distintas fracciones de áridos deben combinarse en proporciones tales que la mezcla resultante cumpla con la granulometría especificada para el proyecto, la cual se presenta en la Tabla 5-19:

Tabla 5-19: Granulometría Graduación ¾".

Granulometría Graduación: ¾" máx. 19[mm]		
Tamiz		%Pasa
[mm]	ASTM	
25	1"	-
19	¾"	100
12,5	½"	79-99
9,5	⅜"	68-88
4,75	Nº4	48-68
2,36	Nº8	33-53
1,18	Nº16	20-40
0,63	Nº30	14-30
0,315	Nº50	9-21
0,15	Nº100	6-16
0,075	Nº200	3-6

Se realizaron 3 mezclas de prueba para la elaboración de la estructura del agregado de diseño, cuyos datos se presentan en las Tablas 5-20, 5-21 y 5-22 respectivamente. Además, se representan gráficamente los resultados en las Figuras 5-2, 5-3, 5-4:

Tabla 5-20: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 1.

Mezcla de Prueba (MP) 1 - Agregado 19 [mm] - 3/4"							
Material	Grava 3/4"		Gravilla 1/2"		Polvo de Roca 3/8"		MP1
% Usado	19%		23%		58%		
Tamiz	% Pasa	% Prop.	% Pasa	% Prop.	% Pasa	% Prop.	
1"	100	19,00	100	23,00	100	58,00	100
3/4"	100	19,00	100	23,00	100	58,00	100
1/2"	34	6,46	100	23,00	100	58,00	87
3/8"	2	0,38	67	15,41	100	58,00	74
N°4	1	0,19	3	0,69	95	55,10	56
N°8			0	0,00	66	38,28	38
N°16					42	24,36	24
N°30					29	16,82	17
N°50					21	12,18	12
N°100					15	8,70	9
N°200					9,0	5,22	5,22

Figura 5-2: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 1.

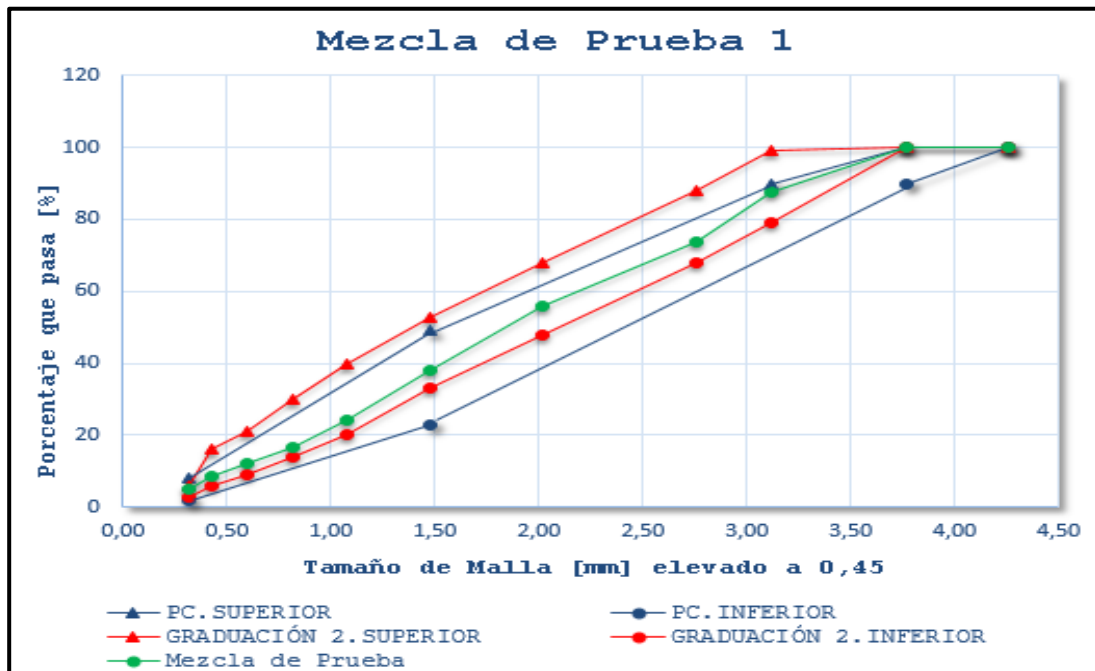


Tabla 5-21: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 2.

Mezcla de Prueba (MP) 2 - Agregado 19 [mm] - 3/4"							
Material	Grava 3/4"		Gravilla 1/2"		Polvo de Roca 3/8"		MP2
% Usado	16%		29%		55%		
Tamiz	% Pasa	% Prop.	% Pasa	% Prop.	% Pasa	% Prop.	
1"	100	16,00	100	29,00	100	55,00	100
3/4"	100	16,00	100	29,00	100	55,00	100
1/2"	34	5,44	100	29,00	100	55,00	89
3/8"	2	0,32	67	19,43	100	55,00	75
N°4	1	0,00	3	0,87	95	52,25	53
N°8			0	0,00	66	36,30	36
N°16					42	23,10	23
N°30					29	15,95	16
N°50					21	11,55	12
N°100					15	8,25	8
N°200					9,0	4,95	4,95

Figura 5-3: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 2.

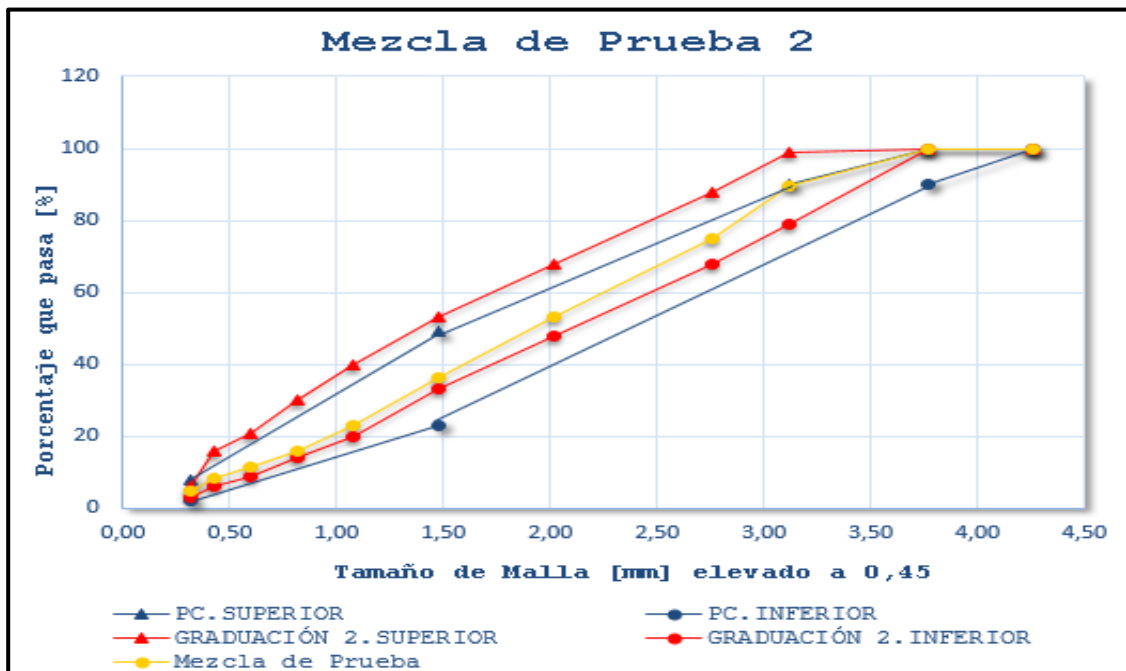
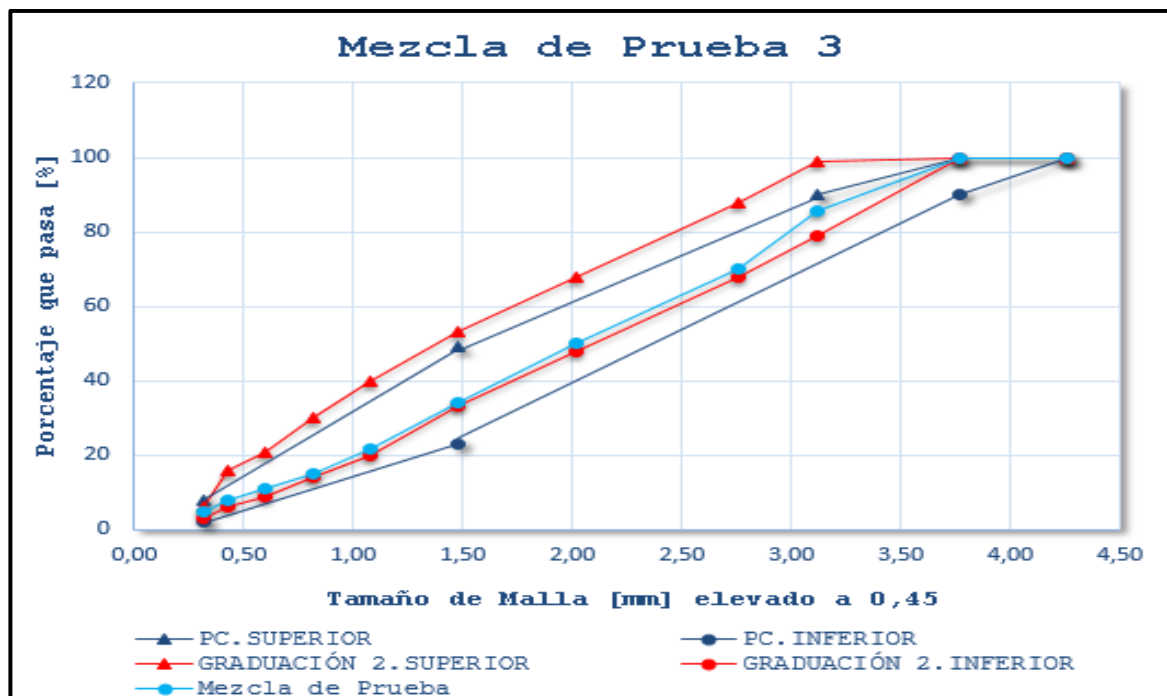


Tabla 5-22: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 3.

Mezcla de Prueba (MP) 3 - Agregado 19 [mm] - 3/4"							
Material	Grava 3/4"		Gravilla 1/2"		Polvo de Roca 3/8"		MP3
% Usado	22%		26%		52%		
Tamiz	% Pasa	% Prop.	% Pasa	% Prop.	% Pasa	% Prop.	
1"	100	22,00	100	26,00	100	52,00	100
3/4"	100	22,00	100	26,00	100	52,00	100
1/2"	34	7,48	100	26,00	100	52,00	85
3/8"	2	0,44	67	17,42	100	52,00	70
N°4	1	0,00	3	0,78	95	49,40	50
N°8			0	0,00	66	34,32	34
N°16					42	21,84	22
N°30					29	15,08	15
N°50					21	10,92	11
N°100					15	7,80	8
N°200					9,0	4,68	4,68

Figura 5-4: Distribución granulométrica para Mezcla de Prueba 3.

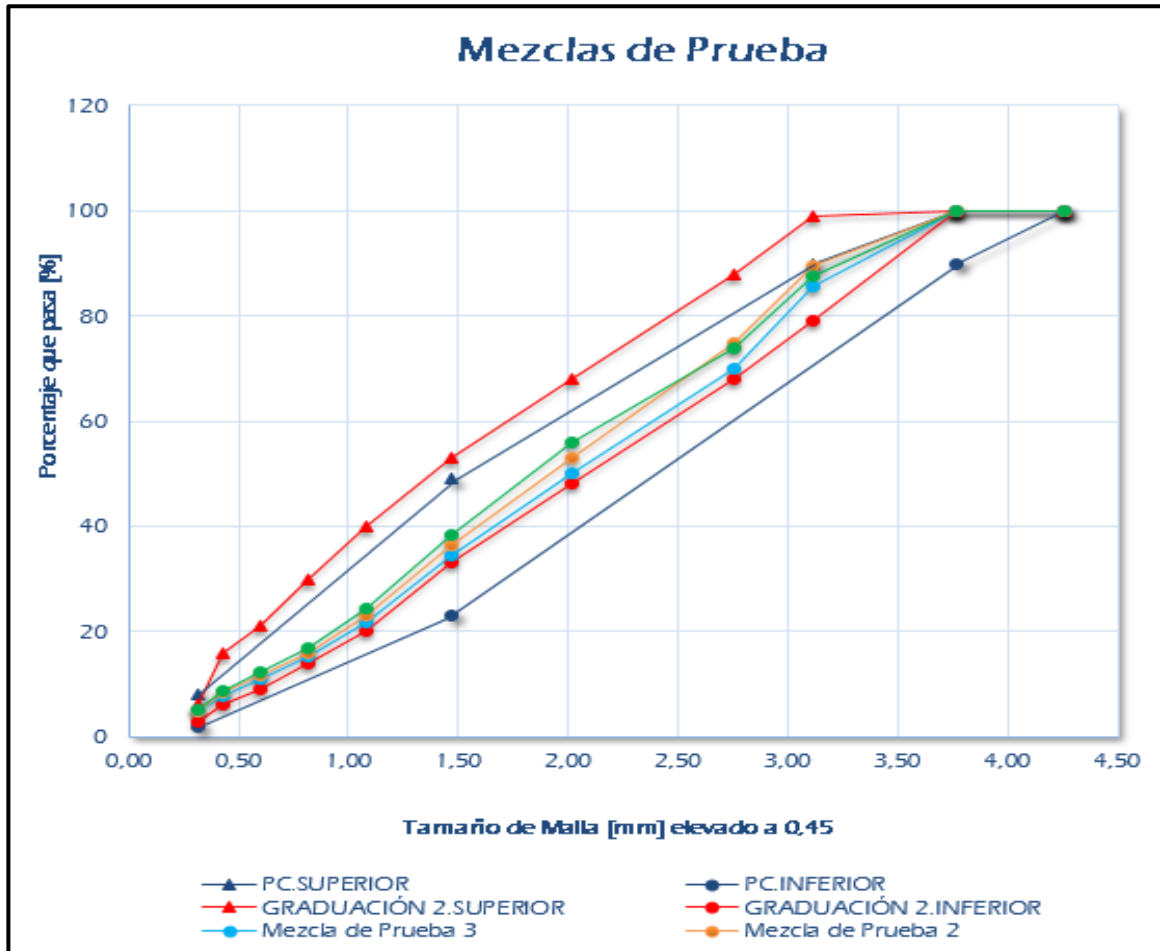


Se puede apreciar en las tablas adjuntas que las 3 mezclas de prueba cumplen con los requerimientos. A modo de resumen, se presentan los datos de todas las mezclas en la Tabla 5-23:

Tabla 5-23: Resumen granulometría mezclas de pruebas.

Tamiz		Mezcla de Prueba 1	Mezcla de Prueba 2	Mezcla de Prueba 3	Puntos de Control	Banda de Proyecto
[mm]	ASTM					
25	1"	100	100	100	100	100
19	3/4"	100	100	100	90-100	100
12,5	1/2"	87,46	89,44	85,48	-90	79-99
9,5	3/8"	73,79	74,75	69,86	-	68-88
4,75	N°4	55,98	53,12	50,18	-	48-68
2,36	N°8	38,28	36,3	34,32	23-49	33-53
1,18	N°16	24,36	23,1	21,84	-	20-40
0,63	N°30	16,82	15,95	15,08	-	14-30
0,315	N°50	12,18	11,55	10,92	-	9--21
0,15	N°100	8,7	8,25	7,8	-	6--16
0,075	N°200	5,22	4,95	4,68	2--8	3--6

Figura 5-5: Gráfica granulometría mezclas de pruebas.



Una vez seleccionadas las mezclas, se deben determinar las propiedades de los agregados mezclados. Estas propiedades se estiman matemáticamente a partir de las propiedades de los agregados individuales para luego corroborar que cumplan con los requerimientos. A continuación, se presentan las propiedades en la Tabla 5-24:

Tabla 5-24: Propiedades estimadas de las Mezclas de Prueba

PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS DE AGREGADOS ESTIMADA				
GRAVEDADES ESPECÍFICAS				
PROPIEDAD	CRITERIO	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Gravedad Específica Bruta [Gsb]	-	2667,94	2668,69	2669,8
Gravedad Específica Aparente [Gsa]	-	2778,28	2778,49	2778,16
PROPIEDADES DE CONCENSO				
PROPIEDAD	CRITERIO	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Angularidad Agregado Grueso (1)-(2)	95%-90% mín.	99% - 95%	99% - 95%	99% - 95%
Angularidad Agregado Fino	45% mín.	0,5005	0,5005	0,5005
Partículas Planas y Alargadas	10% máx.	0,00754	0,008767	0,008572
Equivalente de Arena	45 mín.	0,65	0,65	0,65
PROPIEDADES DE ORIGEN				
PROPIEDAD	CRITERIO	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Tenacidad	0,25	0,151584	0,15222	0,149976
Durabilidad	0,1	0,02868	0,02757	0,02664
Materiales Deletérios	0,05	0,0003591	0,0004305	0,0004074
(1) Porcentaje de una o más caras fracturadas				
(2) Porcentaje de dos o más caras fracturadas				

5.2.2 Contenido de ligante asfáltico de mezclas de prueba

El contenido de ligante asfáltico se determina para cada mezcla de prueba estimando la gravedad específica efectiva de la mezcla (G_{se}), el volumen del ligante asfáltico (V_{ba}) y el volumen del ligante efectivo (V_{be}). La gravedad específica efectiva de la mezcla se estima con: [4]

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8(G_{sa} - G_{sb})$$

Ecuación 5-1: Estimación Gravedad Específica Efectiva.

El volumen de ligante asfáltico (V_{ba}) absorbido en el agregado se estima con:

$$V_{ba} = \frac{P_s * (1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}} * \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}} \right)$$

Ecuación 5-2: Estimación de Volumen de Ligante asfáltico absorbido.

Donde:

V_{ba} : Volumen Absorbido de ligante, [cm^3/cm^3] de mezcla.

P_b : Porcentaje de Ligante [%] (se ha supuesto 0.05).

P_s : Porcentaje de Agregado [%] (se ha supuesto 0.95).

G_b : Gravedad Específica del Ligante (se ha supuesto 1.02).

V_a : Volumen de Vacíos de Aire (se fija un valor de 0.04 [cm^3/cm^3]).

El volumen del ligante efectivo (V_{be}) puede determinarse a partir de la ecuación:

$$V_{be} = 0,0081 - 0,02931 * [\ln(S_n)]$$

Ecuación 5-3: Estimación Volumen de Ligante efectivo.

Donde:

S_n : es el tamaño de tamiz máximo nominal de la mezcla de agregados (en pulgadas).

Finalmente, el contenido de prueba inicial del ligante asfáltico se calcula como:

$$P_{bi} = \frac{G_b * (V_{be} + V_{ba})}{G_b * (V_{be} + V_{ba}) + W_s} * 100$$

Ecuación 5-4: Estimación de Contenido de prueba inicial de ligante asfáltico.

