

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

## DETERMINACIÓN DE MÓDULO DE RIGIDEZ Y CARACTERIZACIÓN DE MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLA SUPERPAVE

Memoria de titulación presentada por:

**Camila Fernanda Corona Rojas**

Como requisito para optar al título de:

**Constructor Civil**

Profesor guía:

**Carlos Wahr Daniel**

VALPARAÍSO, CHILE

2017

# **“DETERMINACIÓN DE MÓDULO DE RIGIDEZ Y CARACTERIZACIÓN DE MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLA SUPERPAVE”**

## **RESUMEN**

El primer proyecto del país en emplear el diseño de mezcla asfáltica a través de metodología Superpave, es el proyecto “Conservación rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez año 2016 Etapa I”, para ello se lleva a cabo el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica que debe ser utilizada en una de las pistas de rodaje del aeropuerto, según las normativas vigentes respectivas y las especificaciones técnicas especiales del proyecto.

Es importante caracterizar estructuralmente una mezcla asfáltica, es para esto, que el proyecto exige que se realice el ensayo de Módulo de Rigidez según norma UNE-EN 12697-26. Por otra parte, se realiza el ensayo de Módulo Dinámico según norma AASHTO T342-11. Ambos ensayos se realizan sobre la mezcla diseñada previamente por método Superpave.

Como principal objetivo de la presente Memoria, se ejecutan y comparan dichos ensayos con el fin de dejar en evidencia sus ventajas y desventajas.

Se confeccionan probetas que cumplan con los requerimientos exigidos en las respectivas normas, para cada uno de los ensayos.

Se ejecuta el ensayo de Módulo de Rigidez, sobre 4 probetas dimensionadas y acondicionadas correctamente, a una temperatura de 15 [°C]. Todas las muestras cumplen con el valor de Módulo de Rigidez mínimo, de 4.000 [MPa] exigidos por las especificaciones del proyecto.

Se realiza el ensayo de Módulo Dinámico, sobre 2 núcleos dimensionados y acondicionados correctamente, a temperaturas controladas según la norma, de -10 [°C], 4 [°C], 21 [°C], 37 [°C] y 54 [°C] y a frecuencias de carga controladas, como 0,1 [Hz]; 0,5[Hz]; 1, 5 [Hz]; 10 [Hz] y 25 [Hz]. Se confeccionan una Curva Maestra y Curvas Isócronas, según los resultados obtenidos en el ensayo. También, se evalúan los resultados según velocidad, utilizando el gráfico de Barksdale y se logra transformar velocidad en frecuencia, según tiempo de pulso y profundidad del pavimento.

Al comparar los ensayos de Módulo de Rigidez y Módulo Dinámico, se determina que el Módulo Dinámico realizado bajo la norma y software mencionados en esta Memoria, entrega más completos resultados, que permiten concluir respecto a más parámetros que en el Módulo de Rigidez, como lo son la temperatura y la velocidad.

## **ABSTRACT**

The first project of the country to opt for asphalt mix design through Superpave methodology is the project "Routine Conservation Arturo Merino Benítez Airport, year 2016 Stage I", for this purpose, the volumetric design of the asphalt mixture is carried out, which must be used in one of the taxiways of the airport, according to the respective current regulations and the special technical specifications of the project.

It is important to characterize structurally an asphalt mixture, is for this, that the project requires the Stiffness Modulus test according to UNE-EN 12697-26. On the other hand, the Dynamic Modulus test according to AASHTO T342-11 is performed. Both tests are performed on the mixture previously designed by Superpave method.

As the main objective of this Report, these tests are executed and compared in order to reveal their advantages and disadvantages.

Test specimens are made that meet the requirements of the respective standards, for each of the tests.

The Stiffness Modulus test is run on 4 specimens dimensioned and conditioned correctly, at a temperature of 15 [° C]. All samples comply with the minimum Stiffness Modulus value of 4,000 [MPa] required by the project specifications.

The Dynamic Modulus test was performed on 2 cores sized and conditioned correctly, at temperatures controlled by the standard of -10 [° C], 4 [° C], 21 [° C], 37 [° C] and 54 [° C], and at controlled load frequencies, such as 0,1 [Hz]; 0.5 [Hz]; 1.5 Hz [Hz]; 10 [Hz] and 25 [Hz]. A Master Curve and Isochronous Curves are made, according to the results obtained in the test.

Also, the results are evaluated according to speed, using the Barksdale graph and it is possible to transform speed in frequency, according to pulse time and depth of the pavement.

When comparing the tests of Stiffness Modulus and Dynamic Modulus, it is determined that the Dynamic Modulus performed under the standard and software mentioned in this Report, provides more complete results, which allow to conclude regarding more parameters than in the Stiffness Modulus, such as temperature and speed.

## GLOSARIO

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials.
ASTM	: American Society for Testing Materials.
BBR	: Bending Beam Rheometer (Reómetro de flexión).
cm <sup>3</sup>	: Centímetros cúbicos.
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Reómetro de corte dinámico).
DTT	: Direct Tension Test (ensayo de tracción directa).
ESALs	: Equivalent Single Axles Loads (Ejes Simples Equivalentes Cargados).
FAA	: Federal Aviation Administration.
FHWA	: Federal Highway Administration.
g	: Gramos.
G*	: Módulo complejo en corte.
h	: Horas.
Hz	: Hertz o hercios.
IDT	: Indirect Tensile Tester (Ensayo de tracción indirecta).
In (")	: Inch (pulgada).
kPa	: Kilopascal.
km	: Kilómetros.
LEMCO	: Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras.
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Transformador diferencial de variación lineal).
m	: Metros.
M.C	: Manual de Carreteras.
MAC	: Mezcla Asfáltica en Caliente.
MAS	: Maximum Aggregate Size (Tamaño máximo del agregado).
MD	: Módulo Dinámico.
MEPDG	: The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (Guía de diseño Empírico Mecanicista de Pavimento)
min	: Minutos.
mm	: Milímetros.
MPa	: Megapascal.
ms	: Milisegundo.
NMAS	: Nominal Maximum Aggregate Size (Tamaño máximo nominal del agregado).
PAV	: Pressure Aging Vessel (Equipo a presión).
PG	: Performance Grade.
RTFO	: Rolling Thin Film Oven (Horno de película delgada rotativa).
RV	: Rotational Viscometer (Viscosímetro rotacional).
s	: Segundos.
SGC	: Compactador Giratorio Superpave.

SHRP	:	Strategic Highway Research Program.
SST	:	Superpave Shear Tester (ensayo de corte Superpave).
SUPERPAVE	:	Superior PERFORMANCE Asphalt PAVEMENTe.
TRS	:	Termoreológicamente simples.
TSR	:	Ensayo de Tracción Indirecta.
UNE	:	Una Norma Española.
Va	:	Vacíos de aire.
VAF	:	Vacíos llenos de Asfalto.
VAM	:	Vacíos en el Agregado Mineral.
%	:	Porcentaje.
°	:	Grados.
°C	:	Grados Celsius.
µm	:	Micrómetro.

# “DETERMINACIÓN DE MÓDULO DE RIGIDEZ Y CARACTERIZACIÓN DE MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLA SUPERPAVE”

## INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
GLOSARIO.....	III
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Antecedentes Generales .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos del estudio.....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Objetivos generales.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
<b>1.3 Alcances del estudio .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Metodología de trabajo.....</b>	<b>3</b>
<b>1.5 Estructura de memoria .....</b>	<b>4</b>
<b>2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Mezcla Asfáltica .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Método Marshall.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Método SUPERPAVE .....</b>	<b>7</b>
2.3.1 Introducción .....	7
2.3.2 Ligantes asfálticos.....	7
2.3.3 Agregados pétreos .....	9
2.3.4 Compactación y Ensayos de Performance .....	11
<b>2.4 Gravedad específica y parámetros volumétricos.....</b>	<b>14</b>
2.4.1 Gravedad Específica de Agregados .....	15
2.4.2 Gravedad Específica del Ligante.....	16
2.4.3 Gravedad Específica de Mezcla .....	17
2.4.4 Parámetros Volumétricos de la Mezcla .....	17
2.4.5 Diagrama de componentes de MAC compactada .....	19
<b>2.5 Ensayo de Tracción Indirecta.....</b>	<b>20</b>
2.5.1 Temperatura de Ensayo. ....	22
2.5.2 Velocidad de Carga de Ensayo.....	22
2.5.3 Temperatura de Compactación.....	22
<b>2.6 Valor absoluto del módulo complejo .....</b>	<b>22</b>
2.6.1 Módulo de Rigidez.....	24
2.6.2 Módulo Dinámico .....	25