Donde:

P_{bi} : Porcentaje de Ligante [%] (en peso de la mezcla).

W_s : Peso del Agregado [g].

A continuación, en la Tabla 5-25 se presentan un resumen de los resultados obtenidos en el cálculo del contenido de ligante asfáltico:

Tabla 5-25: Contenido de ligante asfáltico.

Propiedad	Mezcla de prueba 1	Mezcla de prueba 2	Mezcla de prueba 3
G_{se}	2756,2	2756,5	2756,5
V_{ba}	0,0278	0,0277	0,0273
	2,781%	2,767%	2,729%
V_{be}	0,08943		
	8,943%		
W_s [g]	2,317	2,317	2,317
P_{bi} [%]	4,91	4,91	4,89

5.3 ELABORACIÓN DE PROBETAS

Una vez que se ha determinado el contenido inicial de ligante asfáltico, se compacta con el SGC un mínimo de 2 especímenes por cada mezcla de prueba. Además, se preparan otros dos especímenes para la determinación de la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}). [4]

Las mezclas diseñadas mediante la metodología SUPERPAVE deben someterse a un acondicionamiento específico, el cual consiste en dejar la mezcla asfáltica durante 2 horas dentro de un horno de tiro forzado a la temperatura de compactación (157 ± 10 [°C] para esta memoria). Este procedimiento se realiza para simular el envejecimiento a corto plazo que ocurre durante el almacenamiento y transporte de la mezcla asfáltica.

5.3.1 Preparación de la mezcla

1. Colocar en un recipiente los agregados pétreos y llevarlos al horno a una temperatura 15 [°C] mayor que la de mezclado (174 ± 5 [°C]). Mientras los agregados se calientan, calentar el ligante asfáltico hasta la temperatura de mezclado.
2. Colocar el recipiente con los agregados a temperatura de mezclado sobre una balanza y tarar (calibrar balanza a cero).



Figura 6: Dosificación de agregados pétreos

3. Formar un cráter en el agregado e incorporar asfalto hasta conseguir el peso deseado.



Figura 7: Incorporación de asfalto a la mezcla de agregados.

4. Mezclar el asfalto con el agregado, hasta que el asfalto cubra completamente la superficie del agregado. Durante el proceso, se debe mantener la temperatura de mezclado durante el rango especificado.



Figura 8: Mezcla de ligante asfáltico y agregados.

5. Colocar la mezcla en un recipiente plano.



Figura 9: Colocación de mezcla sobre bandeja.

6. Llevar el recipiente con la mezcla al horno por 2 horas a la temperatura de compactación. Debe ser revuelto cada hora para asegurar un envejecimiento uniforme.
7. Repetir este procedimiento hasta conseguir el número de especímenes a ensayar.
8. Al finalizar el envejecimiento, realizar el ensayo de gravedad específica teórica máxima y la compactación de especímenes.

5.3.2 Fabricación de probetas

La compactación de las probetas debe cumplir un determinado número de giros, según los requerimientos establecidos en la ETE N°1A.

- $N_{inicial}$ = es el número de giros que produce la mínima compactación que se debe presentar en terreno.
- $N_{diseño}$ = es el número de giros que se necesitan para producir la compactación de diseño en terreno. En nuestro caso corresponde a 75 giros.
- $N_{máximo}$ = es el número de giros que produce la máxima compactación que se debe presentar en terreno. En nuestro caso corresponde a 115 giros.

El procedimiento que se debe seguir para la compactación de especímenes, es el siguiente:

1. Preparar el compactador giratorio mientras la muestra se envejece. Se debe calibrar la presión y la altura del compactado. Además, debe definirse el número de giros de diseño, $N_{diseño}$, que para efectos de esta memoria corresponde a 75 giros.
2. Aproximadamente unos 45 a 60 minutos antes de realizar la compactación del primer espécimen, se debe colocar el molde de compactación y los platillos complementarios en el horno a la temperatura de compactación. Esto es, para reducir las pérdidas de temperatura durante la compactación.
3. Retirar el molde y platillos del horno.
4. Colocar el primer platillo del molde y un disco de papel con desmoldante.

5. Colocar la mezcla envejecida en el molde, nivelarla y colocar un disco de papel con desmoldante en la superficie. Luego, colocar el segundo platillo y depositar el molde con la mezcla en el compactador. Verificar que el molde quede centrado sobre el piso de carga que aplicará la presión.
6. Iniciar la compactación y esperar hasta que se alcance el $N_{\text{diseño}}$. La altura del espécimen es constantemente monitoreada y registrada después de cada giro.
7. Una vez alcanzado el $N_{\text{diseño}}$, retirar el molde con la mezcla compactada.
8. Esperar a que la muestra compactada se enfríe y retirar el espécimen del molde.
9. Retirar los discos de papel de la base y superficie e identificar cada mezcla de prueba con un marcador.
10. Repetir el proceso de compactación para todos los especímenes a ensayar.

5.4 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA DE DISEÑO

5.4.1 Selección de estructura de agregado de diseño

Para determinar los parámetros volumétricos se realizaron los ensayos correspondientes para determinar la Gravedad Específica Bruta (G_{mb}) y la Gravedad Específica Teórica Máxima (G_{mm}).

5.4.1.1 Gravedad Específica Teórica Máxima (G_{mm})

Se determina la Gravedad Específica Teórica Máxima (medida) para cada una de las mezclas en su estado suelto, según el procedimiento indicado en la Norma AASHTO T-209 [18]. Dicho procedimiento consiste en saturar la mezcla al ser sumergida completamente en agua en un recipiente al que se aplica vacío, con el fin de extraer todo el aire que contiene la mezcla. La expresión para determinar la Gravedad Específica Teórica Máxima es:

$$G_{mm} = \frac{M_n}{M_n + M_{pa} - M_{pam}} * \rho_t$$

Ecuación 5-5: Determinación de Gmm.

Donde:

M_n : masa de la muestra a temperatura ambiente [kg].

M_{pa} : masa del recipiente lleno con agua [kg].

M_{pam} : masa del recipiente con agua y muestra [kg].

ρ_t : densidad del agua a T° de ensaye [kg/m^3].

5.4.1.2 Gravedad Específica Bruta (G_{sb})

La Gravedad Específica Bruta (medida) se mide sobre una probeta compactada a temperatura ambiente, según el procedimiento indicado en la Norma AASHTO T-166.

El procedimiento a seguir es para probetas con un porcentaje de absorción de agua menor a 2%. La expresión para determinar la Gravedad Específica Bruta es:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

Ecuación 5-6: Determinación de G_{mb} medida.

Donde:

A: masa del espécimen al aire [g].

B: masa del espécimen saturado y superficialmente seco [g].

C: masa del espécimen sumergido en agua [g].

Siendo conocidos el peso de la mezcla, el diámetro del molde fijo de 150 [mm] y la altura del espécimen para cualquier giro de compactación; la Gravedad Específica Bruta puede ser estimada (G_{mb} estimada) para cualquier número de giros durante la compactación, considerando el volumen de la probeta como un cilindro de paredes lisas de diámetro conocido y altura medida.

Al comparar los valores de G_{mb} (estimada) y G_{mb} (medida) de los especímenes surge una diferencia. Esta diferencia se debe a que al calcular G_{mb} (estimada) se consideró al espécimen como un cilindro liso, lo cual no se corresponde con la realidad. El volumen real es menor que lo considerado, ya que existen vacíos superficiales en las paredes del espécimen. Por lo tanto, la Gravedad Específica Bruta estimada debe corregirse mediante un factor, el cual se obtiene de la relación entre la Gravedad Específica Bruta medida ($N_{m\acute{a}x}$) y la Gravedad Específica Bruta estimada para ($N_{m\acute{a}x}$).

5.4.1.3 Densificación de las Mezclas de Prueba

Se calcula la Gravedad Específica Bruta (estimada) de la mezcla, considerando el diámetro del molde y la altura medida del espécimen, según la siguiente fórmula:

$$G_{mb}(\text{estimada}) = \frac{W_m}{V_{mezcla}}$$

Ecuación 5-7: Determinación de G_{mb} estimada.

Donde:

G_{mb} (estimada): Gravedad Específica Bruta estimada del espécimen.

W_m : Masa del espécimen [g].

V_{mezcla} : Volumen de probeta compactada [cm³]. Se calcula usando:

- d: diámetro del molde (150 [mm]);
- h_x: altura del espécimen en el molde durante la compactación [mm]; y
- π : 3,1416

Se calcula el factor de corrección usando la siguiente fórmula: [4]

$$C = \frac{G_{mb}(\text{medida})}{G_{mb}(\text{estimada})}$$

Ecuación 5-8: Determinación de factor de corrección.

Donde:

C: factor de corrección.

G_{mb} (medida): gravedad específica bruta medida después de $N_{m\acute{a}x}$.

G_{mb} (estimada): gravedad específica bruta a $N_{m\acute{a}x}$.

El G_{mb} estimado para todos los otros números de giros puede luego corregirse empleando el factor de corrección:

$$G_{mb}(\text{corregida}) = C * G_{mb}(\text{estimada})$$

Ecuación 5-9: Gravedad Específica Bruta corregida.

Donde:

G_{mb} (corregida): Gravedad Específica bruta corregida a cualquier número de giros.

C: factor de corrección.

G_{mb} (estimada): Gravedad Específica bruta estimada a cualquier número de giros.

El último paso es calcular el % G_{mm} para cada uno de los especímenes de prueba. Para ello, se divide la Gravedad Específica Bruta del espécimen (corregido) por el valor medido de G_{mm} . El promedio de los % G_{mm} para los especímenes duplicados también es informado. El promedio de % G_{mm} se usa como base para la comparación entre las mezclas de prueba.

En las Tablas 5-26, 5-27 y 5-28 se presentan los valores de densificación para las mezclas de prueba 1, 2 y 3 respectivamente. Los puntos más importantes de comparación son % G_{mm} para $N_{inicial}$, $N_{diseño}$ y $N_{m\acute{a}ximo}$.

Tabla 5-26: Densificación para mezcla de prueba 1.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA DE PRUEBA 1									
Gmm	2,517								
N° de Giros	Especímen 1				Especímen 2				%Gmm [prom]
	Ht [mm]	Gmb (est) [g/cm3]	Gmb (corr) [g/cm3]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb (est) [g/cm3]	Gmb (corr) [g/cm3]	Gmm [%]	
7	125,2	2,11	2,20	87,23%	126	2,10	2,19	86,89%	87,06%
75	114,3	2,31	2,41	95,55%	114,9	2,30	2,40	95,28%	95,42%
115	112,8	2,34	2,44	96,82%	113,4	2,33	2,43	96,54%	96,68%
Gmb (Medido)		2,437				2,43			

Tabla 5-27: Densificación para mezcla de prueba 2.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA DE PRUEBA 2									
Gmm	2,522								
N° de Giros	Espécimen 1				Espécimen 2				%Gmm [prom]
	Ht [mm]	Gmb (est) [g/cm3]	Gmb (corr) [g/cm3]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb (est) [g/cm3]	Gmb (corr) [g/cm3]	Gmm [%]	
7	126,7	2,08	2,18	86,25%	126,3	2,09	2,18	86,47%	86,36%
75	115,2	2,29	2,39	94,86%	115,5	2,28	2,38	94,55%	94,71%
115	113,7	2,32	2,42	96,11%	114,0	2,31	2,42	95,80%	95,96%
Gmb (Medido)		2,424				2,416			

Tabla 5-28: Densificación para mezcla de prueba 3.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA DE PRUEBA 3									
Gmm	2,515								
N° de Giros	Espécimen 1				Espécimen 2				%Gmm [prom]
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	
7	126,0	2,10	2,20	87,14%	126,6	2,09	2,19	86,89%	87,01%
75	114,7	2,30	2,41	95,72%	115,2	2,30	2,41	95,49%	95,61%
115	113,3	2,33	2,44	96,91%	113,7	2,33	2,44	96,75%	96,83%
Gmb (Medido)		2,443				2,439			

5.4.1.4 Parámetros Volumétricos de las Mezclas de Prueba Compactadas

El promedio de %G_{mm} se determina para N_{inicial} (7 giros), N_{diseño} (75 giros) y N_{máximo} (115 giros) para cada mezcla de prueba. La Tabla 5-29 presenta esos valores para las Mezclas de Prueba 1, 2 y 3. [4]

Tabla 5-29: Promedio %Gmm para N_{inicial}, N_{diseño} y N_{máximo} para mezclas de prueba.

Mezcla de Prueba	%Gmm @ N _{ini}	%Gmm @ N _{dis}	%Gmm @ N _{máx}
1	87,1%	95,4%	96,7%
2	86,4%	94,7%	96,0%
3	87,0%	95,6%	96,8%

El porcentaje de vacíos de aire (V_a) y vacíos del agregado mineral (VAM) se determinan para N_{diseño}. El porcentaje de vacíos de aire se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Vacíos de aire} = 100 - \%G_{mm}@N_{diseño}$$

Ecuación 5-10: Cantidad de Vacíos de aire.

$$\%VAM = 100 - \frac{\%G_{mm}@N_{diseño} * G_{mm} * P_s}{G_{sb}}$$

Ecuación 5-11: Cantidad de Vacíos de Agregado Mineral.

La Tabla 5-30 muestra los resultados de V_a y VAM para cada Mezcla de Prueba:

Tabla 5-30: Resultados de V_a y VAM.

Mezcla de Prueba	V_a [%]	VAM [%]
1	4,6	14,4
2	5,3	14,9
3	4,4	14,1

La Tabla 5-31 presenta un resumen de los valores de la compactación de las muestras de prueba.

Tabla 5-31: Resumen de compactación de las Mezclas de Prueba.

Mezcla de Prueba	%Asfalto	% G_{mm} @ N=7	% G_{mm} @ N=75	% G_{mm} @ N=115	%Vacíos de aire	%VAM
1	4,9%	87,1%	95,4%	96,7%	4,6%	14,4%
2	4,9%	86,4%	94,7%	96,0%	5,3%	14,9%
3	4,9%	87,0%	95,6%	96,8%	4,4%	14,1%

La premisa central del Nivel 1 de diseño de mezclas de Superpave es emplear en cada muestra de prueba, la cantidad de ligante asfáltico que permita alcanzar, para $N_{diseño}$, exactamente 96% de G_{mm} , es decir, un 4% de vacíos de aire. En la Tabla 5-31 se puede observar que esto no se cumple para ninguna de las tres mezclas de prueba. Debido a que las mezclas de prueba tienen distintos contenidos de vacíos de aire para el $N_{diseño}$, sus propiedades volumétricas y de compactación no pueden ser adecuadamente comparadas. Por ejemplo, la Mezcla de Prueba 1 contiene una cantidad de asfalto menor que la necesaria para alcanzar el 4% de vacíos para el $N_{diseño}$. Ahora, surge la pregunta: "Si usara más asfalto en la Mezcla de Prueba 1 para alcanzar el 4% de vacíos de aire para el $N_{diseño}$ ¿Podrían el VAM y las otras propiedades requeridas mejorar hasta los niveles aceptables?". [4]

Dar respuesta a esta pregunta es un paso importante en el diseño de mezclas del Nivel 1. Para contestarla, se calcula para cada muestra de prueba el contenido de ligante asfáltico estimado para alcanzar un 4% de vacíos de aire (96% de G_{mm} para el $N_{diseño}$), empleando la siguiente fórmula empírica:

$$P_{b,estimado} = P_{bi} - [0,4 * (4 - V_a)]$$

Ecuación 5-12: Contenido de ligante asfáltico para lograr un 4% de V_a .

Donde:

$P_{b, estimado}$: porcentaje del ligante asfáltico estimado.

P_{bi} : porcentaje inicial de prueba del ligante.

V_a : porcentaje de vacíos de aire para $N_{diseño}$.

Las propiedades volumétricas (VAM y VFA) y de compactación de la mezcla se estiman luego para ese contenido de ligante asfáltico, usando las siguientes ecuaciones:

$$\%VAM_{estimado} = \%VAM_{inicial} + C * (4 - V_a)$$

Ecuación 5-13: Estimación de VAM para un 4% de vacíos de aire.

Donde:

$\%VAM_{inicial}$ = es el $\%VAM$ para el contenido de ligante de prueba.

C = constante (0,1 si $V_a < 4\%$; 0,2 si $V_a > 4\%$).

Para el VFA:

$$\%VFA_{estimado} = 100\% * \left[\frac{(\%VAM_{estimado} - 4)}{\%VAM_{estimado}} \right]$$

Ecuación 5-14: Estimación de VFA para un 4% de vacíos de aire.

Para $\%G_{mm}$ para $N_{inicial}$:

$$\%G_{mm\ estimada}@N_{inicial} = G_{mm\ prueba}@N_{inicial} - (4 - V_a)$$

Ecuación 5-15: Estimación de $\%G_{mm}@N_{inicial}$ para un 4% de vacíos de aire.

Para $\%G_{mm}$ para $N_{máximo}$:

$$\%G_{mm\ estimada}@N_{máximo} = G_{mm\ prueba}@N_{máximo} - (4 - V_a)$$

Ecuación 5-16: Estimación de $\%G_{mm}@N_{máximo}$ para un 4% de vacíos de aire.

A continuación, se presentan los valores estimados de las propiedades volumétricas de las mezclas de prueba y sus propiedades estimadas de compactación, para un contenido de ligante asfáltico con 4% de vacíos de aire para $N_{\text{diseño}}$. En las Tablas 5-32 y Tabla 5-33, respectivamente:

Tabla 5-32: Propiedades volumétricas de la mezcla estimada para $N_{\text{diseño}}$.

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA ESTIMADA PARA @ $N_{\text{diseño}}$					
Mezcla de Prueba	% de Asfalto en Mezclas de Prueba	% Asfalto Estimado	% Vacíos de Aire	%VAM	%VFA
1	4,9%	5,2%	4,0%	14,3%	72,0%
2	4,9%	5,4%	4,0%	14,6%	72,7%
3	4,9%	5,0%	4,0%	14,1%	71,5%

Tabla 5-33: Propiedades estimadas de la compactación de la mezcla.

PROPIEDADES ESTIMADAS DE LA COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA				
Mezcla de Prueba	% de Asfalto en Mezclas de Prueba	% Asfalto Estimado	%Gmm @ N = 7	%Gmm @ N = 115
1	4,9%	5,2%	87,6%	97,3%
2	4,9%	5,4%	87,7%	97,2%
3	4,9%	5,0%	87,4%	97,2%

Las propiedades estimadas se comparan con los criterios para mezclas. Para el tránsito de diseño y el tamaño máximo nominal; los criterios volumétricos y de densificación son los siguientes: [4]

Tabla 5-34: Criterios volumétricos y de densificación para mezclas SUPERPAVE.

Parámetro	Criterio
% de Vacíos de Aire	4.0%
% VAM MINIMO	13.0% (19 mm tamaño máximo nominal)
%VFA	65% - 78% (0,3 a $3 \cdot 10^6$ ESALs)
%Gmm @ N_{inicial}	$\leq 90,5\%$
%Gmm @ $N_{\text{máximo}}$	$< 98\%$

Finalmente, hay un rango requerido para la proporción de polvo (filler). Este criterio es el mismo para todos los niveles de tránsito. Se calcula como el porcentaje en peso del material que pasa por el tamiz de 0.075 [mm] (por vía húmeda) dividido por el contenido de ligante asfáltico efectivo (expresado como porcentaje en peso de la mezcla). El contenido del ligante asfáltico efectivo se calcula así:

$$P_{be,estimado} = -P_s * G_b * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} + P_{b,estimado}$$

Ecuación 5-17: Estimación de ligante asfáltico efectivo a 4% de Va.

La proporción de polvo se calcula según:

$$DP = \frac{P_{0,075}}{P_{be,estimado}}$$

Ecuación 5-18: Estimación de la proporción de Polvo para un 4% de Va.

En la Tabla 5-35, se presentan los resultados obtenidos para el contenido de ligante asfáltico efectivo ($P_{be, estimado}$) y la proporción de polvo (DP) y su criterio de aceptación.

Tabla 5-35: Resultados de $P_{be, estimado}$ y Proporción de polvo.

Mezcla de Prueba	$P_{be, estimado}$ [%]	DP	Criterio para DP
1	4,03	1,30	0,6 – 1,2
2	4,24	1,17	
3	3,96	1,18	

Luego de calcular todas las propiedades estimadas de la mezcla, se pueden analizar los valores de las mezclas de prueba y decidir si una -o más- de ellas es aceptable y seleccionarla como la estructura del agregado de diseño.

En la Tabla 5-36 se presenta un resumen de las propiedades estimadas y criterios requeridos, para analizar y escoger de mejor manera la estructura de agregados adecuada.

Tabla 5-36: Propiedades Volumétricas estimadas.

Propiedades Volumétricas Estimadas	Criterio de aceptabilidad	Valores obtenidos		
		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Ligante Asfáltico Estimado, %	-	5,2%	5,4%	5,0%
% G_{mm} @ $N_{inicial}$	<89%	87,6%	87,7%	87,4%
% G_{mm} @ $N_{diseño}$	96%	96,0%	96,0%	96,0%
% G_{mm} @ $N_{máximo}$	<98%	97,3%	97,2%	97,2%
% Vacíos de Aire	4,00%	4,0%	4,0%	4,0%

%VAM mínimo	13,0%	14,3%	14,6%	14,1%
%VFA	65 - 78%	72,0%	72,7%	71,5%
Proporción de Polvo	0.6 - 1.2	1,30	1,17	1,18

De lo anterior, se tiene que la Mezcla de Prueba 1 es inaceptable, ya que no cumple con la proporción de polvo.

Las Mezclas de Prueba 2 y 3 cumplen con los criterios exigidos. Sin embargo, la Mezcla de Prueba 2 cumple con una menor proporción de polvo. Además, el VAM de la Mezcla de Prueba 3 se encuentra demasiado cercano al mínimo exigido.

Por lo tanto, la Mezcla de Prueba 2 es seleccionada como estructura del agregado de diseño.

5.4.2 Selección del porcentaje de ligante asfáltico de diseño

El diseño volumétrico de mezclas asfálticas elaboradas mediante la metodología SUPERPAVE, recomienda como primer criterio de selección escoger aquel contenido de ligante asfáltico correspondiente al 4% de vacíos de aire (V_a), y en base a esto verificar que los parámetros volumétricos cumplen con los criterios que exige el método. Sin embargo, para efectos de esta memoria los requerimientos están establecidos en las especificaciones técnicas especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por SUPERPAVE (ETE N°1A), el cual exige elegir aquel contenido de ligante asfáltico correspondiente a un 3,5% de vacíos de aire. Se deben determinar los valores para el porcentaje de $G_{mm}@N_{inicial}$, Vacíos en el Agregado Mineral (VAM), Vacíos llenos de Asfalto (VFA) y la Proporción de Polvo (DP).

Una vez seleccionada la estructura del agregado de diseño -en este caso la Mezcla de Prueba 2- se compactan especímenes con diferentes contenidos de ligante asfáltico. Las propiedades de la mezcla luego son evaluadas para determinar el contenido de ligante asfáltico. [4]

Un mínimo de 2 especímenes es compactado para cada uno de los siguientes contenidos de asfalto:

- Contenido estimado del ligante.
- Contenido estimado del ligante $\pm 0.5\%$.
- Contenido estimado del ligante $+ 1.0\%$.

Para la Mezcla de Prueba 2, los contenidos de ligante de la mezcla de diseño son 4.9%, 5.4%, 5.9% y 6.4%. En el análisis en el Nivel 1 de SUPERPAVE, 4 contenidos de ligante asfáltico son lo mínimo a usar.

Además, se prepara un mínimo de 2 especímenes para determinar la gravedad específica teórica máxima para el contenido estimado de ligante. Los especímenes son preparados y ensayados de la misma forma que los especímenes de la sección "Selección de la estructura del agregado de diseño" de la presente memoria.

De forma complementaria, se realizan los ensayos de Gravedad Específica Bruta (G_{mb}) y Gravedad Específica Teórica Máxima (G_{mm}), para la Mezcla de Prueba 2, con las 4 cantidades de ligante asfáltico.

En las Tablas 5-37, 5-38, 5-39 y 5-40 se presentan los resultados para los cuatro contenidos de ligante asfáltico de prueba. Los puntos más importantes de comparación son $\%G_{mm}$ para $N_{inicial}$ (7 giros), $N_{diseño}$ (75 giros) y $N_{máximo}$ (115 giros).

Tabla 5-37: Densificación para Mezcla 2 con 4,9% de contenido de asfalto.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 4,9%									
Gmm	2,520								%Gmm [prom]
N° de Giros	Espécimen 1				Espécimen 2				
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	
7	127,2	2,08	2,18	86,64%	127,0	2,09	2,18	86,44%	86,54%
75	115,8	2,29	2,40	95,17%	115,3	2,30	2,40	95,21%	95,19%
115	114,2	2,32	2,43	96,51%	113,7	2,33	2,43	96,55%	96,53%
Gmb (Medido)		2,432				2,433			

Tabla 5-38: Densificación para Mezcla 2 con 5,4% de contenido de asfalto.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 5,4%									
Gmm	2,503								%Gmm [prom]
N° de Giros	Espécimen 1				Espécimen 2				
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	
7	125,8	2,10	2,19	87,43%	125,5	2,11	2,20	87,99%	87,71%
75	114,1	2,32	2,41	96,39%	114,0	2,32	2,42	96,87%	96,63%
115	112,5	2,35	2,45	97,76%	112,5	2,35	2,46	98,16%	97,96%
Gmb (Medido)		2,447				2,457			

Tabla 5-39: Densificación para Mezcla 2 con 5,9% de contenido de asfalto.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 5,9%									
Gmm	2,486								%Gmm [prom]
N° de Giros	Espécimen 1				Espécimen 2				
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	
7	125,1	2,12	2,19	88,20%	124,2	2,13	2,20	88,32%	88,26%
75	113,6	2,33	2,41	97,12%	112,8	2,35	2,42	97,25%	97,19%
115	112,0	2,36	2,45	98,51%	111,4	2,38	2,45	98,47%	98,49%
Gmb (Medido)		2,449				2,448			

Tabla 5-40 Densificación para Mezcla 2 con 6,4% de contenido de asfalto.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 6,4%									
Gmm	2,467								%Gmm [prom]
N° de Giros	Espécimen 1				Espécimen 2				
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	
7	123,3	2,14	2,20	89,32%	123,7	2,14	2,20	89,23%	89,28%
75	112,2	2,36	2,42	98,16%	112,5	2,35	2,42	98,12%	98,14%
115	110,9	2,38	2,45	99,31%	111,1	2,38	2,45	99,35%	99,33%
Gmb (Medido)		2,450				2,451			

Las propiedades de la mezcla son evaluadas para la mezcla seleccionada con diferentes contenidos de ligante asfáltico, utilizando los valores de densificación para $N_{inicial}$ (7 giros), $N_{diseño}$ (75 giros) y $N_{máximo}$ (115 giros). En las tablas 5-41 y 5-42 se presentan las propiedades de compactación y las propiedades volumétricas en función de los diferentes contenidos de ligante asfáltico.

Tabla 5-41: Resumen de compactación de la Mezcla 2.

% de Asfalto	%G _{mm} @ N _{inicial}	%G _{mm} @ N _{diseño}	%G _{mm} @ N _{máximo}
4,9%	86,5%	95,2%	96,5%
5,4%	87,7%	96,6%	98,0%
5,9%	88,3%	97,2%	98,5%
6,4%	89,3%	98,1%	99,3%

Las propiedades volumétricas se calculan para el número de giros de diseño ($N_{diseño}$) para cada contenido de ligante asfáltico de prueba. A partir de estos datos, el diseñador puede generar gráficos de contenido de vacíos de aire, VAM, y VFA en función del contenido de ligante asfáltico. [4]

Tabla 5-42: Resumen de propiedades volumétricas de Mezcla 2, para Ndiseño.

%Asfalto	% Vacíos de Aire	%VAM	%VFA	G _{mm} [kg/m ³]	DP
4,9%	4,8%	14,5%	66,9%	2520	1,32
5,4%	3,4%	14,3%	76,4%	2503	1,17
5,9%	2,8%	14,8%	81,0%	2486	1,04
6,4%	1,9%	15,1%	87,7%	2467	0,94

El contenido de ligante asfáltico de diseño se fija para lograr un 3,5% de vacíos de aire. En este caso, el contenido de ligante asfáltico de diseño que cumple con dicho requisito es de 5,4%. Para el contenido de ligante asfáltico de diseño, debemos verificar que todas las otras propiedades de las mezclas cumplan los criterios establecidos.

A partir de los valores obtenidos se generan gráficos comparativos de Vacíos de Aire, VAM, VFA y DP en función del contenido de ligante asfáltico. Estos gráficos se pueden ver en las Figuras 5-6, 5-7, 5-8 y 5-9:

Figura 5-10: Cantidad de Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico.

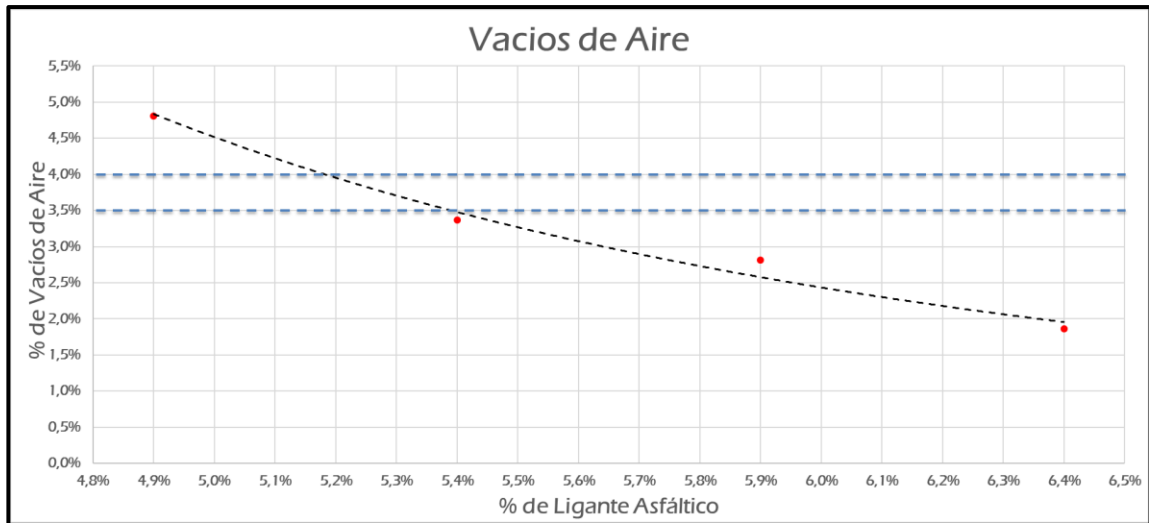


Figura 5-11 Cantidad de Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico.

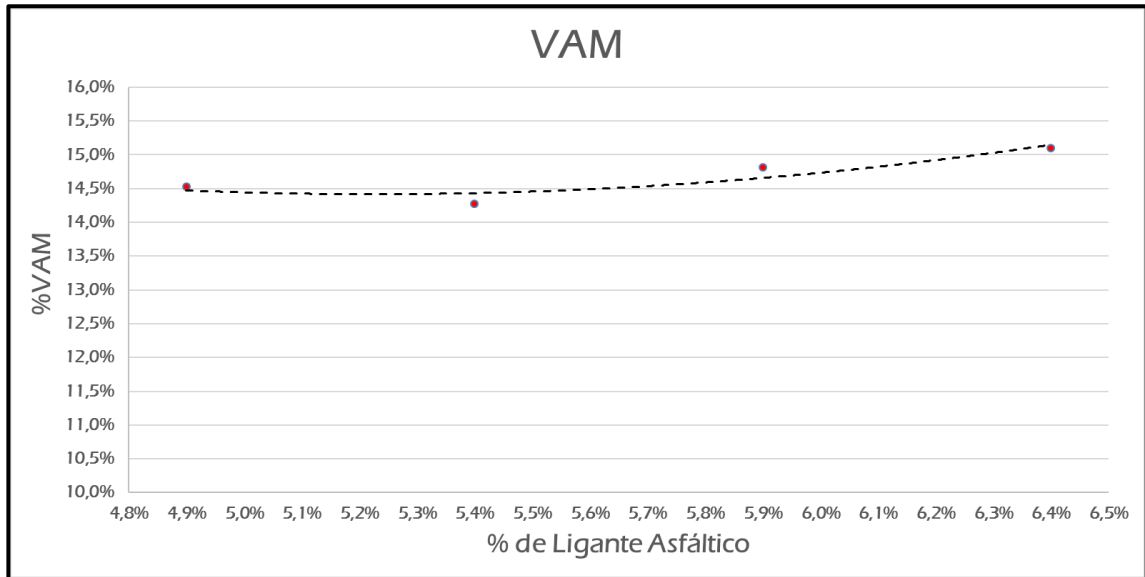


Figura 5-12: Vacíos llenos con asfalto versus contenido de ligante asfáltico.

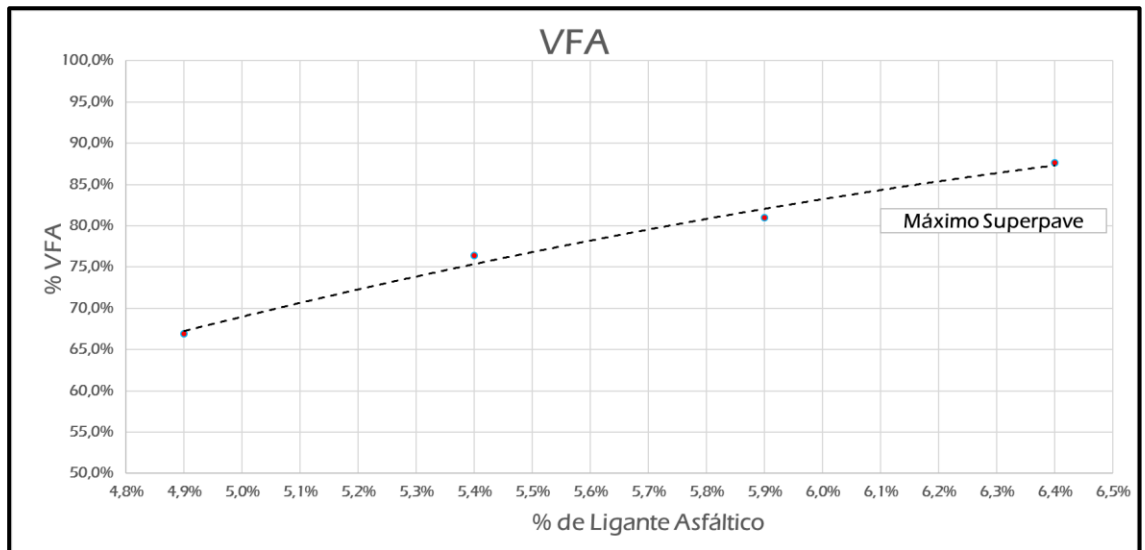
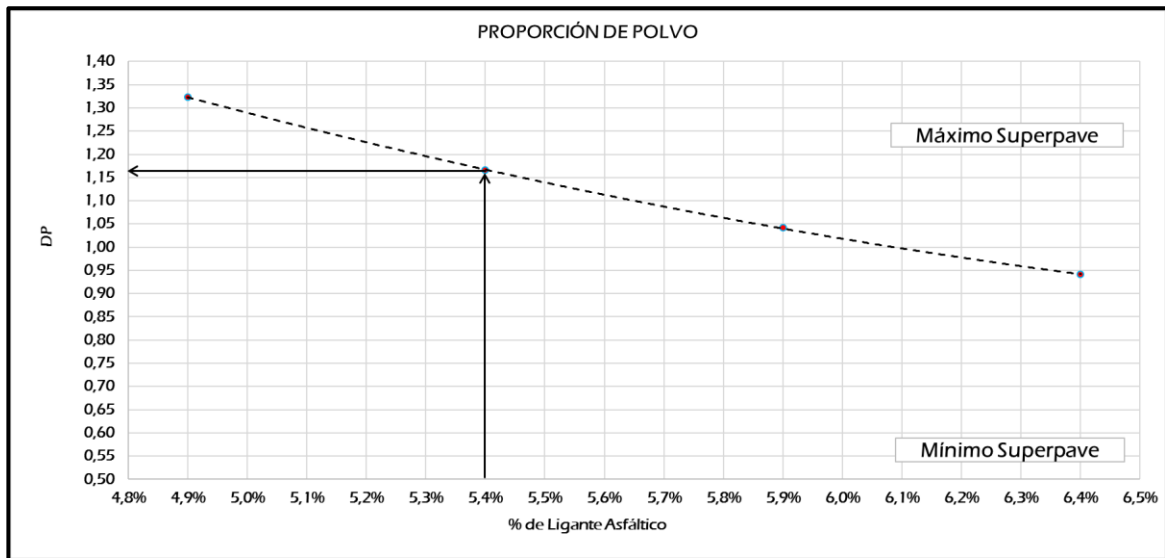


Figura 5-13: Proporción de polvo versus contenido de ligante asfáltico.



Los valores de diseño y sus respectivos criterios de aceptabilidad para una mezcla nominal de 19 [mm] (Mezcla de Prueba 2) con un contenido de ligante asfáltico de 5,4% se presentan en la Tabla 5-43.

Tabla 5-43: Propiedades de la Mezcla de diseño con 5,4% de ligante asfáltico.