V

<b>3</b>	<b>TRABAJO EN LABORATORIO .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Selección de materiales.....</b>	<b>27</b>
3.1.1	Selección de Ligante asfáltico.....	27
3.1.2	Selección de Agregado.....	29
3.1.3	Selección de la Estructura del Agregado de mezclas de prueba .....	32
3.1.4	Contenido de ligante asfáltico de mezclas de prueba.....	35
<b>3.2</b>	<b>Elaboración de probetas .....</b>	<b>37</b>
3.2.1	Preparación de mezcla.....	37
3.2.2	Fabricación de probetas .....	38
<b>3.3</b>	<b>Características de mezcla de diseño .....</b>	<b>40</b>
3.3.1	Selección de estructura de agregado de diseño .....	40
3.3.2	Selección de porcentaje de ligante asfáltico de diseño.....	48
3.3.3	Evaluación de la Sensibilidad a la humedad de la Mezcla Asfáltica.....	53
<b>3.4</b>	<b>Módulo de Rigidez .....</b>	<b>54</b>
3.4.1	Confección de probetas.....	54
3.4.2	Ensayo de densidad real para mezcla compactada .....	56
3.4.3	Equipo, dispositivos y sistema de medición a utilizar en Ensayo de Tracción Indirecta [7]...	56
3.4.4	Ejecución de Ensayo de Tracción Indirecta .....	59
<b>3.5</b>	<b>Módulo Dinámico .....</b>	<b>62</b>
3.5.1	Confección de probetas.....	62
3.5.2	Ensayo de densidad real para núcleo.....	64
3.5.3	Equipo y dispositivos utilizados en ensayo de Módulo Dinámico .....	64
3.5.4	Ejecución de Ensayo Módulo Dinámico.....	65
<b>3.6</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>71</b>
3.6.1	Módulo de Rigidez.....	71
3.6.2	Módulo Dinámico .....	73
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>78</b>
<b>4.1</b>	<b>Módulo de Rigidez .....</b>	<b>78</b>
<b>4.2</b>	<b>Módulo Dinámico .....</b>	<b>80</b>
<b>4.3</b>	<b>Ventajas y desventajas de los ensayos .....</b>	<b>82</b>
4.3.1	Módulo de Rigidez.....	82
4.3.2	Módulo Dinámico .....	82
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>86</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>88</b>
<b>7.1</b>	<b>ANEXO A: “Diseño de Mezcla asfáltica SUPERPAVE” .....</b>	<b>88</b>
<b>7.2</b>	<b>ANEXO B: “Ensayo de Módulo de Rigidez”.....</b>	<b>102</b>
<b>7.3</b>	<b>ANEXO C: “Ensayo de Módulo Dinámico” .....</b>	<b>106</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Líneas de densidad máxima para diferentes tamaños máximos. ....	10
Figura 2-2: Puntos de Control y Zona de Restricción de gradación. ....	11
Figura 2-3: Esquema típico de SGC.....	12
Figura 2-4: Configuración molde SGC.....	13
Figura 2-5: Volumen efectivo de agregado. ....	16
Figura 2-6: Representación vista microscópica de agregado, asfalto y vacíos de una mezcla [1]. ....	18
Figura 2-7: Diagrama de componentes de una MAC [4]. ....	20
Figura 2-8: Estado de tensiones en pavimento bajo una carga simple.....	21
Figura 2-9: Configuración de carga de ensayo de tracción indirecta [5]. ....	21
Figura 2-10: Esfuerzo y deformación de material visco-elástico [6]. ....	23
Figura 2-11: Forma de impulso de carga, con periodo ascendente y carga máxima [7]. ....	25
Figura 3-1: Gráfico de granulometría de los agregados ....	30
Figura 3-2: Gráfica granulométrica de mezclas de prueba. ....	34
Figura 3-3: Incorporación de ligante asfáltico a mezcla. ....	37
Figura 3-4: Colocación de mezcla en bandeja. ....	38
Figura 3-5:(1) SGC; (2) moldes de compactador. ....	39
Figura 3-6: Cantidad de Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico. ....	51
Figura 3-7: Vacíos en el agregado mineral versus contenido de ligante asfáltico. ....	51
Figura 3-8: Vacíos lleno con asfalto versus contenido de ligante asfáltico. ....	52
Figura 3-9: Proporción de polvo versus contenido de ligante asfáltico. ....	52
Figura 3-10: Demarcación de probetas para posterior corte. ....	55
Figura 3-11: Corte de probetas con sierra diamantada. ....	55
Figura 3-12: Principales componentes de Equipo de ensayo [7]. ....	57
Figura 3-13: Bastidor de montaje de LVDT (izquierda) y soporte de alineación de LVDT (derecha) [7]. ....	58
Figura 3-14: Probeta cilíndrica compactada (izquierda) y testiguera en funcionamiento (derecha).....	63
Figura 3-15: Equipo de rectificación en funcionamiento. ....	63
Figura 3-16: Probeta sobre dispositivo (izquierda) y probeta con topes y soportes plásticos (derecha).....	64
Figura 3-17: Equivalente de pulso haversine y pulso triangular [28]. ....	69
Figura 3-18: Pulso de esfuerzo vertical bajo una carga haversine o triangular (Barksdale, 1971) [28]. ....	69
Figura 3-19: Resultados Módulo Dinámico, $ E^* $ versus frecuencia. ....	74
Figura 3-20: Formación de curva maestra por ecuación sigmoideal. ....	75
Figura 3-21: Curva Maestra, con temperatura de referencia de 21 [°C]. ....	75
Figura 3-22: Curvas Isócronas, para 3 frecuencias fijas. ....	76
Figura 3-23: Curvas Isócronas, según 3 velocidades fijas.....	77
Figura 4-1: Variación porcentual del Módulo de Rigidez.....	79
Figura 4-2: Bondad de Ajuste de log ( $ E^* $ ).....	81
Figura 7-1: Gráfica granulométrica Mezcla de prueba 1. ....	88

Figura 7-2: Gráfica granulométrica Mezcla de prueba 2. ....	89
Figura 7-3: Gráfica granulométrica Mezcla de prueba 3. ....	90
Figura 7-4: Datos de SGC para probeta M5. ....	107
Figura 7-5: Datos de SGC para probeta M8. ....	107
Figura 7-6: Gráfica de Módulo Dinámico versus frecuencia.....	108

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Grados de ligante asfáltico Superpave. [3].....	8
Tabla 2-2: Parámetros de SGC según esfuerzo. ....	13
Tabla 3-1: Equipos para determinar Propiedades físicas del asfalto [10]. ....	28
Tabla 3-2: Resultados de ensayos exigidos sobre ligante y su criterio de aceptabilidad. ....	28
Tabla 3-3: Granulometría de los agregados.....	29
Tabla 3-4: Características del agregado por cada pila. ....	30
Tabla 3-5: Propiedades de Consenso y sus normas. ....	31
Tabla 3-6: Resultados de Propiedades de Consenso. ....	31
Tabla 3-7: Propiedades de Origen y sus normas. ....	32
Tabla 3-8: Resultados de Propiedades de Origen.....	32
Tabla 3-9: Requerimientos de gradación Superpave. [1].....	33
Tabla 3-10: Banda granulométrica especificada. ....	33
Tabla 3-11: Resumen granulometría mezclas de prueba. ....	34
Tabla 3-12: Propiedades estimadas de las mezclas de agregados.....	35
Tabla 3-13: Resultados de ligante asfáltico de mezclas de prueba.....	36
Tabla 3-14: Densificación para mezcla de prueba 1.....	42
Tabla 3-15: Densificación para mezcla de prueba 2.....	42
Tabla 3-16: Densificación para mezcla de prueba 3.....	43
Tabla 3-17: Promedio %G <sub>mm</sub> para N <sub>inicial</sub> , N <sub>diseño</sub> y N <sub>máximo</sub> para mezclas de prueba. ....	43
Tabla 3-18: Resultados de Va y VAM.....	44
Tabla 3-19: Resumen de compactación de las Mezclas de prueba. ....	44
Tabla 3-20: Propiedades volumétricas de la mezcla estimada para N <sub>diseño</sub> .....	45
Tabla 3-21: Propiedades estimadas de la compactación de la mezcla. ....	45
Tabla 3-22: Criterios volumétricos y de densificación para mezclas Superpave. ....	46
Tabla 3-23: Resultados de P <sub>be, estimado</sub> y Proporción de polvo. ....	46
Tabla 3-24: Propiedades Volumétricas estimadas. ....	47
Tabla 3-25: Densificación para Mezcla 2 con 4,9% de contenido de asfalto.....	48
Tabla 3-26: Densificación para Mezcla 2 con 5,4% de contenido de asfalto.....	49
Tabla 3-27: Densificación para Mezcla 2 con 5,9% de contenido de asfalto.....	49
Tabla 3-28: Densificación para Mezcla 2 con 6,4% de contenido de asfalto.....	49
Tabla 3-29: Resumen de compactación de la Mezcla 2. ....	50
Tabla 3-30: Resumen de propiedades volumétricas de Mezcla 2, para N <sub>diseño</sub> . ....	50
Tabla 3-31: Propiedades de la Mezcla de diseño con 5,4% de ligante asfáltico. ....	53
Tabla 3-32: Resultados de Sensibilidad a la humedad de la mezcla de diseño (TSR).....	53
Tabla 3-33: Tiempos recomendados de equilibrio [25]. ....	65
Tabla 3-34: Rangos de carga dinámica. ....	66
Tabla 3-35: Número de ciclos para la secuencia de ensayo [25]. ....	66