Propiedad de la Mezcla	Resultado	Criterio SUPERPAVE	Criterio ETE N°1A
% de Vacíos de Aire	3,5	4 %	3,5 %
% VAM	14,4	13 %	15 %
% VFA	75,7	65% – 78 %	-
Proporción de Polvo	1,16	0,6 – 1,2	-
Contenido óptimo ligante asfáltico [%]	5,37% ± 0,1%	-	5,0% - 7,5%
%G _{mm} @ N _{inicial} = 7	87,7	≤ 90,5 %	-
%G _{mm} @ N _{diseño} = 75	96,6	96 %	-
%G _{mm} @ N _{máximo} = 115	97,9	< 98%	-

6 ENSAYO DE FATIGA

6.1 MODOS DE CARGA EN UN ENSAYO A FATIGA

Los ensayos para determinar la fatiga en laboratorio se pueden realizar con distintos modos de carga, siendo los más utilizados el ensayo a esfuerzo constante (esfuerzo controlado) y a deformación constante (deformación controlada). En el modo de carga a esfuerzo controlado, la probeta es sometida a esfuerzos que se mantienen constante para todos los ciclos de carga, por lo que la deformación asociada aumenta lentamente durante el transcurso del ensayo. En el modo de carga a deformación controlada, la probeta es sometida a ciclos de carga con deformación constante y el esfuerzo disminuye por cada ciclo. Se considera que se ha producido la falla por fatiga cuando el módulo de rigidez inicial se ve reducido a la mitad.

6.2 ENSAYO VIGA DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS

El ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas caracteriza el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a cargas de fatiga. Es uno de los ensayos más utilizados y el escogido para desarrollar la presente memoria de título. Consiste en someter la probeta prismática a cargas periódicas que simulan el paso de los vehículos sobre un pavimento flexible.

6.3 EQUIPAMIENTO

6.3.1 Compactador de Rodillo

El compactador de rodillo simula bastante bien las condiciones obtenidas en terreno; particularmente la densidad, orientación de agregados y características estructurales obtenidas en un pavimento cuando se ha seguido en forma adecuada el procedimiento de construcción. El equipo utilizado aplica una carga móvil máxima de 30[KN] sobre un molde de dimensiones 500x380x100[mm]. Se opera a través de un tablero digital incorporado, en el cuál se ingresa una rutina de compactación programada previamente (ciclos y magnitud de carga).

6.3.2 Máquina de Viga a Flexión de 4 Puntos

Equipo servo-hidráulico controlado digitalmente mediante software. Puede trabajar en dos modos de carga; a esfuerzo controlado o a deformación controlada. Posee una cámara térmica interior capaz de mantener la temperatura dentro del rango de -20[°C] a 30 [°C] y 3 LVDT (Linear Variable Differential Transducer) para medir la deformación. La onda de carga aplicada es de tipo sinusoidal. El equipo está condicionado para realizar ensayos que cumplan con los requerimientos mínimos del sistema de prueba [2].

6.4 PREPARACIÓN DE PROBETAS

El primer paso en la confección de probetas es determinar la cantidad de material a compactar. Para esto, es necesario conocer las dimensiones (volumen) del molde a

utilizar en el Compactador de Rodillo y algunas características del diseño de la mezcla asfáltica, como lo son la Gravedad Específica Máxima (G_{mm}) y el porcentaje de vacíos de diseño. Luego, con la densidad de diseño y el volumen del molde se determina la cantidad de mezcla (Kg) necesaria para la confección de las probetas [19].

Una vez determinada la cantidad de mezcla a utilizar, ésta se coloca en el horno hasta alcanzar la temperatura de compactación ± 3 [°C]. Antes de que la mezcla obtenga la temperatura esperada, colocar el molde dentro del horno para que iguale la temperatura de la mezcla, evitando así que esta disminuya al vaciar la mezcla en el molde. Cuando se alcanza la temperatura deseada, retirar el molde del horno y aplicar desmoldante sobre sus caras interiores. Luego, se debe verter la mezcla en el centro del molde con especial cuidado para evitar la pérdida y segregación del material; y a continuación fijar el molde con la mezcla en el compactador de rodillo para dar inicio a la secuencia de compactación programada. Para este tipo de mezcla la secuencia utilizada fue de:

- 2 ciclos con una presión de 0,7[Bar].
- 3 ciclos con una presión de 1,6[Bar].
- 3 ciclos con una presión de 3,0[Bar].
- 3 ciclos con una presión de 3,6[Bar].

Se compactó dos veces la mezcla para alcanzar los vacíos de aire requeridos

Cuando ha terminado la compactación, dejar la loseta enfriar a temperatura ambiente durante 15 a 16 horas antes de retirar del molde. Si la loseta sigue tibia al tacto, dejar enfriar un tiempo extra. [19]

La loseta se debe cortar para extraer dos probetas de iguales dimensiones, que serán utilizadas para ensayos de fatiga. Además, se extrae una probeta que será utilizada para cálculos de densidad y porcentajes de vacíos.

El corte se lleva a cabo según la Norma AASHTO 321-14, la cual indica que las dimensiones requeridas al finalizar el corte deben ser 380 ± 6 [mm] de longitud, 50 ± 6 [mm] de altura y 63 ± 6 [mm] de ancho. El equipo utilizado para realizar el corte de las probetas es una sierra con algún fluido lubricante. Luego, las probetas se proceden a secar y almacenar según [20].

Finalmente se debe verificar que el contenido de vacíos o densidad de las probetas sean acorde al diseño. La densidad de la mezcla compactada se debe determinar según [21].

6.4.1 Procedimiento Ensayo de Densidad

El ensayo de densidad se realiza según lo descrito en el “Método B: Probetas con Superficie Saturada Seca” presente en el Volumen 8 del Manual de Carreteras M.C. 8.302.38.

Una vez compactada la mezcla y extraída la muestra para el ensayo de densidad, dicha muestra debe secarse dentro del horno a 50[°C] durante 12 horas. Luego, se registra la masa cada 2 horas hasta alcanzar masa constante. Se considera masa constante cuando dos pesadas sucesivas difieren en un porcentaje igual o inferior al 0,1% de la menor masa de las dos registradas.

Una vez alcanzada la masa constante, la probeta se enfría hasta temperatura ambiente (25 ± 1 [°C]) y se registra la masa seca, designada como “A”.

Sumergir la probeta en un baño de agua a 25 ± 1 [°C] por 3 a 5 [min], y registrar esta masa como "C".

Retirar probeta del agua y secar superficialmente con una toalla húmeda. Esta masa se designa como "B".

Determinar el porcentaje de agua absorbida con la siguiente expresión:

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

Ecuación 6-1: Porcentaje de agua absorbida.

*Si A_{ab} es mayor que 2, debe emplearse el Método A del M.C. 8.302.38.

Calcular la densidad (G) de acuerdo a la fórmula:

$$G = \frac{A}{\frac{B - C}{\rho_w}} \times 1000 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 6-2: Densidad de mezcla asfáltica compactada.

6.5 CONDICIONES DEL ENSAYO A FATIGA

Se realizó el ensayo a fatiga para muestras obtenidas de terreno en la pista de prueba del Aeropuerto Arturo Merino Benítez. Las mezclas fueron calentadas, compactadas, cortadas y ensayadas en las dependencias de LEMCO ubicado en la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso.

Se realizaron ensayos a fatiga aplicando cuatro niveles de deformación distintos. Por cada deformación fueron ensayadas 3 probetas, obteniendo un total de 12 ensayos. Cada ensayo de fatiga se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones:

- Modo de ensayo: Deformación controlada.
- Tipo de carga: Sinusoidal
- Puntos de acción de la carga: Ensayo de flexión en cuatro puntos
- Criterio de falla: Reducción de rigidez inicial en un 50%
- Temperatura de ensayo: 20 ± 0.5 [°C]
- Frecuencia: 10 [Hz]

El ensayo de fatiga llega a su fin cuando la probeta alcanza el 50% de su rigidez inicial. El software controlador del equipo de fatiga de 4 puntos entrega los siguientes datos para cada ciclo de carga:

- Rigidez flexural;
- Esfuerzo aplicado;
- Carga aplicada;
- Deflexión;
- Energía disipada;
- Energía disipada acumulada;
- Ángulo de fase.

Los ensayos se llevan a cabo según la normativa ASSHTO T 321-14, la cual establece las siguientes relaciones para la obtención de datos por ciclos de carga:

Esfuerzo máximo de tracción [Pa]:

$$\sigma_t = \frac{0.357P}{bh^2}$$

Ecuación 6-3: Esfuerzo máximo de tracción.

Donde:

P: Carga aplicada por el actuador, en Newton;

b: Ancho promedio de la probeta, en metros;

h: Altura promedio de la probeta, en metros.

Deformación máxima de tracción [m/m]:

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

Ecuación 6-4: Deformación máxima de tracción.

Donde:

δ : Deflexión máxima al centro de la viga, en metros;

a: Espacio entre abrazaderas internas, 0.357/3 [m], (0.119[m]);

L: Longitud de la viga entre las abrazaderas externas, 0.357 [m].

Rigidez Flexural [Pa]:

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

Ecuación 6-5: Rigidez flexural.

Ángulo de Fase [°]:

$$\varphi = 360fs$$

Ecuación 6-6: Ángulo de Fase.

Donde:

f= Frecuencia de cara, en [Hz];

s= Tiempo transcurrido entre $P_{\text{máx}}$ y $\delta_{\text{máx}}$, en segundos.

Energía disipada [J/m³] por ciclo:

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

Ecuación 6-7: Energía disipada por ciclo.

Energía disipada acumulada [J/m³]:

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

Ecuación 6-8: Energía disipada acumulada.

En donde:

D_i: Energía disipada en el ciclo de carga i.

6.6 APLICACIÓN ENFOQUE FENOMENOLÓGICO

Para el desarrollo de este trabajo se utiliza el enfoque fenomenológico, el cual es uno de los modelos más utilizados para la predicción del agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas. Este modelo entrega una relación empírica basada en ensayos de laboratorio y calibraciones. El enfoque fenomenológico relaciona el esfuerzo o deformación producido en la carpeta asfáltica, con el número de ciclos que causa la falla del material.

Los resultados del ensayo a fatiga dependen del modo de carga, es decir, los resultados de los ensayos varían según se realizan a tensión o deformación constante. A continuación, se presentan las ecuaciones para cada tipo de ensayo:

$$Nf = k1 * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k2}$$

Ecuación 6-9: Ecuación para ensayo a deformación controlada.

$$Nf = k1 * \left(\frac{1}{\sigma_t}\right)^{k2}$$

Ecuación 6-10: Ecuación para ensayo a esfuerzo controlado.

Donde:

Nf: 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.

k1, k2: Coeficientes determinados experimentalmente.

Los coeficientes k1 y k2 se determinan por medio del ajuste de una regresión potencial en escala logarítmica de los datos obtenidos en el ensayo de fatiga.

Este modelo, ya sea a deformación o esfuerzo controlado, no considera la temperatura, módulo de la mezcla asfáltica ni la frecuencia de carga en sus cálculos.

6.7 RESULTADOS DE ENSAYO A FATIGA

En la presente memoria se trabajó en conjunto con Nicolás Escobar Ramos, cuya memoria está enfocada al estudio de la resistencia a la fatiga de la mezcla envejecida a largo plazo. Por lo tanto, se puede comparar el comportamiento de la mezcla envejecida a corto plazo con los resultados obtenidos y presentados por Nicolás Escobar en su Memoria de Título [1]. El trabajo en laboratorio y las compactaciones de la mezcla son realizadas en conjunto, acondicionadas a corto y largo plazo respectivamente.

En la siguiente tabla se presenta la geometría y propiedad volumétrica de las probetas utilizadas en los ensayos de fatiga para los distintos niveles de deformación:

Tabla 6-1: Geometría y propiedad volumétrica para nivel de deformación 250[$\mu\epsilon$].

250 [$\mu\epsilon$]				
Probeta	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]	Va (%)
F9	0,379	0,062	0,048	4,0
F10	0,379	0,063	0,048	4,3
F11	0,378	0,062	0,048	4,3

Tabla 6-2: Geometría y propiedad volumétrica para nivel de deformación 375[$\mu\epsilon$].

375 [$\mu\epsilon$]				
Probeta	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]	Va (%)
F20	0,379	0,061	0,049	3,8
F22	0,376	0,062	0,049	5,0
F24	0,378	0,063	0,046	3,5

Tabla 6-3: Geometría y propiedad volumétrica para nivel de deformación 500[$\mu\epsilon$].

500 [$\mu\epsilon$]				
Probeta	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]	Va (%)
F1	0,380	0,063	0,049	2,3
F27	0,378	0,062	0,048	4,7
F6	0,380	0,062	0,050	3,7

Tabla 6-4: Geometría y propiedad volumétrica para nivel de deformación 750[$\mu\epsilon$].

750 [$\mu\epsilon$]				
Probeta	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]	Va (%)
F16	0,378	0,063	0,049	5,0
F17	0,378	0,062	0,049	3,8
F18	0,380	0,062	0,049	3,8

Las probetas descritas anteriormente han sido ensayadas en el equipo de fatiga de 4 puntos bajo las condiciones de ensaye descritas en el capítulo 6.3, a deformación controlada, 20[°C], frecuencia 10 [Hz] y criterio de falla reducción de la rigidez al 50%. A continuación, se presentan el valor de la rigidez inicial “S_i”, calculada en el ciclo 50 y la cantidad de ciclos de carga N_{f50} asociados a la reducción del 50% de la rigidez inicial.

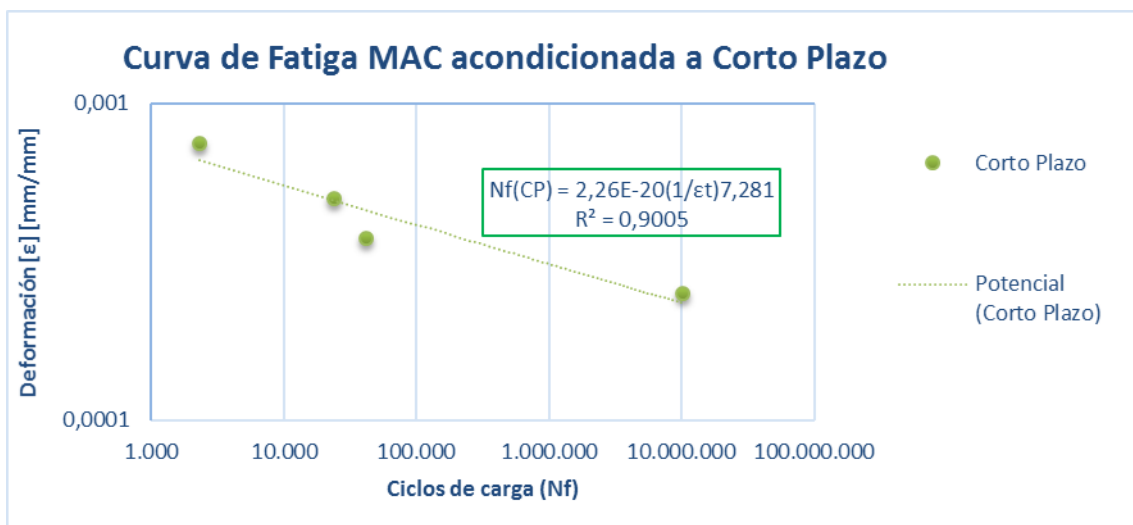
Tabla 6-5: Resultados ensayos de fatiga.

Nivel de deformación (μstrain)	Probeta	S _i [MPa]	N _{f50}	Promedio Nf
250	F9	3.356	918.086	10.273.973
	F10	3.602	12.605.065	
	F11	1.486	17.298.767	
375	F20	4.254	19.047	41.605
	F22	3.362	54.293	
	F24	3.673	51.474	
500	F1	3.150	17.557	24.100
	F27	3.257	33.569	
	F6	2.975	21.173	
750	F16	2.653	921	2.301
	F17	2.021	5.559	
	F18	692	422	

Con los valores N_{f50} para cada ensayo, se puede construir una curva de fatiga considerando los distintos niveles de deformación utilizados. Al graficar los ciclos de carga (N_{f50}) versus los niveles de deformación se obtiene la siguiente curva de fatiga, cuyos valores se ajustan a una curva del tipo:

$$Y = k1 * X^{k2}$$

Figura 6-1: Curva de Fatiga MAC acondicionada a Corto Plazo.



La curva de fatiga obtenida, la cual depende de la deformación por tracción, es la siguiente:

$$Nf = 2,26E - 20 * (1/\epsilon_t)^{7,281}$$

Además, se tiene que los valores de ϵ_6 , N_{500} y los parámetros de ajuste de la curva de fatiga, k_1 y k_2 , son los siguientes:

Parámetro	Valor
ϵ_6 (mm/mm x 10-6)	300
N500	24485
k_1	2,26E-20
k_2	7,281

6.8 ENFOQUE DE LA ENERGÍA DISIPADA

El enfoque fenomenológico tradicional es uno de los modelos más aceptado para la predicción de la resistencia al agrietamiento por fatiga. Sin embargo, los parámetros de este modelo son dependientes del tipo de material, modo de carga, frecuencia y temperatura. Es por esto que se ha desarrollado el enfoque de Energía Disipada, el cual se basa en el cálculo de una propiedad fundamental para determinar la resistencia a la fatiga, obteniendo una relación única independiente de estas variables.

La Energía Disipada es una medida de la energía que es perdida por el material a través de trabajo mecánico, generación de calor o daño de la muestra. En un pavimento asfáltico una cierta cantidad del trabajo es hecho para deformar la capa superficial en cada ciclo de carga. Cuando la aplicación de carga y descarga se repite en el rango elástico del material, es decir, comienza y termina en el mismo punto sin ocasionar deformación permanente, la energía se recupera. Por otro lado, cuando se producen deformaciones remanentes en el rango inelástico del material, parte de esta energía no se conserva y se disipa como uno o más de los mecanismos de daños mencionados.

El daño por fatiga en un pavimento asfáltico es la cantidad de energía que es disipada por el espécimen durante prueba. Controlando la energía disipada se puede disminuir la fatiga y ser utilizada para explicar la disminución en las propiedades mecánicas del material, como lo es la rigidez flexural.

La Energía Disipada en cada ciclo tiende a disminuir a medida que éstos avanzan, hasta alcanzar un punto a partir del cual tiende a mantenerse constante y la Energía Disipada en cada ciclo es la misma. El cambio en la Energía Disipada representa el efecto total de daño por fatiga. Si bien el trabajo realizado en esta memoria está enfocado en el enfoque fenomenológico, se han adjuntado en los anexos los gráficos correspondientes a "Energía Disipada v/s Ciclos de carga" de cada probeta, ya que estos pueden resultar de interés para el lector.