Tabla 3-36: Masa de mezcla a compactar .....	71
Tabla 3-37: Datos de compactación de probetas .....	71
Tabla 3-38: Datos de $G_{mb}$ y datos necesarios para su obtención .....	71
Tabla 3-39: Resultados de Módulo Medido y Módulo Ajustado en cada diámetro aplicado.....	72
Tabla 3-40: Resultados de Módulo de Rigidez y Módulo de rigidez Ajustado.....	72
Tabla 3-41: Características de probetas a ensayar.....	73
Tabla 3-42: Datos obtenidos en ensayo de MD.....	73
Tabla 3-43: Resultados según gráfico de Barksdale.....	76
Tabla 3-44: Resultados según ecuación y factor de Brown.....	77
Tabla 3-45: Tiempo de pulso y frecuencia para cada velocidad.....	77
Tabla 4-1: Resultados de Módulo de Rigidez, obtenidos para cada probeta.....	78
Tabla 7-1: Granulometría de Mezcla de Prueba 1.....	88
Tabla 7-2: Granulometría de Mezcla de Prueba 2.....	89
Tabla 7-3: Granulometría de Mezcla de Prueba 3.....	90
Tabla 7-4: Gravedad específica Bruta para Mezclas de prueba 1, 2 y 3.....	91
Tabla 7-5: Gravedad específica teórica Máxima para Mezclas de prueba 1, 2 y 3.....	92
Tabla 7-6: Datos de densificación para Mezcla de prueba 1.....	93
Tabla 7-7: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2.....	94
Tabla 7-8: Datos de densificación para Mezcla de prueba 3.....	95
Tabla 7-9: Gravedad específica bruta para Mezcla 2, según porcentaje de ligante asfáltico.....	96
Tabla 7-10: Gravedad específica teórica máxima para Mezcla 2, según porcentaje de ligante asfáltico....	97
Tabla 7-11: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2, con 4,9% de ligante asfáltico.....	98
Tabla 7-12: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2, con 5,4% de ligante asfáltico.....	99
Tabla 7-13: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2, con 5,9% de ligante asfáltico.....	100
Tabla 7-14: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2, con 6,4% de ligante asfáltico.....	101
Tabla 7-15: Masa de mezcla a compactar.....	106
Tabla 7-16: Datos de compactación de probetas.....	106
Tabla 7-17: Datos de $G_{mb}$ y datos necesarios para su obtención.....	106
Tabla 7-18: Datos de Módulo Dinámico obtenido en ensayo.....	108
Tabla 7-19: Parámetros utilizados en ecuación sigmoideal.....	109
Tabla 7-20: Datos utilizados en Curva Maestra.....	109
Tabla 7-21: Datos utilizados en Curvasbs Isócronas según velocidad.....	110

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Gravedad específica neta.....	15
Ecuación 2-2: Gravedad específica aparente.....	15
Ecuación 2-3: Gravedad específica efectiva.....	15
Ecuación 2-4: Gravedad específica máxima.....	17
Ecuación 2-5: Porcentaje de vacíos de aire.....	17
Ecuación 2-6: Vacíos en el agregado mineral.....	18
Ecuación 2-7: Vacíos llenos de asfalto.....	18
Ecuación 2-8: Absorción del asfalto.....	19
Ecuación 2-9: Contenido de asfalto efectivo.....	19
Ecuación 2-10: Esfuerzo aplicado.....	22
Ecuación 2-11: Deformación resultante.....	23
Ecuación 2-12: Módulo Complejo.....	23
Ecuación 2-13: Ecuaciones de componentes de Módulo complejo.....	23
Ecuación 2-14: $ E^* $ y ángulo de fase.....	23
Ecuación 2-15: Módulo Secante.....	24
Ecuación 2-16: Relación entre $E^*$ y $G^*$ .....	24
Ecuación 3-1: Estimación Gravedad Específica Efectiva.....	35
Ecuación 3-2: Estimación de Volumen de Ligante asfáltico absorbido.....	35
Ecuación 3-3: Estimación Volumen de Ligante efectivo.....	36
Ecuación 3-4: Estimación de Contenido de prueba inicial de ligante asfáltico.....	36
Ecuación 3-5: Peso del agregado en $P_{bi}$ .....	36
Ecuación 3-6: Determinación de $G_{mm}$ .....	40
Ecuación 3-7: Determinación de $G_{mb}$ medida.....	40
Ecuación 3-8: Determinación de $G_{mb}$ estimada.....	41
Ecuación 3-9: Determinación de factor de corrección.....	41
Ecuación 3-10: Gravedad Específica Bruta corregida.....	41
Ecuación 3-11: Cantidad de Vacíos de aire.....	43
Ecuación 3-12: Cantidad de Vacíos de Agregado Mineral.....	43
Ecuación 3-13: Contenido de ligante asfáltico para lograr un 4% de $V_a$ .....	44
Ecuación 3-14: Estimación de VAM para un 4% de vacíos de aire.....	45
Ecuación 3-15: Estimación de VFA para un 4% de vacíos de aire.....	45
Ecuación 3-16: Estimación de $\%G_{mm}@N_{inicial}$ para un 4% de vacíos de aire.....	45
Ecuación 3-17: Estimación de $\%G_{mm}@N_{máximo}$ para un 4% de vacíos de aire.....	45
Ecuación 3-18: Estimación de ligante asfáltico efectivo a 4% de $V_a$ .....	46
Ecuación 3-19: Estimación de la proporción de Polvo para un 4% de $V_a$ .....	46
Ecuación 3-20: Determinación de porcentaje de agua absorbida.....	56
Ecuación 3-21: Determinación de densidad real de mezcla compactada.....	56

Ecuación 3-22: Módulo de Rigidez [7].	58
Ecuación 3-23: Ecuación sigmoidal de Mirza y Witczak.	68
Ecuación 3-24: Factor de desplazamiento.	68
Ecuación 3-25: Determinación de tiempo de carga.	70
Ecuación 7-1: Ecuación sigmoidal utilizada en cálculos.	109

# **“DETERMINACIÓN DE MÓDULO DE RIGIDEZ Y CARACTERIZACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLA SUPERPAVE”**

## **1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES GENERALES**

En busca de mejorar la conectividad e integración de nuestro país y así mismo potenciar de alguna manera el desarrollo turístico, productivo y económico, es que se realizan grandes inversiones en la red aeroportuaria nacional, ya sea con nuevos proyectos o con la conservación de los ya ejecutados. Producto de lo anterior, se lleva a cabo el proyecto “Conservación rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez año 2016 Etapa I”, que tiene como principal objetivo cumplir con la mantención de una pista de rodaje del mencionado aeropuerto, utilizando metodología Superpave (SUPERior PERFORMANCE Asphalt PAVEMENT) para el diseño de la mezcla asfáltica.

Como primera gran obra chilena que demanda cumplir con especificaciones Superpave, metodología creada por el programa SHRP (Strategic Highway Research Program), es que se comienza un cambio progresivo del método Marshall, que ha sido largamente utilizado en el diseño de MAC (Mezcla Asfáltica en Caliente) en Chile, dando paso a nuevas especificaciones tanto para ligantes como agregados y un nuevo método de diseño volumétrico para mezclas asfálticas en caliente.

La Memoria a desarrollar se basa en desarrollar el Ensayo de Módulo de Rigidez mediante normativa UNE, el cual será comparado con el ensayo de Módulo Dinámico desarrollado mediante normativa AASHTO, en búsqueda de evidenciar ventajas y desventajas de cada uno de los ensayos.

Dichos ensayos, se realizan sobre una MAC llevada a cabo según metodología Superpave, que cumpla con su respectivas normativas en conjunto con las “Especificaciones técnicas especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por Superpave”, las cuales hacen referencia a la circular de asesoramiento AC150/5370-10G de Federal Aviation Administration (FAA) de U.S.

## **1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

### **1.2.1 Objetivos generales**

- Obtener resultados de Módulo de Rigidez a través del ensayo de Tracción Indirecta en probetas cilíndricas, de mezcla asfáltica diseñada previamente.
- Obtener caracterización de Módulo Dinámico de mezcla asfáltica diseñada previamente.
- Diseñar adecuadamente una mezcla asfáltica en caliente, logrando propiedades volumétricas que cumplan a cabalidad con la especificación Superpave.
- Cumplir exigencias que concierna al diseño y ensayos en estudio de la mezcla asfáltica detallados en “Especificaciones técnicas especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por Superpave”.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Determinar las cantidades idóneas de material pétreo que luego formarán parte de la combinación granulométrica de la mezcla asfáltica, teniendo en cuenta el cumplimiento de especificaciones Superpave.
- Determinar porcentaje óptimo de ligante asfáltico.
- Fabricar Mezclas de Prueba confeccionadas en laboratorio en base a las proporciones de material pétreo y asfáltico antes determinados.
- Cumplir con un porcentaje de vacíos en la mezcla de 3,5 como mínimo.
- Lograr un valor de Módulo de Rigidez a 15 [°C] superior a los 4.000 [MPa].
- Analizar resultados de Módulo de Rigidez y de Módulo Dinámico y realizar análisis comparativo entre ellos, evidenciando sus ventajas y desventajas.

### 1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO

- En el presente estudio de Memoria se lleva a cabo el Diseño volumétrico de MAC, el que satisface parámetros según especificaciones de metodología Superpave, como cantidades de agregado pétreo y asfalto en la mezcla y valores de vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA), cantidad de polvo y vacíos de aire (Va).
- El diseño de la mezcla asfáltica debe llevarse a cabo según MS-2 Mix Design Methods 7<sup>ma</sup> edición.
- Se cumplen requerimientos para etapa de Diseño de mezcla y Ensayos de mezcla asfáltica según “Especificaciones técnicas especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por Superpave” y normativas derivadas de la misma.
- Para las mezclas de diseño, se utiliza un tamaño de partícula máximo nominal de 19 [mm] y un espesor de carpeta asfáltica mayor a 100 [mm].
- Para la determinación del Módulo de Rigidez mediante el Ensayo de Tracción Indirecta y para la caracterización del Módulo Dinámico se utiliza el equipo servo hidráulico marca Cooper Technology (CRT-HYD 25-II) y los accesorios necesarios.
- Todo lo que respecta a Diseño de Mezcla, confección de probetas y ensayos realizados se llevan a cabo en las dependencias del Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras (LEMCO).
- La compactación de probetas cilíndricas utilizadas se realiza mediante Compactador Giratorio Superpave. (SGC).

### 1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El trabajo fue desarrollado siguiendo la siguiente metodología:

#### 1. Etapa I: Revisión Bibliográfica

- Lectura y estudio de normas AASHTO, ASTM, UNE y Manual de Carreteras pertinentes con la metodología de Diseño y los ensayos de Módulo de Rigidez y Módulo Dinámico.
- Revisión de Libros, papers y memorias realizadas, adecuados a temas estudiados.

#### 2. Etapa II: Diseño de Mezcla en laboratorio

- Selección de materiales, pétreos y ligante asfáltico.
- Preparación de mezclas.
- Confección de probetas cilíndricas.
- Ejecución de ensayos pertinentes.
- Definición de estructura de agregado pétreo y cantidad de ligante asfáltico de diseño.

### **3. Etapa III: Determinación de Módulo de Rigidez**

- Confección de probetas cilíndricas a partir de mezcla diseñada previamente.
- Realización de Ensayo de densidad aparente.
- Ejecución de Ensayo de Tracción Indirecta.

### **4. Etapa IV: Caracterización de Módulo Dinámico**

- Confección de probetas cilíndricas a partir de mezcla diseñada previamente.
- Extracción de núcleo de probeta.
- Realización de Ensayo de densidad real.
- Ejecución de Ensayo de Módulo Dinámico.

### **5. Etapa V: Análisis de Resultados**

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

## **1.5 ESTRUCTURA DE MEMORIA**

El presente trabajo de Memoria de título se encuentra estructurado por 7 capítulos, incluyendo referencias bibliográficas y Anexos. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

### **Capítulo 1: Introducción**

Se exponen los antecedentes generales donde se destaca la importancia del presente estudio, se incluyen los objetivos a cumplir, los alcances del estudio y se presenta un breve resumen de cada capítulo a tratar.

### **Capítulo 2: Marco Teórico**

Se abarcan detalles en cuanto a Método Marshall, Metodología Superpave, Ensayo de Tracción Indirecta y la determinación del Módulo de Rigidez y una descripción conceptual de la Caracterización del Módulo Dinámico.

### **Capítulo 3: Trabajo en Laboratorio**

Se abordan los procedimientos a seguir durante el trabajo en laboratorio, como lo son la selección de materiales, características de la mezcla diseñada, preparación de probetas, metodología de ensayos pertinentes y presentación de resultados obtenidos.

### **Capítulo 4: Análisis de Resultados**

Se realiza análisis de resultados correspondientes al diseño volumétrico de MAC mediante metodología Superpave, resultados de Módulo de Rigidez y caracterización de Módulo Dinámico.

### **Capítulo 5: Conclusiones**

Se exponen conclusiones finales del trabajo desarrollado como Memoria de Título, respondiendo a los objetivos planteados inicialmente.

### **Capítulo 6: Referencias Bibliográficas**

Se indica el material bibliográfico utilizado durante el desarrollo del presente trabajo.

### **Capítulo 7: Anexos**

Se adjunta información complementaria acorde al desarrollo del estudio.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 MEZCLA ASFÁLTICA**

Una mezcla asfáltica en caliente (MAC) se define como la combinación de áridos, incluido el polvo, con un ligante asfáltico. En dicha combinación es importante determinar las cantidades de ligante y áridos ya que son las que determinan las propiedades físicas de la mezcla. Estas cantidades son definidas a través de diferentes métodos de diseño, como Método Marshall y Método Superpave, que son los más utilizados.

Según Asphalt Mix Methods [1], una mezcla asfáltica diseñada, tiene como objetivo, cumplir con:

- Suficiente asfalto para asegurar un pavimento durable;
- Suficiente estabilidad en la mezcla para satisfacer las demandas del tráfico sin distorsión o desplazamiento;
- Suficientes vacíos de aire en la mezcla final compactada, para permitir una ligera compactación adicional bajo la carga de tráfico y una ligera cantidad expansión térmica sin exudación o pérdida de estabilidad,
- Un contenido máximo de vacíos para limitar la permeabilidad de aire perjudicial y humedad en la mezcla;
- Suficiente trabajabilidad para permitir una eficiente colocación de la mezcla sin segregación y sin sacrificar la estabilidad y el rendimiento; y
- Textura agregada y dureza para proporcionar suficiente resistencia al deslizamiento en condiciones climáticas desfavorables.

Es de gran importancia elegir un contenido de ligante asfáltico que logre un equilibrio entre las propiedades deseadas, donde el buen comportamiento del pavimento está relacionado con la durabilidad, impermeabilidad, resistencia, estabilidad, rigidez, flexibilidad, resistencia a la fatiga y trabajabilidad. No hay un único contenido de asfalto que logre maximizar las propiedades mencionadas, sino que se selecciona el que cumpla con optimizar las propiedades necesarias en condiciones definidas.

### **2.2 MÉTODO MARSHALL**

El Método Marshall de diseño de mezcla asfáltica, para mezclas densas de MAC, fue desarrollado durante los años 30 por Bruce Marshall en el Estado de Mississippi, en el cual originalmente se utiliza un tamaño máximo de 25 [mm] o inferior, para luego ser modificado por un tamaño máximo hasta de 38 [mm].

Es el método de diseño más utilizado actualmente en el mundo, incluso es el método predominante para pavimentos de aeropuertos hoy en día [1]. Pese a lo anterior, la tendencia está en abandonar el Método Marshall pasando a utilizar métodos que emplean el compactador giratorio.

El método es un ensayo de laboratorio en búsqueda de un diseño de mezcla asfáltica mediante un análisis de estabilidad y cantidad de vacíos de aire. Siendo una de las virtudes del método, la importancia que le da a la cantidad de vacíos de la mezcla, ya que éste análisis asegura que las proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla están dentro de rangos adecuados que aseguran una mezcla asfáltica en caliente durable [2].