6.9 COMPARACIÓN ENTRE MAC ENVEJECIDA A CORTO PLAZO Y MAC ENVEJECIDA A LARGO PLAZO

A continuación, se presenta una tabla resumen con los resultados del ensayo de fatiga de probetas acondicionadas a Corto Plazo y a Largo Plazo:

Tabla Resumen Nº Ciclos de Falla [Nf]		
Deformación [$\mu\epsilon$]	Corto Plazo	Largo Plazo
250	10.273.973	509.774
375	41.605	28.838
500	24.100	17.330
750	2.301	1.613

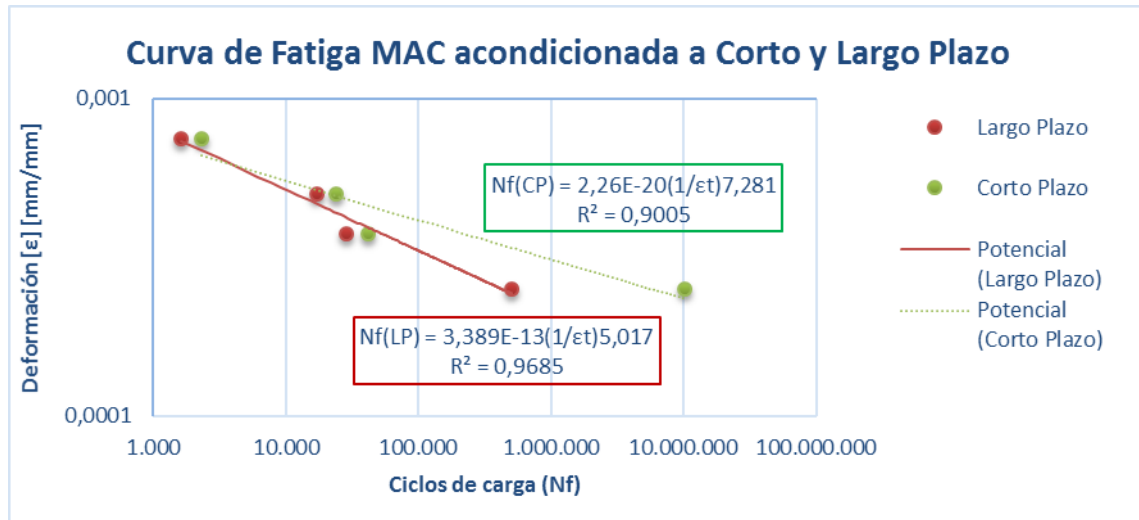
Con los resultados del ensayo se grafica la curva que caracteriza el comportamiento a fatiga de cada mezcla, y de cuya ecuación se obtienen los parámetros N500 y ϵ_6 .

Mezcla acondicionada a Corto Plazo:

- Rigidez Inicial Promedio: 2.873 [MPa].
- Ecuación de la Recta: $Nf_{CP} = 2,26E-20*(1/\epsilon)^{7,281}$.
- Valor de correlación R2: 0,9005
- Parámetro ϵ_6 : 300 [$\mu\epsilon$].
- Parámetro N500: 24.485 ciclos.

Mezcla acondicionada a Largo Plazo:

- Rigidez Inicial Promedio: 3.898 [MPa].
- Ecuación de la Recta: $Nf_{LP} = 3,38E-13*(1/\epsilon)^{5,017}$
- Valor de correlación R2: 0,9685
- Parámetro ϵ_6 : 208 [$\mu\epsilon$].
- Parámetro N500: 12.341 ciclos.



La mezcla acondicionada a Largo Plazo presenta una rigidez inicial mayor en un 35,7% con respecto a aquella acondicionada a Corto Plazo. Esto se corresponde con lo esperado, ya que el proceso de envejecimiento conlleva una rigidización de la mezcla. Este aumento en la rigidez se ve reflejado en una disminución en el desempeño frente a la fatiga, debido a que una mezcla más rígida tiene menor tolerancia a la deformación, fomentando la aparición de grietas y la falla del pavimento.

Los parámetros fenomenológicos K_1 y K_2 obtenidos, mostraron una fuerte correlación, $R^2=0,90$ para la mezcla envejecida a Corto Plazo y $R^2=0,97$ para aquella envejecida a Largo Plazo. El valor $K_2=7,281$ para la mezcla acondicionada a Corto Plazo se encuentra fuera del rango indicado en la literatura (3-6), debido a que la pendiente de la curva se ve afectada por el alto valor obtenido en el nivel de deformación 250[$\mu\epsilon$]. Sin embargo, la norma AASHTO 321-14 según la cual se determina la vida a la fatiga de las MAC, no establece criterios de control para la variabilidad de los resultados obtenidos. El valor $K_2=5,017$ para la mezcla envejecida a Largo Plazo se encuentra dentro del rango indicado.

De la ecuación obtenida en la recta, se realiza una interpolación para encontrar el valor “épsilon seis” (ϵ_6), correspondiente al valor de deformación aplicable para alcanzar 1.000.000 de ciclos de carga. De este valor se puede concluir que la mezcla envejecida a corto plazo presenta un mejor comportamiento a agrietamiento por fatiga que la mezcla envejecida a largo plazo, ya que puede resistir un mayor nivel de deformación para la misma cantidad de repeticiones de carga. Se determinó que la mezcla envejecida a corto plazo presentó una reducción de su rigidez inicial en un 50% después de 1.000.000 de ciclos de carga a una deformación constante de 300[$\mu\epsilon$]. Para la mezcla envejecida a largo plazo, se obtuvo dicha reducción después de 1.000.000 de ciclos de carga a una deformación constante de 208[$\mu\epsilon$]. Sin embargo, el valor obtenido para la mezcla envejecida a Largo Plazo es sólo referencial, ya que se encuentra fuera de la Curva de Fatiga al no haber alcanzado esta el millón de ciclos de carga ($N_f=10^6$).

En cuanto al parámetro N500, éste se utiliza como medida de comparación y ordenamiento de los rendimientos de fatiga, ya que es un nivel relativamente grande que puede ser reproducido en recapados asfálticos. Para la mezcla envejecida a corto plazo tiene un valor de 21.256 ciclos, mientras que aquella envejecida a largo plazo corresponde a 12.052 ciclos. Esto significa que para una deformación de 500[$\mu\epsilon$], en el caso de la mezcla envejecida a corto plazo debe transcurrir una mayor cantidad de ciclos de carga para que la mezcla llegue a la falla.

Se debe tomar en cuenta que el envejecimiento a largo plazo simula lo que ocurre en la parte superficial del pavimento y no en la base de éste, por lo que este modelo no representa en forma definitiva el comportamiento de un pavimento de gran espesor. Por otra parte, para pavimentos delgados se tiene que su mecanismo de falla es a deformación constante (método utilizado en la realización de esta memoria), mientras que los pavimentos gruesos fallan a tensión constante. Los resultados de los ensayos de fatiga dependen totalmente de si éstos se hacen a tensión o deformación constante.

El estudio realizado y la curva de fatiga obtenida mediante ensayos corresponden a un trabajo realizado en laboratorio bajo condiciones controladas. Es por esto que no pueden aplicarse directamente a la realidad, ya que ningún ensayo representa fielmente lo que sucede en terreno. Por ejemplo, hay que considerar el “healing” y desplazamientos de carga. Además, en terreno se presentan variaciones de temperatura debido al clima, mientras que el ensayo se realiza a una temperatura controlada y constante de 20 [°C]. Por otra parte, con el paso de los vehículos el pavimento y la mezcla asfáltica se deflectan bajo la aplicación de las cargas de rueda, generando esfuerzos por tensión al fondo de la capa asfáltica, debido a las cargas positivas que son aplicadas. En cambio, durante el ensayo de flexión en cuatro puntos la carga aplicada es de tipo sinusoidal, variando de positivos a negativos, generando esfuerzos tanto de flexión como de compresión sobre la probeta prismática. Es por esto que cuando se emplee en diseño deben calibrarse a terreno los resultados de ensaye.

7 CONCLUSIONES

Se llevó a cabo el procedimiento de diseño de la mezcla asfáltica mediante el nivel 1 de la metodología SUPERPAVE, la cual cumple con las especificaciones exigidas por el proyecto denominado “Conservación rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez, año 2016, Etapa I”.

Para que la elaboración de una mezcla mediante la metodología SUPERPAVE sea adecuada es fundamental una correcta selección de los agregados pétreos, ligante asfáltico y vacíos de aire, ya que modificar alguna de estas variables conlleva un cambio en las propiedades volumétricas de la mezcla y, por consiguiente, en las propiedades mecánicas de esta.

Se diseñó una mezcla asfáltica que cumple con los criterios exigidos por la especificación SUPERPAVE para un agregado de tamaño máximo nominal de 12,5 [mm]. Para esto se diseñaron tres mezclas de prueba y mediante el análisis de los resultados de sus parámetros volumétricos se concluyó que la Mezcla de Prueba 2 es la que mejor se adapta a cada una de las propiedades exigidas para el diseño de la mezcla asfáltica.

La combinación granulométrica de la mezcla perteneciente a la estructura de agregados cumple con la siguiente proporción: Agregado $\frac{3}{4}$ ” 16%, Agregado $\frac{1}{2}$ ” 29% y Polvo de Roca 55% y un contenido óptimo de ligante asfáltico de un 5,4%.

Al realizar distintas mezclas de prueba se determinó que, al variar los diversos parámetros, incluso en pequeñas cantidades, las propiedades y desempeños de la mezcla asfáltica varían considerablemente. Por lo tanto, al confeccionar un pavimento asfáltico se debe respetar el diseño especificado ya que, al alterarlo por ejemplo disminuyendo el contenido de asfalto, no se alcanzará el desempeño deseado y la inversión en el diseño de la mezcla mediante la metodología SUPERPAVE no será justificada.

Es de gran importancia contar con un laboratorio debidamente equipado, esencialmente con un Compactador Giratorio SUPERPAVE, que realiza una mejor simulación de compactación en terreno que los métodos tradicionales, como lo es la Compactadora Automática Marshall. Un adecuado control del contenido de vacíos de aire es fundamental, ya que es uno de los parámetros más influyentes en el desempeño de la mezcla.

En relación al ensayo de flexión en cuatro puntos, se puede mencionar lo siguiente:

Ventajas

- Es uno de los ensayos mayormente utilizados para la caracterización de fatiga de una mezcla, por lo que existe una mayor cantidad de datos obtenidos con este tipo de ensayo a través de los cuales se pueden realizar comparaciones.
- Fácil fabricación de las probetas debido a su sencilla geometría respecto a otros ensayos más complejos.
- Opcionalmente se puede controlar la deformación o el esfuerzo, según corresponda a un pavimento delgado o a uno grueso respectivamente.

Desventajas

- Es imposible realizar un ensayo que se ajuste completamente a las condiciones presentadas en la realidad. En el pavimento in situ, la fisuración de la capa de la mezcla bituminosa no se produce ni a tensión ni a deformación controlada, sino que es un proceso bastante más complejo en el que influyen, además de los intervalos de tiempo entre aplicaciones de carga, periodos de recuperación de la mezcla, y también, el orden y la forma en que se producen estas aplicaciones de carga.
- Para mezclas muy flexibles, un ensayo a fatiga realizado a una deformación constante muy baja, puede provocar la obtención de una curva que jamás llegará a la falla. Se da que a medida que la deformación aplicada es menor, más tiempo demora la probeta en llegar a la falla y la vida a fatiga se extiende cada vez más, provocando que la curva se convierta en una asíntota que es cada vez más horizontal.
- La realización del ensayo de fatiga para mezclas SUPERPAVE, es un proceso lento, estas mezclas presentan un excelente comportamiento al agrietamiento por fatiga por lo que ensayos realizados a bajas deformaciones pueden durar muchas horas, e incluso varios días.

8 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

- [1] Escobar Ramos, Nicolás. "RESISTENCIA A FATIGA DE MEZCLA SUPERPAVE ENVEJECIDA A LARGO PLAZO". Memoria (Constructor Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2017.
- [2] AASHTO T 321, Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending, 2014, AASHTO, Washington D.C.
- [3] Asphalt Institute, Manual Series NO. 02 (MS-2) Asphalt Mix Design Methods, 7 ed., 2014
- [4] Asphalt Institute, Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design & Analysis, Lexington, KY, 1994.
- [5] Método Superpave. Metodología SUPERPAVE para el Diseño de Mezclas Asfálticas, Departamento de Gestión de Calidad y Desarrollo, Bitumix.
- [6] Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control, Manual de Carreteras, Volumen 8, 2015.
- [7] ASTM D 5821-01, Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate, 2005.
- [8] M.C 8.202.6, Método para determinar la cubicidad de las partículas, 2014.
- [9] AASHTO T-304, Uncompacted Void Content of Fine Aggregate, Washington D.C.
- [10] ASTM D 4791-99, Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate, 2005.
- [11] AASHTO T-176, Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test, Washington D.C.
- [12] M.C 8.202.9, Método para determinar el equivalente de arena.
- [13] AASHTO T-96, Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, Washington D.C.
- [14] M.C 8.202.11, Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los Ángeles, 2014.
- [15] AASHTO T-104, Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.
- [16] M.C 8.202.17, Método de los sulfatos para determinar la desintegración, 2014.
- [17] M.C 8.202.16, Método para determinar el contenido de partículas desmenuzables, 2014.
- [18] AASHTO T-209, "Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot-Mix Asphalt Paving Mixtures", AASHTO, Washington, D.C.
- [19] AASHTO PP3, Standard Practice for Preparing Hot Mix Asphalt (HMA) specimens by Means of the Rolling Wheel Compactor, 1996, AASHTO, Washington D.C.

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

[21] “Manual de Carreteras”, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, MOP, Chile, 2012.

[22] ASTM D 6373, Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder, 2015.

9 ANEXOS

9.1 SELECCIÓN DE ESTRUCTURA DEL AGREGADO

Tabla 6: Gravedad Específica Máxima Teórica MP1.

Mezcla de Prueba 1		
Densidad Máxima	Muestra 1	Muestra 2
Masa Muestra a T° Ambiente [gr]	2603,3	2563,9
Masa Recipiente lleno con Agua [gr]	5832,4	5830,5
Masa Recipiente con Agua y Muestra [gr]	7403,6	7379,5
Densidad del Agua a T° de Ensaye	997,1	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar	2515,09	2519,01
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar	4	
Gmm (medido) [gr/cm]	2,517	

Tabla 7: Gravedad Específica Bruta MP1.

Mezcla de Prueba 1	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [gr]	1919,2	1866,4
Masa Sumergida [gr]	1133,0	1099,6
Masa SSS [gr]	1920,6	1868
Gmb (medido) [gr/cm]	2,437	2,430
Absorción del Espécimen [%]	0,18%	0,18%

Tabla 8: Densificación MP1.

Datos de Densificación para MP1									
Gmm	2,517								
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				%Gmm [prom]
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	
5	126,8	2,08	2,17	86,13%	127,7	2,07	2,16	85,73%	85,93%
7	125,2	2,11	2,20	87,23%	126,0	2,10	2,19	86,89%	87,06%
10	123,4	2,14	2,23	88,50%	124,2	2,13	2,22	88,15%	88,33%
20	120,0	2,20	2,29	91,01%	120,7	2,19	2,28	90,70%	90,86%
30	118,1	2,24	2,33	92,48%	118,8	2,23	2,32	92,16%	92,32%
40	116,9	2,26	2,35	93,43%	117,5	2,25	2,35	93,17%	93,30%
50	115,9	2,28	2,37	94,23%	116,5	2,27	2,37	93,97%	94,10%
60	115,2	2,29	2,39	94,80%	115,8	2,28	2,38	94,54%	94,67%
70	114,6	2,30	2,40	95,30%	115,2	2,30	2,39	95,04%	95,17%
75	114,3	2,31	2,41	95,55%	114,9	2,30	2,40	95,28%	95,42%
80	114,1	2,31	2,41	95,72%	114,7	2,31	2,40	95,45%	95,58%
90	113,6	2,33	2,42	96,14%	114,3	2,31	2,41	95,78%	95,96%
100	113,3	2,33	2,43	96,39%	113,9	2,32	2,42	96,12%	96,26%
110	113,0	2,34	2,43	96,65%	113,6	2,33	2,43	96,37%	96,51%
115	112,8	2,34	2,44	96,82%	113,4	2,33	2,43	96,54%	96,68%
Gmb (Medido)		2,437				2,430			
Vmx	176,715				Vmx	176,715			
Peso Total	4667,4				Peso Total	4672,9	Va [%]	4,6	
Factor de Corrección	1,041				Factor de Corrección	1,042			

Figura 9-1: Densificación MP1.

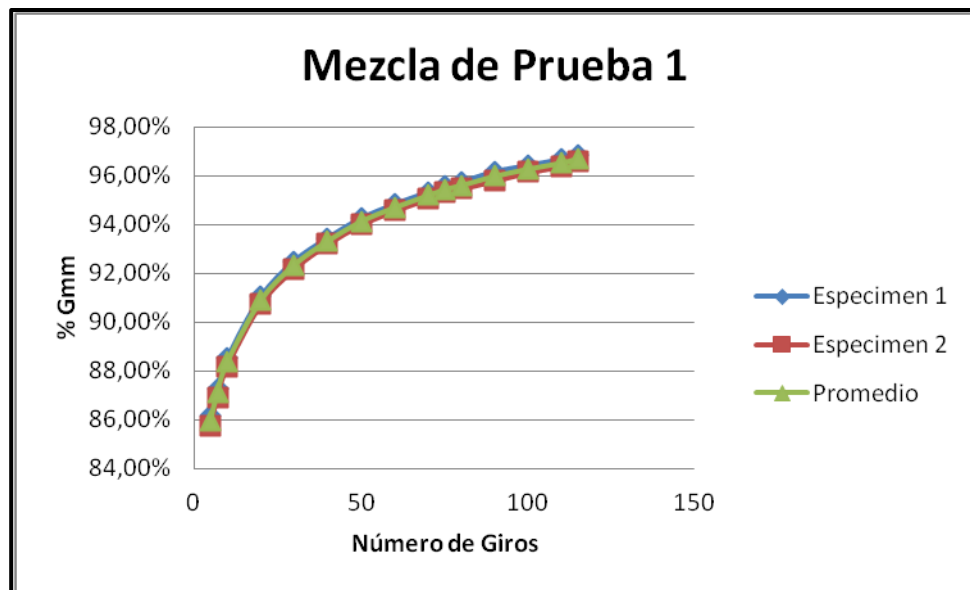


Tabla 9: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2.

Mezcla de Prueba 2		
Densidad Máxima	Muestra 1	Muestra 2
Masa Muestra a T° Ambiente [gr]	2602,9	2593,6
Masa Recipiente lleno con Agua [gr]	5829,9	5831,5
Masa Recipiente con Agua y Muestra [gr]	7404,0	7399,4
Densidad del Agua a T° de Ensaye	997,1	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar	2522,77	2521,36
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar	1	
Gmm (medido) [gr/cm]	2,522	

Tabla 10: Gravedad Específica Bruta MP2.

Mezcla de Prueba 2	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [gr]	1932,7	1870,5
Masa Sumergida [gr]	1136,8	1097,7
Masa SSS [gr]	1934,1	1871,8
Gmb (medido) [gr/cm]	2,424	2,416
Absorción del Espécimen [%]	0,18%	0,17%

Tabla 11: Densificación MP2.