## 2.3 MÉTODO SUPERPAVE

### 2.3.1 Introducción

La FHWA (Federal Highway Administration) en el marco del programa Strategic Highway Research Program (SHRP), en 1987 comienza el desarrollo de un estudio, que durante cinco años logra crear un nuevo sistema de especificación de materiales asfálticos en búsqueda de mejorar el rendimiento de los pavimentos MAC y a su vez proporcionar a los ingenieros y contratistas las herramientas que necesitaban para mejorar el rendimiento de los mismos. El resultado fue el sistema Superpave.

Superpave, esencialmente representa un sistema más avanzado de especificación de los materiales componentes, diseño de mezclas asfálticas y su análisis y la predicción de la performance de los pavimentos, incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios [2].

El procedimiento actual del diseño de mezcla bajo metodología Superpave, se resume de la siguiente manera:

1. Selección de materiales, ligante asfáltico y agregados que cumplan con los criterios de diseño;
2. Desarrollo de una mezcla de agregados que cumplan con los requisitos Superpave;
3. Mezclado de ligante asfáltico seleccionado (envejecido a corto plazo) y la mezcla de agregados;
4. Compactar especímenes utilizando compactador giratorio Superpave de acuerdo a los niveles de tráfico esperados;
5. Análisis de las propiedades volumétricas de la mezcla;
6. Selección de la mejor mezcla de agregados y ligante asfáltico que cumpla con los criterios especificados para la mezcla; y
7. Realizar prueba de la Sensibilidad a la humedad de la mezcla diseñada.

### 2.3.2 Ligantes asfálticos

Como se menciona anteriormente, Superpave es un nuevo sistema de especificación de materiales asfálticos, como lo es el ligante asfáltico, incluyendo su nuevo conjunto de ensayos.

La particularidad del nuevo sistema de especificación, es que se basa en el desempeño (performance), especificando el ligante asfáltico según clima de la región geográfica y la temperatura pronosticada para el pavimento, según registros de temperaturas del aire.

El grado de desempeño o performance (PG) de un ligante asfáltico se denota como PG XX-YY, donde XX representa el “grado de alta temperatura”, correspondiente a la alta temperatura del clima en el que el ligante estará en servicio y donde el ligante poseería propiedades físicas adecuadas al menos hasta XX [°C].

Mientras, -YY se refiere al “grado de baja temperatura” y quiere decir que el ligante poseería propiedades físicas apropiadas hasta al menos los -YY [°C]. Otras consideraciones dependen del tiempo de carga y la magnitud de carga.

Las diferentes combinaciones de asfaltos definidos en Superpave según su PG se detallan a en la Tabla 2-1. Para la aplicación del criterio se debe contar con la

información necesaria, como los registros de temperatura ambiente (del aire), con mínimo 20 años de datos de la región, el promedio de las temperaturas de los 7 días consecutivos más calurosos del año y la temperatura mínima del día más frío del año.

Tabla 2-1: Grados de ligante asfáltico Superpave. [3]

Performance Grade	Temperatura Máxima [°C]	Temperatura Mínima [°C]
<b>PG</b>	64	-10,-16,-22,-28,-34,-40
	70	-10,-16,-22,-28,-34,-40
	76	-10,-16,-22,-28,-34
	82	-10,-16,-22,-28,-34

Al incluir cargas a bajas velocidades, cargas de tipo estacionaria o un excesivo tránsito de camiones pesados, se deben emplear en el diseño, los grados de desempeño PG, entre los 76[°C] u 82[°C] como temperatura máxima.

Un aspecto importante dentro del sistema Superpave, es que las propiedades físicas son medidas utilizando ligantes envejecidos en laboratorio, que simulan las condiciones de envejecimiento reales de un pavimento.

Algunas propiedades físicas se miden en ligantes sin envejecer o sobre ligantes envejecidos en el horno de película delgada rotativa RTFO (Rolling Thin Film Oven) simulando el endurecimiento por oxidación provocado en el mezclado en caliente y la colocación, también pueden ser envejecidos en equipo a presión PAV (Pressure Aging Vessel) que simula el envejecimiento severo del ligante después de varios años de servicio en un pavimento.

Como lo especifica Asphalt Institute [2], las propiedades físicas de los ligantes asfálticos son medidas con 4 dispositivos:

- Reómetro de corte dinámico DSR (Dynamic Shear Rheometer).
- Viscosímetro rotacional RV (Rotational Viscometer).
- Reómetro de viga de flexión BBR (Bending Beam Rheometer).
- Ensayo de tracción directa DTT (Direct Tension Test).

El equipo DSR se utiliza para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico de los ligantes asfálticos de medias a altas temperaturas. Por lo que mide el módulo complejo en corte ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ), sometiendo una muestra de ligante a tensiones de corte oscilante, colocando la muestra entre dos platos paralelos. Al calcular  $G^*$  y  $\delta$  midiendo la respuesta de deformación al corte del espécimen, la muestra puede estar desfasada en cierto intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) con relación a la tensión aplicada. El desfase es expresado en medidas angulares, multiplicando  $\Delta t$  por la frecuencia angular ( $\omega$ ), se obtiene el ángulo de fase.

Los materiales viscoelásticos como los ligantes asfálticos presentan un ángulo de fase entre 0 y 90°, según temperatura de ensayo (a altas temperatura se acerca a 90° y a bajas temperaturas a 0°). Mientras que en materiales elásticos, al no haber retraso en la

respuesta de deformación,  $\delta$  es igual a cero y en materiales totalmente viscosos,  $\delta$  es igual a  $90^\circ$ .

El equipo RV se utiliza para determinar la viscosidad del ligante asfáltico a altas temperaturas, por lo general la utilizada durante las fases de fabricación y construcción. Durante el ensayo se usa una temperatura de  $135 [^\circ\text{C}]$ , ya que es la temperatura a la cual se comporta casi completamente como un fluido y con un cilindro rotacional coaxial, se mide la viscosidad mediante el torque requerido para rotar un eje que se encuentra sumergido en la muestra de asfalto. La especificación Superpave recomienda que la viscosidad sea menor a  $3 [\text{Pa}\cdot\text{s}]$ .

El equipo BBR proporciona una medida de las propiedades de rigidez y relajación a baja temperatura de ligantes asfálticos, por lo que da un indicio de la capacidad de un ligante asfáltico para resistir el agrietamiento de baja temperatura. Previamente la muestra de ligante utilizada es envejecida mediante PAV.

BBR mide el stiffness en “creep” ( $S$ ) y el logaritmo de la velocidad de deformación en “creep” ( $m$ ), para esto se mide la respuesta de una probeta de ligante, en forma de una viga pequeña, simplemente apoyada, sumergida en un baño de líquido frío.

Los ligantes con bajo valor de  $S$  no se fisurarán en tiempos fríos y los con altos valores de  $m$  son mejores en la relajación de tensiones mientras la temperatura baja, lo que asegura un mínimo fisuramiento por la disminución de temperatura.

Los resultados de las pruebas de tracción directa (DTT) se utilizan en combinación con el ensayo BBR para determinar el “grado de baja temperatura” PG de un ligante asfáltico. Igual que el BBR, el DTT asegura la máxima resistencia del ligante asfáltico ante la fisuración, dada una baja temperatura.

### **2.3.3 Agregados pétreos**

El diseño de mezcla antes de Superpave no contaba con requisitos detallados para los agregados. Durante el desarrollo de sistema Superpave, los expertos están de acuerdo en que ciertas características de los agregados son esenciales para diseñar una MAC con un buen desempeño. Dichas características son divididas en dos categorías: propiedades de consenso y propiedades de origen.

Las propiedades de consenso especificadas en Superpave son: (1) angularidad del agregado grueso, (2) angularidad del agregado fino, (3) partículas planas y alargadas y (4) contenido de arcilla (Equivalente de arena).

Los criterios para las propiedades antes mencionadas se basan en el nivel de tránsito y de la posición dentro de la estructura del pavimento. Altos niveles de tránsito y materiales cercanos a la superficie del pavimento son sometidos a mayores niveles de estrés, por lo que requieren agregados con valores más estrictos para las propiedades de consenso, que los que se encuentren en la sección inferior del pavimento.

Creando especificaciones para la angularidad de los agregados gruesos y finos, se busca lograr una MAC con un alto ángulo de fricción interna, a su vez una alta resistencia al corte y así una alta resistencia a las deformaciones permanentes (ahuellamiento).

Al limitar las partículas alargadas se certifica que los agregados pétreos estarán menos expuestos a la fractura durante su manipulación, construcción y bajo tránsito. También

limitando el contenido de arcilla, se obtiene una unión fortalecida y mejorada entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo.

Las propiedades de origen son: (1) tenacidad o dureza, (2) durabilidad y (3) materiales deletéreos. Estas propiedades son requisitos específicos según el área local, debido a la variedad de agregados existentes según área geográfica. No se especifican valores críticos para las propiedades de origen ya que son muy específicas según fuente de origen.

El ensayo de Los Ángeles de abrasión es el que mide la propiedad de tenacidad, la durabilidad se mide con el método de los sulfatos para determinar la desintegración, y la presencia de materiales deletéreos se mide con el ensayo de determinación de contenido de partículas desmenuzables.

A comienzos de 1960, la FHWA de hoy presenta un gráfico de gradación, como una herramienta para ser utilizada especialmente en la evaluación de gradaciones de agregados pétreos.

Como se ve en la Figura 2-1, gráficamente la línea de densidad máxima, es una línea recta desde el punto de tamaño máximo de agregado que pasa en un 100% al origen del gráfico.

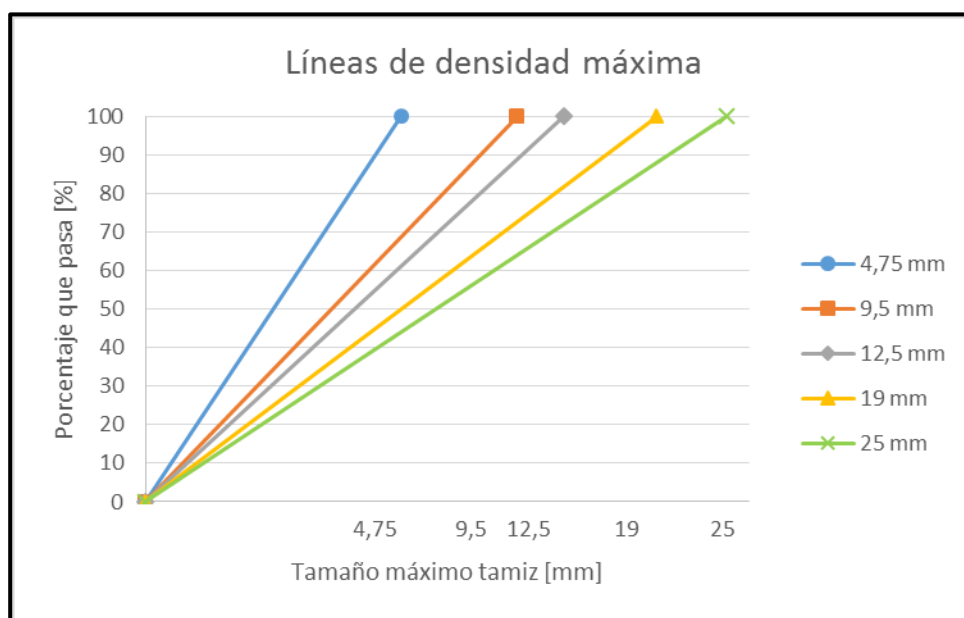


Figura 2-1: Líneas de densidad máxima para diferentes tamaños máximos.

Además, el gráfico de gradación representa el tamaño de abertura del tamiz en milímetros elevado a la potencia 0,45 en su abscisa y el porcentaje de agregado que pasa en la ordenada.

El sistema Superpave utiliza una serie de tamices ASTM y define como tamaño máximo de los agregados (MAS), el tamiz más grande a través del cual pasa el 100% del agregado o como el tamiz mayor que el tamaño máximo nominal del agregado.

El tamaño máximo nominal del agregado (NMAS), se define como el tamaño de tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de la gradación de agregados.

Como parte del proceso de diseño de mezcla, la graduación del agregado se debe trazar en el gráfico de gradación elevado a la potencia 0,45.

Al utilizar la gráfica de gradación se obtienen mezclas de fácil compactación, pero que tienden a ser muy frágiles y a poseer pocos vacíos en el agregado mineral. Producto de lo anterior, se emplean dos conceptos adicionales, Puntos de Control y Zona Restringida.

Los puntos de control definen el tipo de mezcla y actúan como rangos maestros entre los cuales debe pasar las gradaciones de agregado.

Los puntos de control se ubican en el tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2,36 [mm]), y en el tamaño más pequeño (0,075 [mm]).

En cuanto a la Zona Restringida, forma una zona por la que se recomienda que la gradación de agregado no pase. En el año 2004 se decide prescindir de este parámetro, dado que Superpave considera que no es necesaria.

La Figura 2-2 muestra los puntos de control de una mezcla Superpave de 12,5 [mm] de tamaño máximo nominal de agregado y 19,0 [mm] de tamaño máximo de agregado.

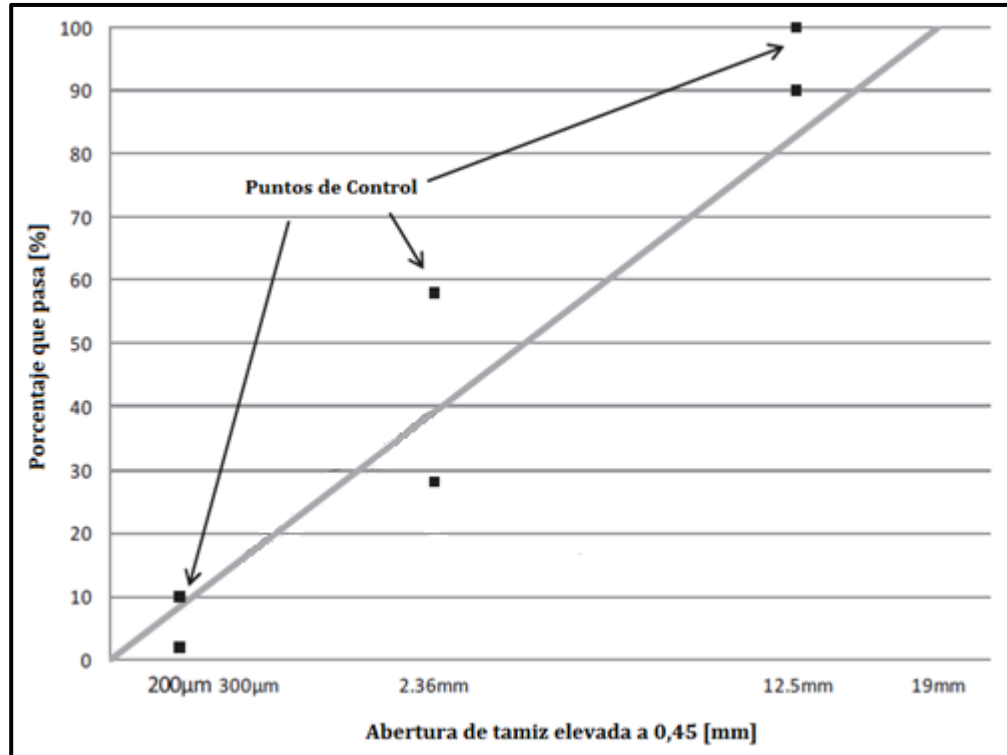


Figura 2-2: Puntos de Control de gradación.

### 2.3.4 Compactación y Ensayos de Performance

Para el sistema Superpave existen dos aspectos importantes como parte del desarrollo de diseño, son la compactación en el laboratorio y los ensayos de performance.

#### 2.3.4.1 Compactador Giratorio Superpave

La compactación en el laboratorio se hace a través de Compactador Giratorio Superpave (Superpave Gyrotory Compactor, SGC), donde su principal función es compactar las probetas de ensayo del diseño, además con los datos entregados por el equipo durante la compactación, el diseñador puede darse una idea de la compactabilidad de la MAC.

Su principales características, es que logra compactar de manera realista los especímenes de mezcla a la densidad alcanzada bajo condiciones de clima y carga de pavimento. Es capaz de compactar mezclas con agregados grandes y brinda una medida de compactabilidad.

El comportamiento de la MAC inmediatamente después de la construcción es afectada por las propiedades de la mezcla resultantes del mezclado en caliente y de la compactación. Por lo tanto, un procedimiento de envejecimiento a corto plazo fue incluido en el sistema Superpave, en la mezcla suelta, antes de ser compactada por el SGC.

El SGC consiste en las siguientes partes, como lo muestra la Figura 2-3:

- Marco de reacción, base y motor de rotación;
- Sistema de carga, un pistón de carga y manómetro;
- Sistema de medición y registro de la altura;
- Molde y plato base; y
- Dispositivo de extrusión espécimen.

El dispositivo de extrusión, corresponde al aparato que ayuda a desmoldar la probeta luego de ser compactada por el SGC.