Datos de Densificación para MP2									
Gmm	2,522								
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				%Gmm [prom]
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	
5	128,5	2,05	2,14	85,04%	128,0	2,06	2,15	85,32%	85,18%
7	126,7	2,08	2,18	86,25%	126,3	2,09	2,18	86,47%	86,36%
10	124,9	2,11	2,21	87,50%	124,5	2,12	2,21	87,72%	87,61%
20	121,2	2,18	2,27	90,17%	121,1	2,18	2,27	90,18%	90,17%
30	119,2	2,21	2,31	91,68%	119,2	2,21	2,31	91,62%	91,65%
40	117,9	2,24	2,34	92,69%	117,9	2,24	2,34	92,63%	92,66%
50	116,9	2,26	2,36	93,48%	117,0	2,25	2,35	93,34%	93,41%
60	116,1	2,27	2,37	94,13%	116,3	2,27	2,37	93,90%	94,01%
70	115,5	2,28	2,39	94,62%	115,7	2,28	2,38	94,39%	94,50%
75	115,2	2,29	2,39	94,86%	115,5	2,28	2,38	94,55%	94,71%
80	115,0	2,29	2,40	95,03%	115,2	2,29	2,39	94,80%	94,91%
90	114,6	2,30	2,40	95,36%	114,8	2,30	2,40	95,13%	95,24%
100	114,2	2,31	2,41	95,69%	114,5	2,30	2,41	95,38%	95,54%
110	113,8	2,32	2,42	96,03%	114,2	2,31	2,41	95,63%	95,83%
115	113,7	2,32	2,42	96,11%	114,0	2,31	2,42	95,80%	95,96%
Gmb (Medido)		2,424				2,416			
Vmx	176,715				Vmx	176,715			
Peso Total	4663,6				Peso Total	4662,3			5,3
Factor de Corrección	1,044				Factor de Corrección	1,044		Va [%]	

Figura 9-2: Densificación MP2.

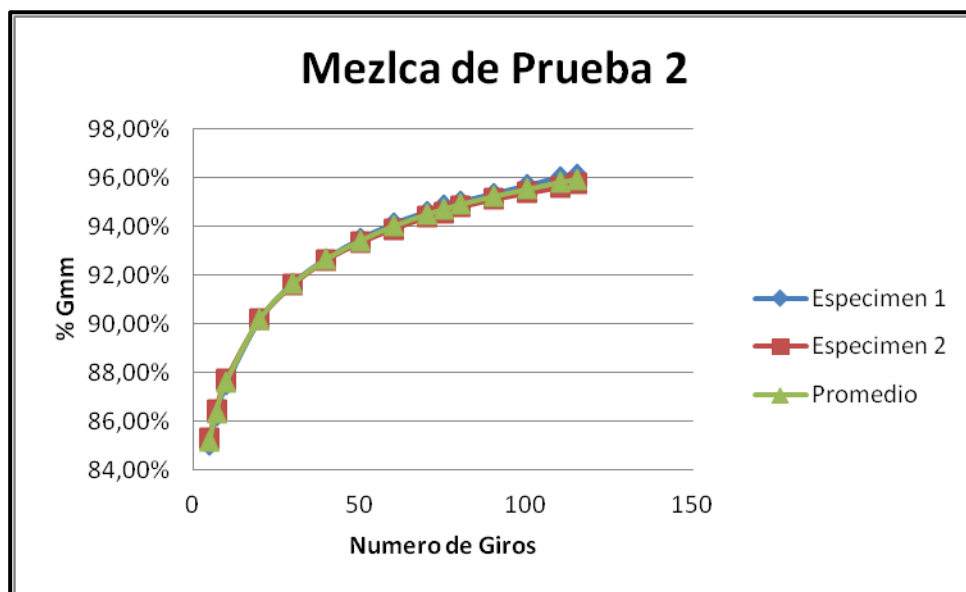


Tabla 12: Gravedad Específica Máxima Teórica MP3.

Mezcla de Prueba 3		
Densidad Máxima	Muestra 1	Muestra 2
Masa Muestra a T° Ambiente [gr]	2591,0	2602,6
Masa Recipiente lleno con Agua [gr]	5830,1	5831,4
Masa Recipiente con Agua y Muestra [gr]	7397,2	7403,4
Densidad del Agua a T° de Ensaye	997,1	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar	2523,26	2518,08
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar	5	
Gmm (medido) [gr/cm]	2,521	

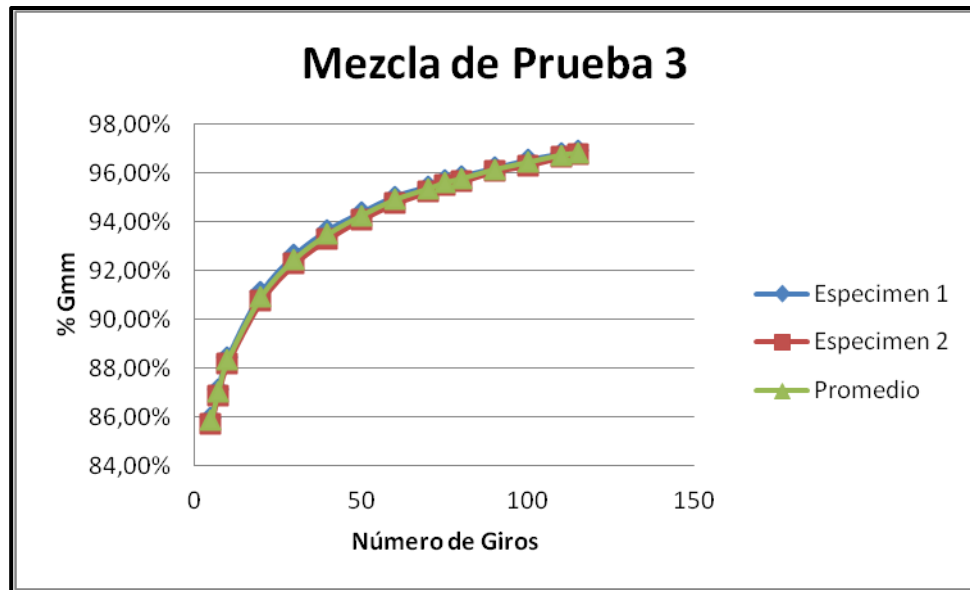
Tabla 13: Gravedad Específica Bruta MP3.

Mezcla de Prueba 3	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [gr]	1852,1	1864,9
Masa Sumergida [gr]	1095,3	1101,5
Masa SSS [gr]	1853,3	1866
Gmb (medido) [gr/cm]	2,443	2,439
Absorción del Espécimen [%]	0,16%	0,14%

Tabla 14: Densificación MP3.

Datos de Densificación para MP3										
Gmm	2,521									
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				%Gmm [prom]	
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]		
5	127,7	2,07	2,17	85,98%	128,3	2,06	2,16	85,74%	85,86%	
7	126,0	2,10	2,20	87,14%	126,6	2,09	2,19	86,89%	87,01%	
10	124,1	2,13	2,23	88,47%	124,7	2,12	2,22	88,21%	88,34%	
20	120,5	2,19	2,30	91,12%	121,2	2,18	2,29	90,76%	90,94%	
30	118,5	2,23	2,34	92,65%	119,2	2,22	2,33	92,28%	92,47%	
40	117,2	2,26	2,36	93,68%	117,9	2,25	2,35	93,30%	93,49%	
50	116,3	2,27	2,38	94,41%	116,9	2,26	2,37	94,10%	94,25%	
60	115,5	2,29	2,40	95,06%	116,1	2,28	2,39	94,75%	94,90%	
70	115,0	2,30	2,41	95,47%	115,5	2,29	2,40	95,24%	95,36%	
75	114,7	2,30	2,41	95,72%	115,2	2,30	2,41	95,49%	95,61%	
80	114,5	2,31	2,42	95,89%	115,0	2,30	2,41	95,65%	95,77%	
90	114,1	2,32	2,43	96,23%	114,5	2,31	2,42	96,07%	96,15%	
100	113,7	2,32	2,43	96,57%	114,2	2,32	2,43	96,32%	96,44%	
110	113,4	2,33	2,44	96,82%	113,8	2,33	2,44	96,66%	96,74%	
115	113,3	2,33	2,44	96,91%	113,7	2,33	2,44	96,75%	96,83%	
Gmb (Medido)	2,443						2,439			
Vmx	176,715					Vmx	176,715			
Peso Total	4671,0					Peso Total	4678,5	Va [%]	4,4	
Factor de Corrección	1,047					Factor de Corrección	1,047			

Figura 9-3: Densificación MP3.



9.2 SELECCIÓN DE CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO.

Tabla 15: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2. Contenido de asfalto: 4,9%

Densidad Máxima	Muestra 1	Muestra 2
Masa Muestra a T° Ambiente [gr]	2607,7	2601,0
Masa Recipiente lleno con Agua [gr]	5829,2	5831,3
Masa Recipiente con Agua y Muestra [gr]	7405,0	7403,5
Densidad del Agua a T° de Ensaye	997,1	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar	2519,76	2520,86
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar	1	
Gmm (medido) [gr/cm]	2,520	

Tabla 16: Gravedad Específica Bruta MP2. Contenido de asfalto: 4,9%.

Mezcla de Prueba 1	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [gr]	1784,1	1789,6
Masa Sumergida [gr]	1051,5	1054,8
Masa SSS [gr]	1785,1	1790,3
Gmb (medido) [gr/cm]	2,432	2,433
Absorción del Espécimen [%]	0,14%	0,10%

Tabla 17: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 4,9%.

Datos de densificación para la Mezcla 2 /Contenido de Asfalto 4,9%									
Gmm	2,520								
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				%Gmm [prom]
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	
5	129,0	2,05	2,15	85,44%	128,8	2,06	2,15	85,23%	85,33%
7	127,2	2,08	2,18	86,64%	127,0	2,09	2,18	86,44%	86,54%
10	125,3	2,11	2,22	87,96%	125,1	2,12	2,21	87,75%	87,85%
20	121,7	2,18	2,28	90,56%	121,4	2,18	2,28	90,42%	90,49%
30	119,7	2,21	2,32	92,07%	119,4	2,22	2,32	91,94%	92,01%
40	118,4	2,24	2,35	93,08%	118,0	2,25	2,34	93,03%	93,06%
50	117,4	2,26	2,37	93,88%	117,0	2,26	2,36	93,82%	93,85%
60	116,7	2,27	2,38	94,44%	116,3	2,28	2,38	94,39%	94,41%
70	116,0	2,28	2,39	95,01%	115,6	2,29	2,39	94,96%	94,99%
75	115,8	2,29	2,40	95,17%	115,3	2,30	2,40	95,21%	95,19%
80	115,5	2,29	2,40	95,42%	115,1	2,30	2,40	95,37%	95,40%
90	115,1	2,30	2,41	95,75%	114,6	2,31	2,41	95,79%	95,77%
100	114,7	2,31	2,42	96,09%	114,2	2,32	2,42	96,12%	96,11%
110	114,4	2,32	2,43	96,34%	113,8	2,33	2,43	96,46%	96,40%
115	114,2	2,32	2,43	96,51%	113,7	2,33	2,43	96,55%	96,53%
Gmb (Medido)		2,432				2,433			
Vmx	176,715				Vmx	176,715			
Peso Total	4681,8				Peso Total	4681,6		Va [%]	4,8
Factor de Corrección	1,048				Factor de Corrección	1,044			

Figura 9-4: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 4,9%.

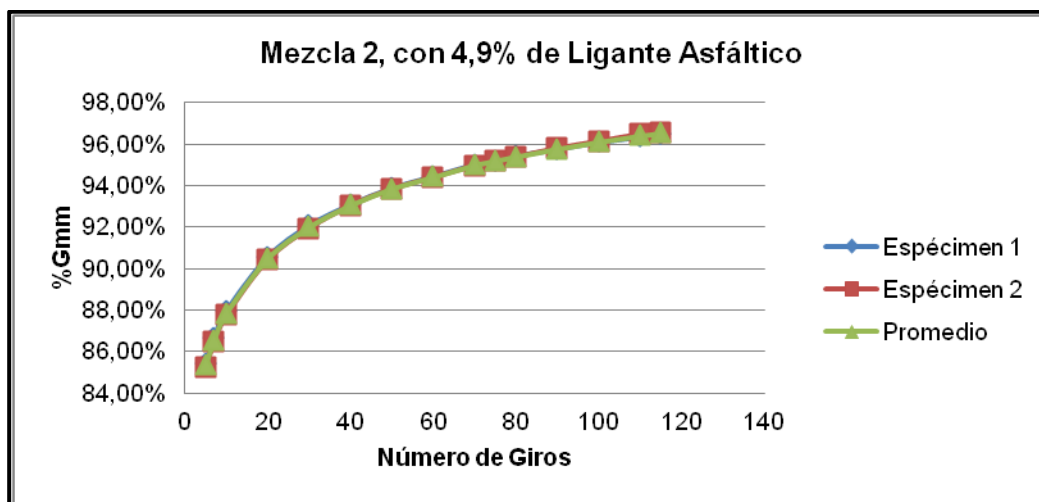


Tabla 18: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2. Contenido de asfalto: 5,4%.

Densidad Máxima	Muestra 1	Muestra 2
Masa Muestra a T° Ambiente [gr]	2590,7	2594,5
Masa Recipiente lleno con Agua [gr]	5831,1	5830,1
Masa Recipiente con Agua y Muestra [gr]	7389,0	7391,6
Densidad del Agua a T° de Ensaye	997,1	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar	2501,15	2504,33
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar	3	
Gmm (medido) [gr/cm]	2,503	

Tabla 19: Gravedad Específica Bruta MP2. Contenido de asfalto: 5,4%.

Mezcla de Prueba 2	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [gr]	1787,4	1640,8
Masa Sumergida [gr]	1057,8	973,8
Masa SSS [gr]	1788,3	1641,6
Gmb (medido) [gr/cm]	2,447	2,457
Absorción del Espécimen [%]	0,12%	0,12%

Tabla 20: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 5,4%.

Datos de densificación para la Mezcla 2 /Contenido de Asfalto 5,4%											
Gmm	2,503		Especimen A				Especimen B				%Gmm [prom]
N° de Giros	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]			
5	127,5	2,08	2,16	86,26%	127,3	2,08	2,17	86,75%	86,51%		
7	125,8	2,10	2,19	87,43%	125,5	2,11	2,20	87,99%	87,71%		
10	123,8	2,14	2,22	88,84%	123,6	2,14	2,24	89,35%	89,09%		
20	120,1	2,20	2,29	91,58%	120,0	2,20	2,30	92,03%	91,80%		
30	118,1	2,24	2,33	93,13%	118,0	2,24	2,34	93,59%	93,36%		
40	116,7	2,27	2,36	94,24%	116,7	2,27	2,37	94,63%	94,44%		
50	115,7	2,29	2,38	95,06%	115,7	2,29	2,39	95,45%	95,25%		
60	115,0	2,30	2,39	95,64%	114,9	2,30	2,41	96,11%	95,87%		
70	114,4	2,31	2,41	96,14%	114,3	2,31	2,42	96,62%	96,38%		
75	114,1	2,32	2,41	96,39%	114,0	2,32	2,42	96,87%	96,63%		
80	113,9	2,32	2,42	96,56%	113,7	2,33	2,43	97,13%	96,84%		
90	113,4	2,33	2,43	96,99%	113,3	2,34	2,44	97,47%	97,23%		
100	113,0	2,34	2,44	97,33%	112,9	2,34	2,45	97,81%	97,57%		
110	112,7	2,35	2,44	97,59%	112,6	2,35	2,45	98,08%	97,83%		
115	112,5	2,35	2,45	97,76%	112,5	2,35	2,46	98,16%	97,96%		
Gmb (Medido)	2,447						2,457				
Vmx	176,715					Vmx	176,715			Va [%]	3,37
Peso Total	4676,8					Peso Total	4675,8				
Factor de Corrección	1,040					Factor de Corrección	1,045				

Figura 9-5: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 5,4%.

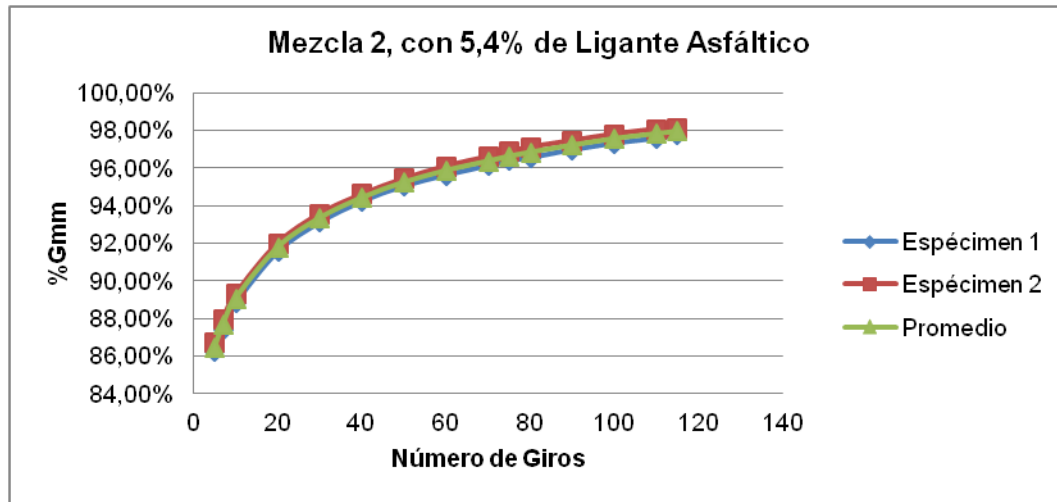


Tabla 21: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2. Contenido de asfalto: 5,9%

Densidad Máxima	Muestra 1	Muestra 2
Masa Muestra a T° Ambiente [gr]	2596,3	2600,7
Masa Recipiente lleno con Agua [gr]	5831,4	5832,0
Masa Recipiente con Agua y Muestra [gr]	7386,1	7389,6
Densidad del Agua a T° de Ensaye	997,1	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar	2485,38	2486,01
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar	1	
Gmm (medido) [gr/cm]	2,486	

Tabla 22: Gravedad Específica Bruta MP2. Contenido de asfalto: 5,9%.

Mezcla de Prueba 3	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [gr]	1852,1	1864,9
Masa Sumergida [gr]	1095,3	1101,5
Masa SSS [gr]	1853,3	1866
Gmb (medido) [gr/cm]	2,443	2,439
Absorción del Espécimen [%]	0,16%	0,14%

Tabla 23: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 5,9%.

Datos de densificación para la Mezcla 2 /Contenido de Asfalto 5,9%									
Gmm	2,486								
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				%Gmm [prom]
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	
5	1268,0	0,21	0,22	8,70%	126,0	2,10	2,16	87,06%	47,88%
7	125,1	2,12	2,19	88,20%	124,2	2,13	2,20	88,32%	88,26%
10	123,2	2,15	2,23	89,56%	122,4	2,16	2,23	89,62%	89,59%
20	119,6	2,21	2,29	92,25%	118,7	2,23	2,30	92,42%	92,33%
30	117,6	2,25	2,33	93,82%	116,7	2,27	2,34	94,00%	93,91%
40	116,2	2,28	2,36	94,95%	115,4	2,29	2,36	95,06%	95,00%
50	115,2	2,30	2,38	95,78%	114,4	2,31	2,38	95,89%	95,83%
60	114,5	2,31	2,40	96,36%	113,7	2,33	2,40	96,48%	96,42%
70	113,9	2,32	2,41	96,87%	113,1	2,34	2,41	96,99%	96,93%
75	113,6	2,33	2,41	97,12%	112,8	2,35	2,42	97,25%	97,19%
80	113,3	2,34	2,42	97,38%	112,6	2,35	2,42	97,42%	97,40%
90	112,9	2,34	2,43	97,73%	112,2	2,36	2,43	97,77%	97,75%
100	112,5	2,35	2,44	98,07%	111,8	2,37	2,44	98,12%	98,10%
110	112,2	2,36	2,44	98,34%	111,5	2,37	2,45	98,38%	98,36%
115	112,0	2,36	2,45	98,51%	111,4	2,38	2,45	98,47%	98,49%
Gmb (Medido)		2,449				2,448			
Vmx	176,715				Vmx	176,715			
Peso Total	4677,5				Peso Total	4677,2		Va [%]	2,8
Factor de Corrección	1,036				Factor de Corrección	1,030			

Figura 9-6: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 5,9%.