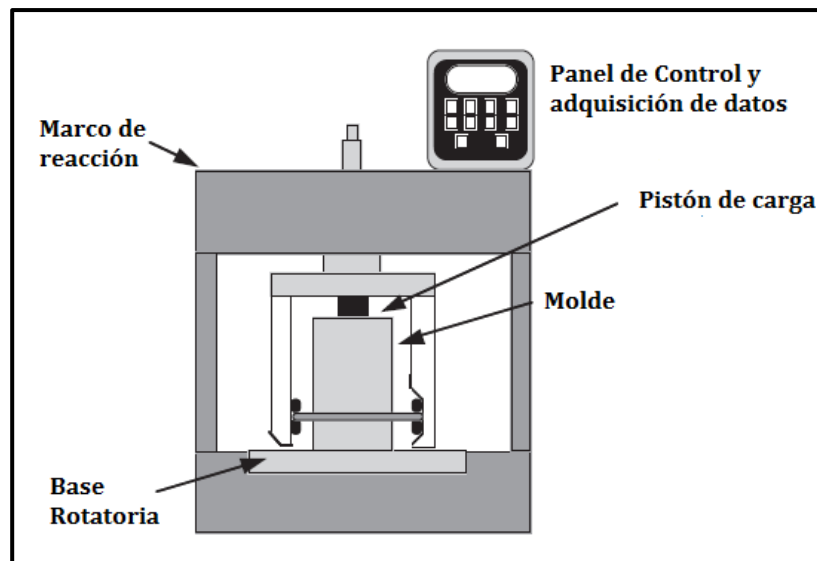


Figura 2-3: Esquema típico de SGC.

Como dice [1], los principales parámetros que rigen el esfuerzo de compactación son:

- Presión vertical, de  $600 \pm 18$  [kPa];
- El ángulo de giro del molde,  $1,16 \pm 0,02$  ° (interno);
- Velocidad de giro,  $30,0 \pm 0,5$  giros por minuto; y
- El número de giros, variable en función del nivel de tráfico previsto.

Lo parámetros quedan graficados en Figura 2-4.

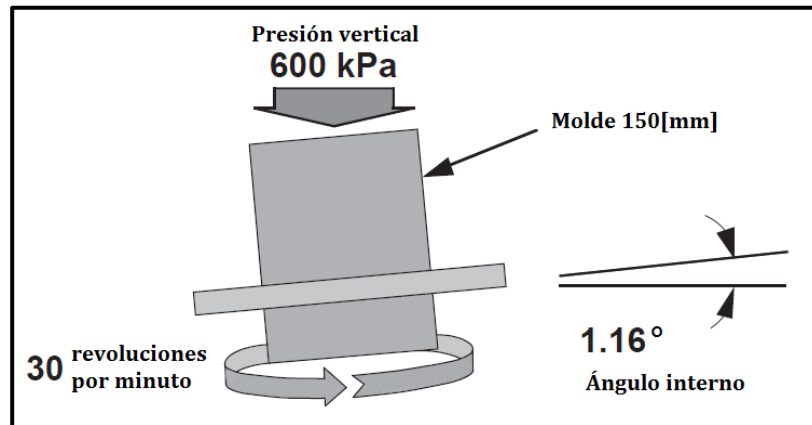


Figura 2-4: Configuración molde SGC.

El compactador giratorio Superpave, presenta dos modos de funcionamiento. Se puede compactar de acuerdo al número seleccionado de rotaciones o hasta llegar a una altura determinada de la muestra.

Los especímenes de prueba son compactados de acuerdo al número seleccionado de rotaciones, lo que se define en función del número de ejes equivalentes (ESALs) del proyecto. En la Tabla 2-2 se presentan los diferentes rangos de valores establecidos para el número de giros.

Tabla 2-2: Parámetros de SGC según esfuerzo.

ESALs (en millones)	Parámetros de compactación		
	N inicial	N diseño	N máximo
< 0,3	6	50	75
0,3 a < 3	7	75	115
3 a < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

El número de giros inicial ( $N_{\text{inicial}}$ ) es una medida de la capacidad de compactación de la mezcla y se basa en la densidad de campo estimada obtenida antes de la compactación.

El número de giros de diseño ( $N_{\text{diseño}}$ ), es el número de giros especificados para alcanzar la densidad deseada de la mezcla y se basa en la densidad de campo estimado en el medio de su vida útil.

El número máximo de giros ( $N_{\text{máximo}}$ ), es una estimación de la densidad final esperada en el campo, al final de su vida útil después de años de aumentar la densificación de tránsito.

Los ESALs de diseño, es el nivel de tránsito esperado para el carril de diseño en un periodo de 20 años.

#### 2.3.4.2 *Ensayos de Performance*

Uno de los desarrollos más importantes a partir del programa SHRP sobre asfaltos, son los ensayos basados en la performance y los modelos de predicción de la performance de las MAC.

Los resultados de los ensayos de performance se utilizan para hacer una predicción detallada del desempeño real de los pavimentos. Los procedimientos de ensayo y los modelos de predicción de la performance fueron desarrollados de manera que permitieran al diseñador estimar la vida de servicio de una futura MAC dependiendo de ejes equivalentes (ESALs) o del tiempo para alcanzar un cierto nivel de ahuellamiento, fisuramiento por fatiga o fisuramiento por baja temperatura.

Dos procedimientos de ensayos basados en la performance son: el Ensayo de Corte Superpave (Superpave Shear Tester, SST) y el Ensayo de Tracción Indirecta (Indirect Tensile Tester, IDT). Los resultados de dichos ensayos son valores de entrada de los modelos de predicción de la performance en Superpave para estimar el desempeño real de los pavimentos.

A partir del SST se pueden realizar varios (6) ensayos sobre las muestras de MAC, los que son realizados a diferentes temperaturas para simular las temperaturas reales del pavimento. Una parte de los ensayos apunta al fisuramiento por fatiga, pero el SST es principalmente una herramienta para evitar deformaciones permanentes.

El IDT es usado para medir el creep compliance y la resistencia a tracción de la MAC. El ensayo utiliza un pistón vertical para cargar la probeta a lo largo de su plano diametral. La caracterización de la MAC por medio del IDT es una herramienta para el diseño contra el fisuramiento por fatiga y por bajas temperaturas.

Superpave logra conectar las propiedades de los materiales con las propiedades de la estructura del pavimento, para predecir la real performance del pavimento. De este modo, las ventajas o desventajas de nuevos materiales, el diseño de una mezcla diferente, asfaltos modificados y otros productos pueden finalmente ser cuantificados en términos de costo versus performance [2].

## 2.4 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS

Se deben tener en cuenta los parámetros y proporciones volumétricas, del ligante asfáltico y de los agregados pétreos, ya que son éstos los que dan indicio de la calidad y comportamiento de la mezcla asfáltica.

El análisis volumétrico de una MAC juega un rol importante en el procedimiento de diseño de mezclas asfálticas compactadas bajo metodología Superpave. Las propiedades volumétricas se determinan usando la masa y/o mediciones de volumen de la mezcla y sus componentes, como ligante asfáltico, agregados pétreos y aire.

### **Gravedad Específica**

La gravedad específica se define como la relación de la densidad de una sustancia con la densidad de otra que se toma como referencia, generalmente la densidad del agua. Ambas densidades se expresan en la misma unidad y en iguales condiciones de temperatura y presión. El resultado es un número adimensional.

## 2.4.1 Gravedad Específica de Agregados

### 2.4.1.1 Gravedad Específica Bruta ( $G_{sb}$ )

Relación de la masa seca de una unidad de volumen de agregado (incluyendo vacíos permeables e impermeables al agua), con respecto a una masa del mismo 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 se indica en Ecuación 2-1.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 \dots + P_n}{\left(\frac{P_1}{G_1}\right) + \left(\frac{P_2}{G_2}\right) + \dots + \left(\frac{P_n}{G_n}\right)}$$

Ecuación 2-1: Gravedad específica bruta.

Donde:

- $G_{sb}$  : Gravedad específica bruta total.
- $P_1, P_2, P_n$  : Porcentajes individuales por masa de agregado [%].
- $G_1, G_2, G_n$ : Gravedad específica neta individual.

### 2.4.1.2 Gravedad Específica Aparente ( $G_{sa}$ )

Relación de la masa seca de una unidad de volumen (incluyendo sólo los volúmenes de vacíos impermeables), con respecto a una masa del mismo volumen de agua; ambos a la misma temperatura indicada. Con fracciones separadas de agregado grueso, fino y filler, con diferentes gravedades específicas, la gravedad específica aparente se calcula como se indica en Ecuación 2-2.