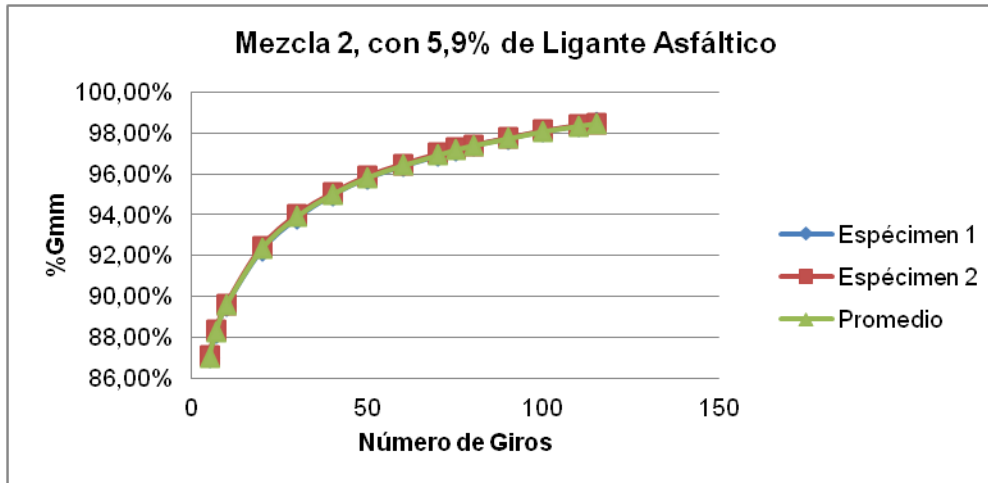


Tabla 24: Gravedad Específica Máxima Teórica MP2. Contenido de asfalto: 6,4%.

Densidad Máxima	Muestra 1	Muestra 2
Masa Muestra a T° Ambiente [gr]	2597,6	2595,1
Masa Recipiente Lleno con Agua [gr]	5830,8	5829,5
Masa Recipiente con Agua y Muestra [gr]	7378,8	7375,1
Densidad del Agua a T° de Ensaye	997,1	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar	2467,67	2465,53
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar	2	
Gmm (medido) [gr/cm]	2,467	

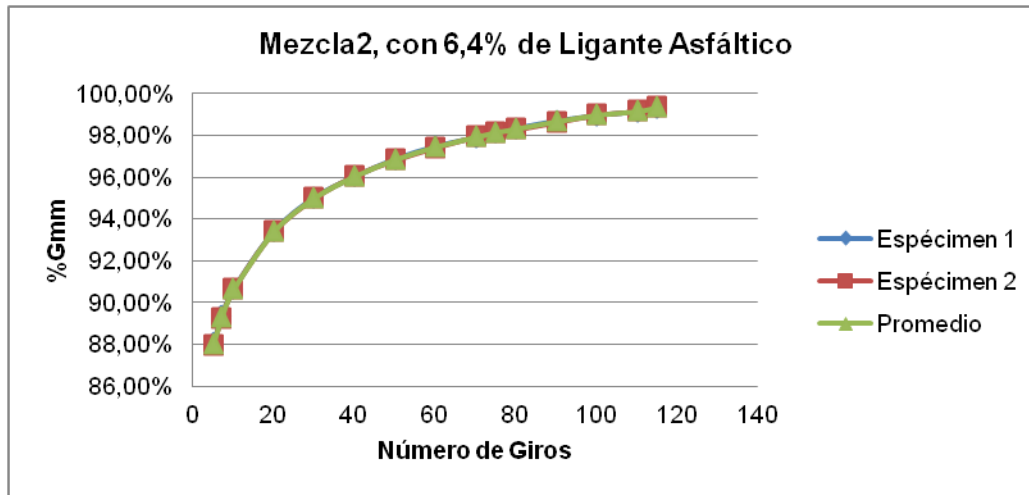
Tabla 25: Gravedad Específica Bruta MP2. Contenido de asfalto: 6,4%.

Mezcla de Prueba 3	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [gr]	1707,5	1662,5
Masa Sumergida [gr]	1011,0	984,7
Masa SSS [gr]	1707,9	1663,0
Gmb (medido) [gr/cm]	2,450	2,451
Absorción del Espécimen [%]	0,06%	0,07%

Tabla 26: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 6,4%.

Datos de densificación para la Mezcla 2 /Contenido de Asfalto 6,4%										
Gmm	2,467									
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				%Gmm [prom]	
	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb [est]	Gmb [corr]	Gmm [%]		
5	125,1	2,11	2,17	88,04%	125,5	2,11	2,17	87,95%	87,99%	
7	123,3	2,14	2,20	89,32%	123,7	2,14	2,20	89,23%	89,28%	
10	121,5	2,18	2,24	90,65%	121,8	2,17	2,24	90,62%	90,64%	
20	117,9	2,24	2,30	93,41%	118,2	2,24	2,30	93,38%	93,40%	
30	115,9	2,28	2,34	95,03%	116,2	2,28	2,34	94,99%	95,01%	
40	114,7	2,31	2,37	96,02%	114,9	2,30	2,37	96,07%	96,04%	
50	113,7	2,33	2,39	96,87%	114,0	2,32	2,39	96,82%	96,84%	
60	113,0	2,34	2,40	97,47%	113,3	2,34	2,40	97,42%	97,44%	
70	112,5	2,35	2,42	97,90%	112,7	2,35	2,42	97,94%	97,92%	
75	112,2	2,36	2,42	98,16%	112,5	2,35	2,42	98,12%	98,14%	
80	112,0	2,36	2,43	98,34%	112,3	2,36	2,42	98,29%	98,31%	
90	111,6	2,37	2,43	98,69%	111,9	2,36	2,43	98,64%	98,66%	
100	111,3	2,38	2,44	98,95%	111,5	2,37	2,44	99,00%	98,97%	
110	111,1	2,38	2,45	99,13%	111,3	2,38	2,45	99,17%	99,15%	
115	110,9	2,38	2,45	99,31%	111,1	2,38	2,45	99,35%	99,33%	
Gmb (Medido)	2,450						2,451			
Vmx	176,715					Vmx	176,715			1,9
Peso Total	4672,3					Peso Total	4676,4			
Factor de Corrección	1,028					Factor de Corrección	1,029	Va [%]		

Figura 9-7: Densificación MP2. Contenido de asfalto: 6,4%.



9.3 EVALUACIÓN A LA SENSIBILIDAD A LA HUMEDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Tabla 9-22: Datos TSR.

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA						
MUESTRA	1	2	3	4	5	6
Diametro [mm]	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0
Altura [mm]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Peso Seco [gr]	4006,5	3985,7	3985,4	3985,5	3981,5	3984,3
Peso en condición Sat. Sup. Seca [gr]	4019,5	4002,7	4006,0	4002,8	4000,8	4002,1
Peso en Agua [gr]	2313,6	2301,1	2301,1	2298,5	2293,6	2292,8
Volumen del Especimen[cc]	1705,9	1701,6	1704,9	1704,3	1707,2	1709,3
Gravedad Especifica Bruta	2,349	2,342	2,338	2,338	2,332	2,331
Gravedad Especifica Máxima	2,503	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Vacios de Aire [%]	6,2	6,4	6,6	6,6	6,8	6,9
Volumen de vacios de aire [cc]	105	109	113	112	117	117
Lectura Prensa	375			362		346
Carga [N]	16870			16290		15576

9.4 DETERMINACION G_{MM} MUESTRA DE TERRENO

Tabla 9-23: Gravedad Específica Máxima Teórica Mezcla de Terreno.

Mezcla de Terreno		
Densidad Máxima	Muestra 1	Muestra 2
Masa Muestra a T° Ambiente (Mn) [gr]	2587,0	2594,4
Masa Recipiente lleno con Agua (Mpa) [gr]	5832,0	5830,1
Masa Recipiente con Agua y Muestra (Mpam) [gr]	7388,9	7391,8
Densidad del Agua a T° de Ensaye (Pt)	997,1	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar	2504,1	2505,0
Diferencia Gmm	1	
Gmm (medido) [gr/cm ³]	2,505	

9.5 DATOS FATIGA

Tabla 9-24: Bloques compactados.

Bloque Comp.	Probetas Extraídas	Peso Seco [gr]	Peso Sat. Sup. Seca [gr]	Peso en Agua [gr]	Volumen del Especimen [cc]	Gmb	Gmm	Vacios de Aire [%]
B1	F1, F2	897,0	897,7	531,1	366,6	2,447	2,505	2,3
B2	F3, F4	1156,2	1157,4	685,9	471,5	2,452	2,505	2,1
B3	F5, F6	1291,8	1292,5	756,8	535,7	2,411	2,505	3,7
B4	F7, F8	1564,7	1565,6	919,9	645,7	2,423	2,505	3,3
B5	F9, F10	1098,8	1099,8	642,8	457,0	2,404	2,505	4,0
B6	F11, F12	1403,6	1407,8	822,6	585,2	2,398	2,505	4,3
B7	F13, F14	1349,8	1350,9	798,1	552,8	2,442	2,505	2,5
B8	F15, F16	1275,6	1277,1	740,8	536,3	2,379	2,505	5,0
B9	F17, F18	1182,8	1183,6	692,7	490,9	2,409	2,505	3,8
B10	F19, F20	1182,8	1183,6	692,7	490,9	2,409	2,505	3,8
B11	F21, F22	1320,1	1321,4	766,5	554,9	2,379	2,505	5,0
B12	F23, F24	1227,4	1228,5	720,7	507,8	2,417	2,505	3,5
B13	F25, F26	1627,0	1628,3	949,2	679,1	2,396	2,505	4,4
B14	F27, F28	1494,7	1496,0	869,6	626,4	2,386	2,505	4,7

Tabla 9-25: Dimensiones de probetas ensayadas.

Nivel Defor. [$\mu\epsilon$]	Probeta	Dimensión	m1 [mm]	m2 [mm]	m3 [mm]	Promedio [m]
250	F9	alto	48,22	48,16	48,12	0,048
		ancho	62,02	61,84	61,74	0,062
		largo	379	379	379	0,379
	F10	alto	49,67	48,36	47,12	0,048
		ancho	63,58	62,7	62,32	0,063
		largo	379	379	379	0,379
	F11	alto	48	47,8	47,38	0,048
		ancho	62,86	62,34	61,88	0,062
		largo	378	378	377	0,378
375	F20	alto	49,5	49,2	47,96	0,049
		ancho	60,98	61,3	61,46	0,061
		largo	379	378	379	0,379
	F22	alto	49,72	49,22	48,64	0,049
		ancho	62,3	62,56	62,3	0,062
		largo	376	376	376	0,376
	F24	alto	46,08	45,8	46,75	0,046
		ancho	62,3	63,4	63,14	0,063
		largo	378	378	378	0,378
500	F1	alto	49	48,46	49	0,049
		ancho	62,74	62,74	62,76	0,063
		largo	380,02	380	379,8	0,380
	F27	alto	47,8	48	47,38	0,048
		ancho	61,74	62,02	61,84	0,062
		largo	379	378	378	0,378
	F6	alto	50,78	49,66	48,7	0,050
		ancho	62,66	62	62,2	0,062
		largo	380	380	380	0,380
750	F16	alto	48,84	49	49,26	0,049
		ancho	62,96	63,3	63,8	0,063
		largo	378	378	378	0,378
	F17	alto	49,44	49,24	49,52	0,049
		ancho	62,56	62,56	62,1	0,062
		largo	378	378	378	0,378
	F18	alto	49,38	49,22	49,42	0,049
		ancho	62,1	62,26	62	0,062
		Largo	380	380	380	0,380

Tabla 9-26: Resumen datos de deformación 250 [$\mu\epsilon$].

Nivel de Deformación 250 [$\mu\epsilon$], Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015).									
Nombre Probeta	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/m ³]	Energía Disipada Acum. [J/m ³]
F9	50	341,30	0,0001419	849.370	0,0002531	3.355.618.000	31,48	0,35	14,55
	100	335,04	0,0001443	833.790	0,0002573	3.240.358.000	32,30	0,36	32,09
	1.000	302,86	0,0001399	753.727	0,0002495	3.020.950.000	34,48	0,33	336,05
	10.000	260,09	0,0001397	647.283	0,0002491	2.598.049.000	36,81	0,30	3.158,88
	100.000	224,65	0,0001409	559.086	0,0002513	2.224.496.000	37,14	0,27	28.082,76
	918.086	170,09	0,0001415	423.285	0,0002524	1.676.885.000	37,81	0,21	224.654,80
F10	50	369,93	0,0001410	906.019	0,0002515	3.602.472.000	31,78	0,38	14,92
	100	357,22	0,0001410	874.888	0,0002514	3.479.463.000	32,25	0,37	33,46
	1.000	325,96	0,0001401	798.331	0,0002499	3.194.311.000	34,33	0,35	353,56
	10.000	283,78	0,0001396	695.031	0,0002491	2.790.692.000	35,73	0,32	3.307,30
	100.000	243,91	0,0001406	597.380	0,0002508	2.382.020.000	38,00	0,29	30.268,05
	1.000.000	225,97	0,0001410	553.432	0,0002514	2.200.966.000	33,78	0,24	257.040,70
	10.000.000	228,73	0,0001397	560.195	0,0002492	2.248.176.000	27,14	0,20	2.228.944,00
	12.605.070	184,41	0,0001408	451.651	0,0002511	1.798.537.000	27,39	0,16	2.724.630,00
F11	50	152,80	0,0001435	380.263	0,0002558	1.486.317.000	22,39	0,12	5,19
	100	180,80	0,0001400	450.040	0,0002511	1.382.191.000	19,37	0,15	862.786,40
	1.000	209,71	0,0001405	529.031	0,0002498	1.203.489.000	19,37	0,15	862.786,40
	10.000	179,86	0,0001392	450.040	0,0002504	1.198.378.000	19,37	0,15	862.786,40
	100.000	224,26	0,0001404	598.309	0,0002532	1.288.394.000	19,37	0,15	862.786,40
	1.000.000	224,26	0,0001404	608.442	0,0002498	1.593.746.000	19,37	0,15	862.786,40
	10.000.000	224,26	0,0001404	609.056	0,0002503	2.412.844.000	19,37	0,15	862.786,40
	17.299.000	240,41	0,0001400	598.309	0,0002496	2.396.680.000	18,44	0,15	2.282.538,00

Tabla 9-27: Resumen datos de deformación 375 [$\mu\epsilon$].

Nivel de Deformación 375 [$\mu\epsilon$], Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015).									
Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m ³]	Energía Disipada Acum. [J/m ³]
F20	50	681,74	0,0002136	1.654.766	0,0003890	4.254.431.000	27,50	0,93	33,74
	100	639,25	0,0002112	1.551.620	0,0003845	4.035.335.000	28,28	0,89	79,32
	1.000	520,26	0,0002049	1.262.799	0,0003731	3.384.959.000	31,22	0,77	800,97
	10.000	380,83	0,0002043	924.376	0,0003719	2.485.332.000	34,94	0,62	6.921,65
	19.047	333,43	0,0002094	809.317	0,0003811	2.123.400.000	35,87	0,57	12.275,33
F22	50	521,45	0,0002035	1.245.276	0,0003704	3.361.732.000	32,97	0,79	32,75
	100	502,78	0,0002071	1.200.689	0,0003770	3.185.024.000	33,89	0,79	73,64
	1.000	420,57	0,0002058	1.004.363	0,0003748	2.680.054.000	36,78	0,71	733,66
	10.000	330,72	0,0002063	789.798	0,0003756	2.102.995.000	39,91	0,60	6.439,08
	54.293	264,85	0,0002067	632.502	0,0003763	1.680.757.000	42,16	0,50	30.233,61
F24	50	541,22	0,0002299	1.443.307	0,0003929	3.673.369.000	32,96	0,97	35,43
	100	505,32	0,0002252	1.347.559	0,0003848	3.501.777.000	33,81	0,91	83,17
	1.000	415,34	0,0002201	1.107.615	0,0003763	2.943.729.000	36,55	0,78	819,46
	10.000	322,90	0,0002195	861.092	0,0003752	2.295.227.000	39,59	0,65	7.077,49
	51.474	261,06	0,0002219	696.192	0,0003793	1.835.574.000	39,79	0,53	30.956,49

Tabla 9-28: Resumen datos de deformación 500 [µε].

Nivel de Deformación 500 [µε], Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015).									
Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
F1	50	668,89	0,0002741	1.572.031	0,0004990	3.150.086.000	34,70	1,40	66,29
	100	638,87	0,0002788	1.501.490	0,0005076	2.958.216.000	35,68	1,40	137,41
	1.000	506,42	0,0002745	1.190.203	0,0004998	2.381.482.000	38,56	1,16	1.249,82
	10.000	374,31	0,0002748	879.709	0,0005003	1.758.474.000	42,79	0,94	10.330,12
	17.557	335,61	0,0002751	788.748	0,0005009	1.574.589.000	43,68	0,86	17.087,59
F27	50	590,77	0,00030348	1.441.366	0,0005458	2.641.055.000	30,62	1,26	52,74
	100	524,16	0,00028758	1.278.858	0,0005172	2.472.883.000	30,10	1,04	107,10
	1.000	425,67	0,00027724	1.038.567	0,0004986	2.083.143.000	32,43	0,87	909,22
	10.000	339,50	0,00027520	828.314	0,0004949	1.673.732.000	34,12	0,72	7.779,36
	33.569	273,36	0,00028093	666.949	0,0005052	1.320.168.000	37,55	0,65	24.232,53
F6	50	648,68	0,0002692	1.487.770	0,0005001	2.974.732.000	35,06	1,34	61,58
	100	618,12	0,0002711	1.417.694	0,0005037	2.814.710.000	36,22	1,33	128,49
	1.000	494,50	0,0002689	1.134.167	0,0004996	2.270.065.000	39,31	1,13	1.205,37
	10.000	366,65	0,0002697	840.938	0,0005011	1.678.221.000	43,17	0,91	9.952,76
	21.173	326,15	0,0002711	748.043	0,0005037	1.485.077.000	44,62	0,83	19.561,07

Tabla 9-29: Resumen datos de deformación 750 [µε].

Nivel de Deformación 750 [µε], Envejecimiento a Corto Plazo según Norma AASHTO R30-02 (2015).									
Nombre Probeta	Ciclo de Carga	Carga Aplicada [N]	Deflexión de la Viga	Tensión a tracción [Pa]	Deformación por Tracción [m/m]	Rigidez a Flexión [Pa]	Angulo de Fase [°]	Energía Disipada [J/m3]	Energía Disipada Acum. [J/m3]
F16	50	759,13	0,0004358	2.104.858	0,0007933	2.653.154.000	33,85	2,92	137,56
	100	667,28	0,0004194	1.850.195	0,0007636	2.422.956.000	34,52	2,52	268,72
	500	480,82	0,0004132	1.333.187	0,0007524	1.772.028.000	37,40	1,91	1.128,94
	921	357,04	0,0004108	989.966	0,0007480	1.323.539.000	39,57	1,48	1.846,76
F17	50	666,01	0,0004192	1.554.819	0,0007694	2.020.793.000	40,14	2,42	119,95
	100	618,14	0,0004121	1.443.080	0,0007563	1.908.018.000	40,96	2,25	234,05
	1.000	462,70	0,0004089	1.080.200	0,0007505	1.439.369.000	44,04	1,77	1.967,91
	5.559	330,68	0,0004278	771.990	0,0007852	983.202.200	48,91	1,44	8.979,55
F18	50	237,79	0,0004420	560.066	0,0008097	691.717.800	36,45	0,85	92,20
	100	16,62	0,0000314	39.135	0,0000575	680.715.800	34,89	0,00	179,44
	150	14,83	0,0000212	34.928	0,0000388	899.758.700	30,27	0,00	270,93
	300	300,83	0,0004313	708.548	0,0007900	896.872.100	40,19	1,13	548,70
	422	123,56	0,0014385	291.036	0,0026350	110.451.300	59,48	2,08	820,09

Figura 9-8: Rigidez v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 250 [μϵ]).

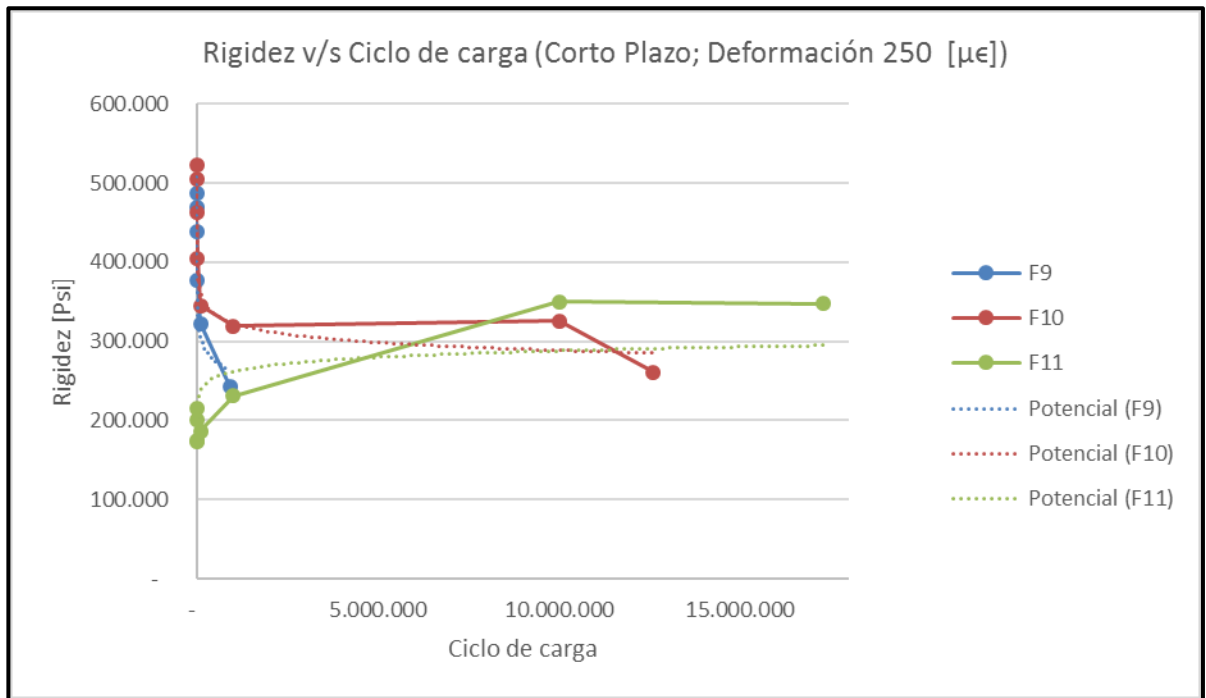


Figura 9-9: Rigidez v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 375 [μϵ]).

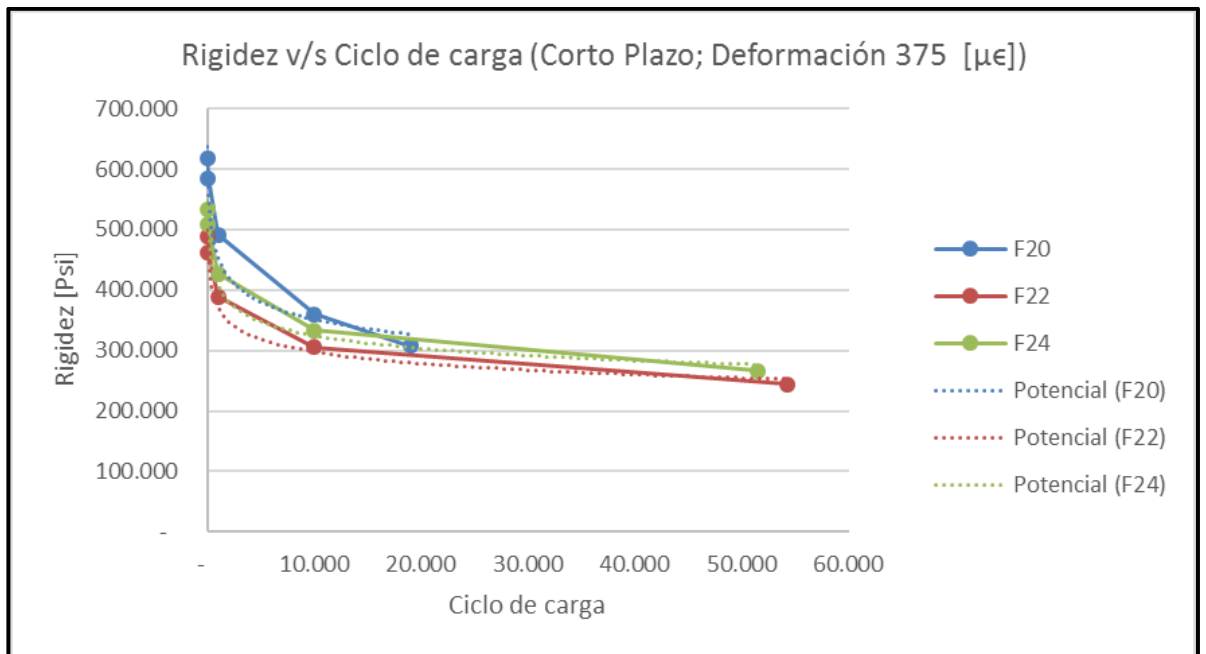


Figura 9-10: Rigidez v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 500 $\mu\epsilon$).

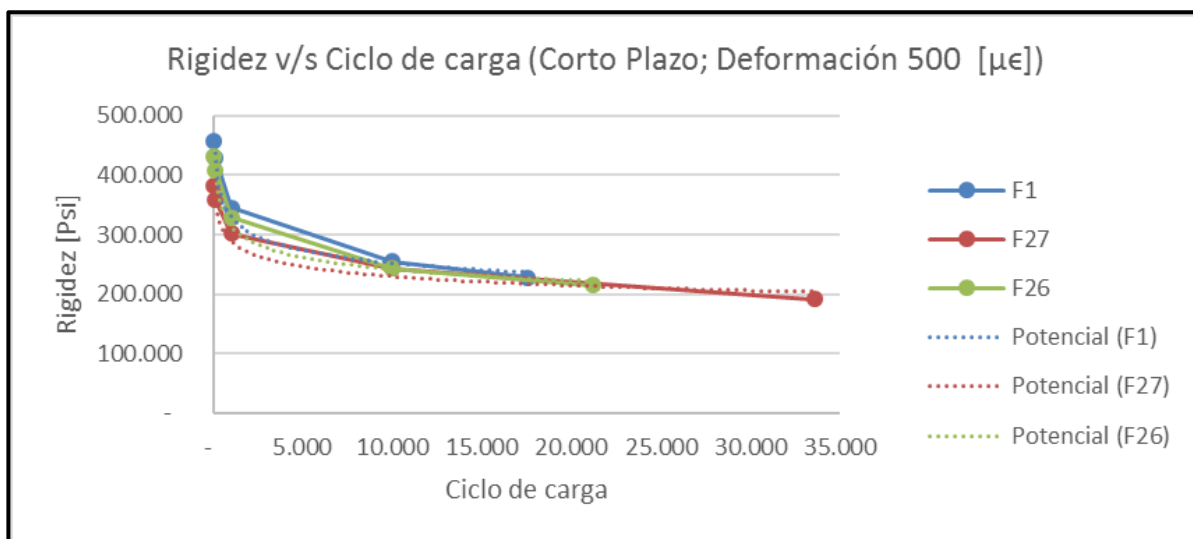


Figura 9-11: Rigidez v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 750 $\mu\epsilon$).

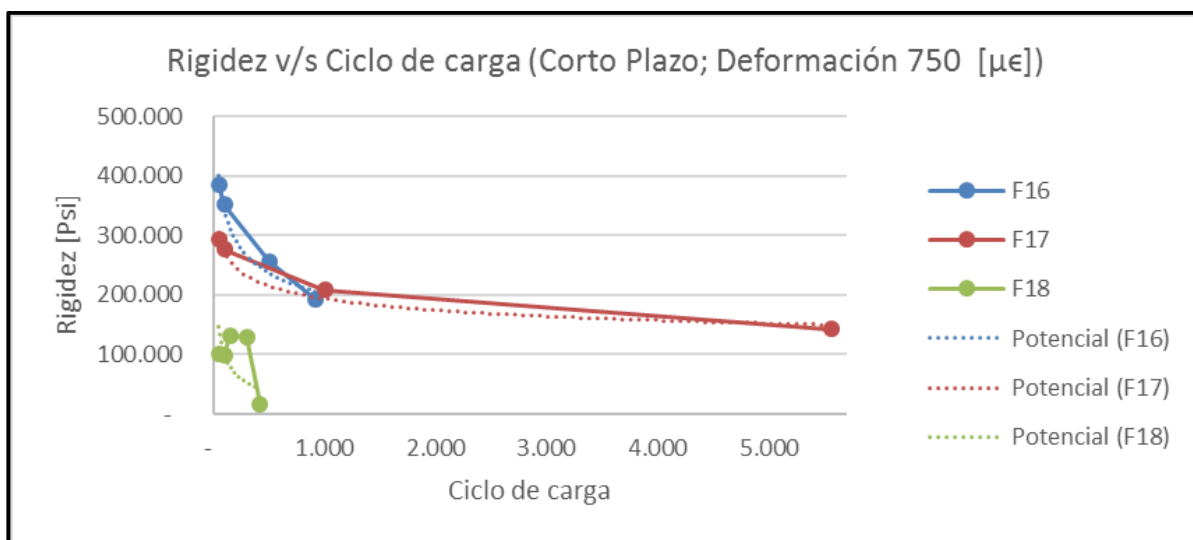


Figura 9-12: Energía Disipada v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 250 [$\mu\epsilon$]).

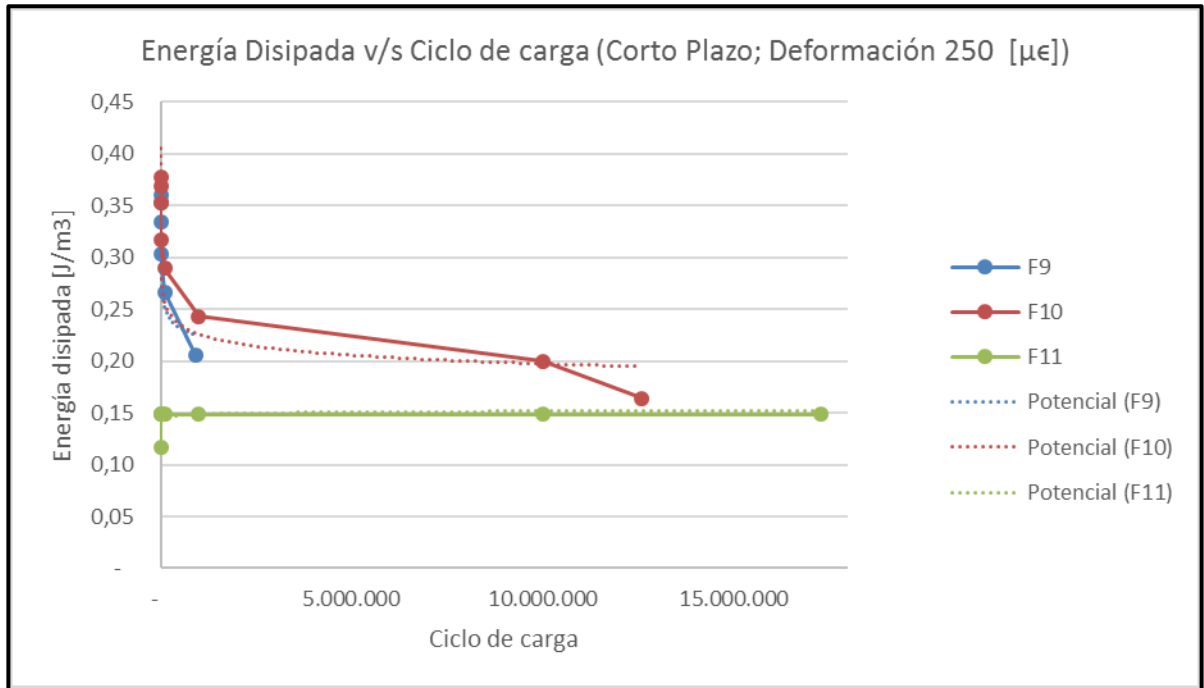


Figura 9-13: Energía Disipada v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 375 [$\mu\epsilon$]).

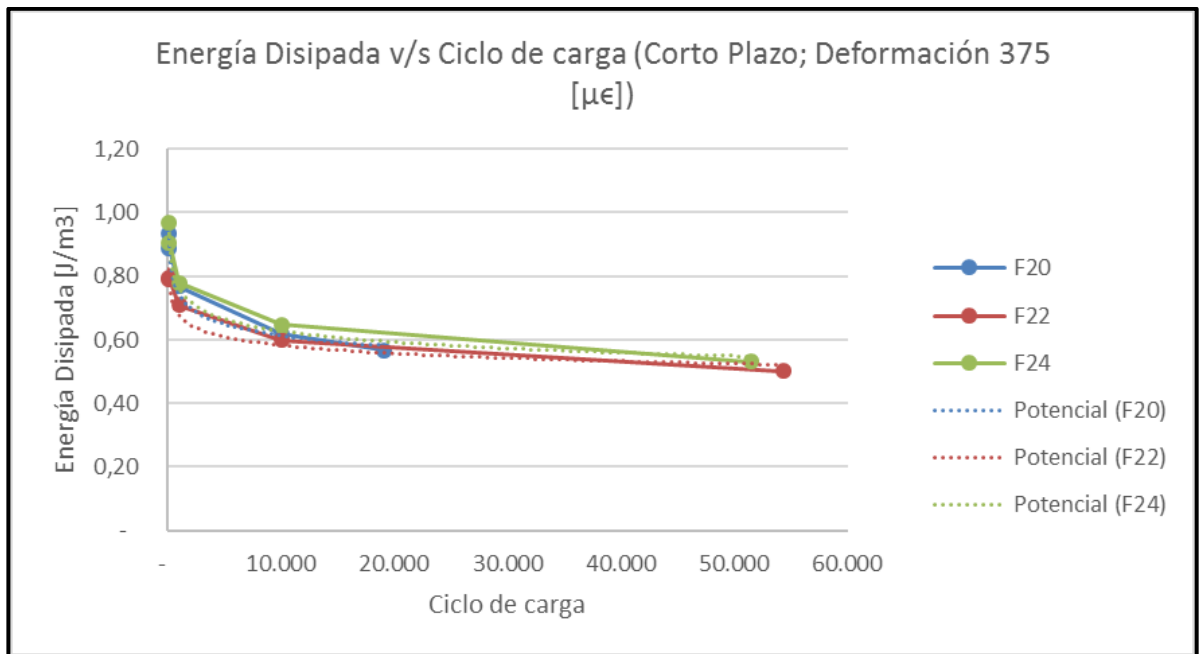


Figura 9-14: Energía Disipada v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 500 [μ€]).

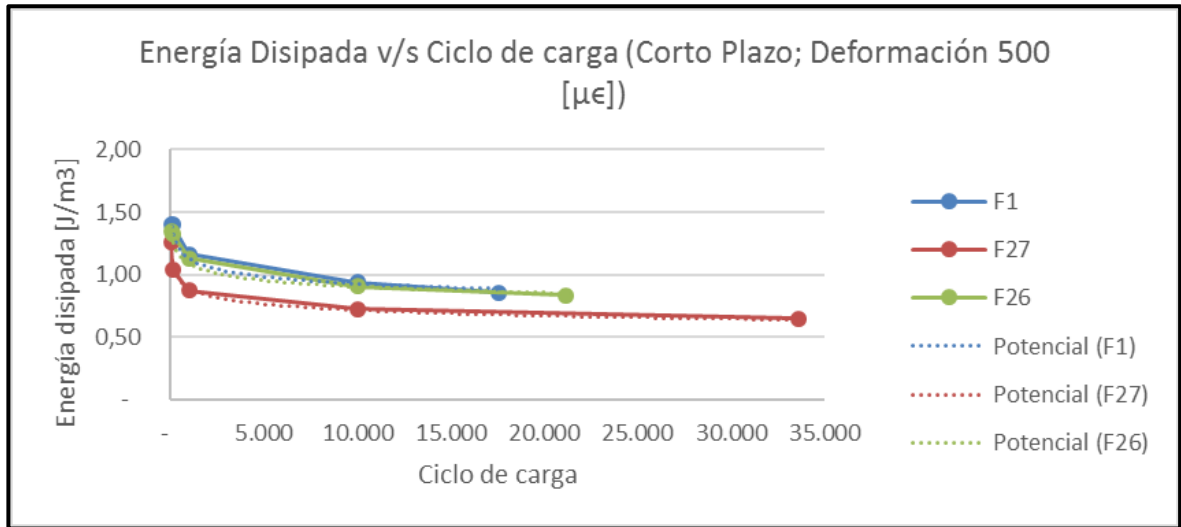


Figura 9-15: Energía Disipada v/s Ciclo de carga (Corto Plazo; 750 [μ€]).