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 \dots + P_n}{\left(\frac{P_1}{G_1}\right) + \left(\frac{P_2}{G_2}\right) + \dots + \left(\frac{P_n}{G_n}\right)}$$

Ecuación 2-2: Gravedad específica aparente.

Donde:

- $G_{sa}$  : Gravedad específica aparente total.
- $P_1, P_2, P_n$ : Porcentajes individuales por masa de agregado [%].
- $G_1, G_2, G_n$ : Gravedad específica neta individual.

### 2.4.1.3 Gravedad Específica Efectiva ( $G_{se}$ )

Relación de la masa seca de una unidad de volumen agregado (incluyendo los volúmenes de vacíos impermeables y vacíos permeables al agua no llenos de asfalto absorbido), con respecto a una masa del mismo volumen de agua, a una temperatura indicada. Se calcula como se indica en Ecuación 2-3.

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

Ecuación 2-3: Gravedad específica efectiva.

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 [%].

El valor de la gravedad específica efectiva de un agregado, debe estar entre su gravedad específica bruta y su gravedad específica aparente, de lo contrario, se debe asumir que el valor es incorrecto, y se debe volver a determinar la gravedad específica máxima teórica.

$G_{sb}$ ,  $G_{sa}$  y  $G_{se}$  utilizan la misma masa, pero con diferentes volúmenes. Dado que los volúmenes sólo pueden ser los mismos si hay absorción agregada cero, la siguiente desigualdad existe siempre:

$$G_{sa} \geq G_{se} \geq G_{sb}$$

La gravedad específica efectiva queda graficada en la Figura 2-5.

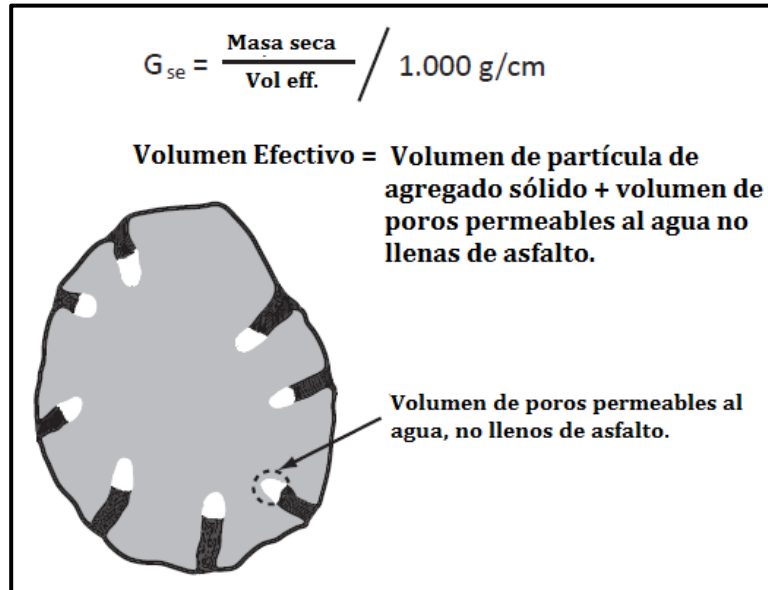


Figura 2-5: Volumen efectivo de agregado.

## 2.4.2 Gravedad Específica del Ligante

### 2.4.2.1 Gravedad Específica de 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.

### 2.4.3 Gravedad Específica de Mezcla

#### 2.4.3.1 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 se indica en Ecuación 2-4.

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

Ecuación 2-4: 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.

#### 2.4.3.2 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.

### 2.4.4 Parámetros Volumétricos de la Mezcla

#### 2.4.4.1 Porcentaje de Vacíos de aire ( $V_a$ )

Los vacíos de aire en una mezcla asfáltica compactada expresada en porcentaje, consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas del agregado. Se refieren a este porcentaje en el término  $V_a$  porque es un porcentaje en volumen en vez de un porcentaje de la masa. Los  $V_a$  en una mezcla compactada, se calcula como se indica en Ecuación 2-5.

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

Ecuación 2-5: 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.

En la Figura 2-6, se presentan de manera gráfica los parámetros de Diseño volumétrico.

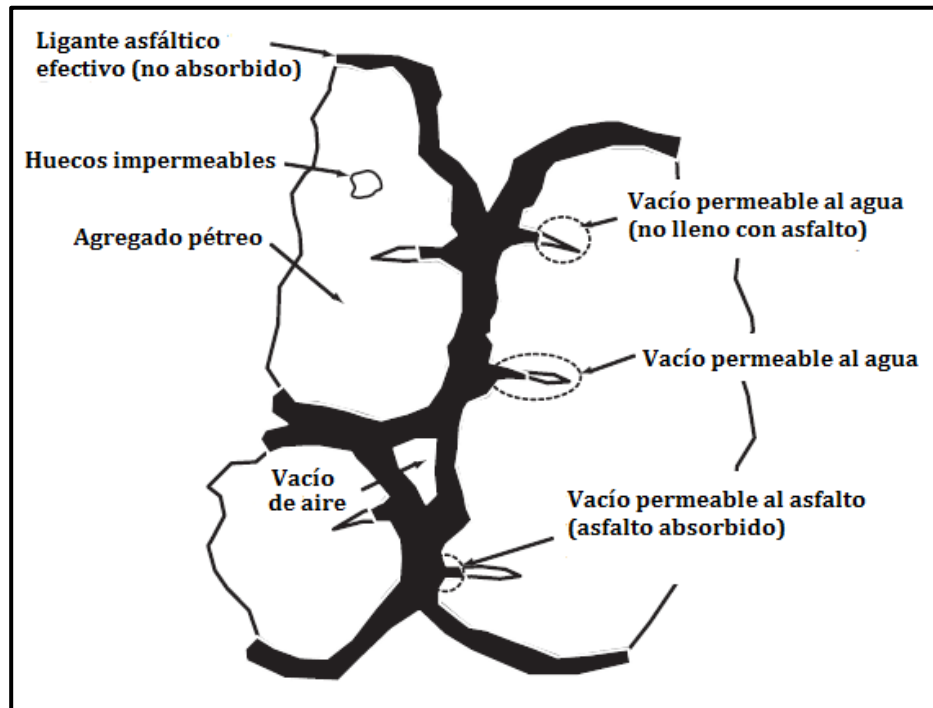


Figura 2-6: Representación vista microscópica de agregado, asfalto y vacíos de una mezcla [1].

#### 2.4.4.2 Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)

Los vacíos creados por la estructura de agregados de una mezcla asfáltica compactada, se expresa como porcentaje del volumen total de la mezcla. VAM representa el volumen de vacíos de aire y ligante de asfalto efectivo (no incluye asfalto absorbido). Se calcula como se indica en Ecuación 2-6.

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

Ecuación 2-6: 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 [%].

#### 2.4.4.3 Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Se refiere al porcentaje de los vacíos en el agregado mineral llenos de ligante asfáltico efectivo (no incluye asfalto absorbido). Se calcula como se indica en Ecuación 2-7.

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

Ecuación 2-7: Vacíos llenos de asfalto.

Donde:

VFA : Vacíos llenos con asfalto, porcentaje de VAM.

VAM: Vacíos en el agregado mineral.

V<sub>a</sub> : Vacíos de aire en la mezcla.

#### 2.4.4.4 Porcentaje de agregado (P<sub>s</sub>)

Porcentaje total de agregado en la mezcla asfáltica, expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla.

#### 2.4.4.5 Porcentaje de ligante asfáltico (P<sub>b</sub>)

Porcentaje total de ligante en la mezcla asfáltica, expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla. Considerando P<sub>s</sub> + P<sub>b</sub> = 100%.

#### 2.4.4.6 Absorción del asfalto (P<sub>ba</sub>)

Porción del aglutinante de asfalto que se absorbe en el agregado, expresado como un porcentaje de la masa acumulada total. Se calcula como se indica en Ecuación 2-8.

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

Ecuación 2-8: Absorción del asfalto.

Donde:

P<sub>ba</sub> : Asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.

G<sub>se</sub>: Gravedad específica efectiva del agregado.

G<sub>sb</sub>: Gravedad específica bruta del agregado.

G<sub>b</sub> : Gravedad específica del asfalto.

#### 2.4.4.7 Contenido de asfalto efectivo (P<sub>be</sub>)

Porción funcional del ligante de asfalto que recubre el agregado en la mezcla de asfalto, pero no se absorbe en el agregado, queda expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla. Se calcula como:

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

Ecuación 2-9: Contenido de asfalto efectivo.

Donde:

P<sub>be</sub> : Contenido de asfalto efectivo [%].

P<sub>b</sub> : Contenido de asfalto [%].

P<sub>ba</sub> : Asfalto absorbido.

P<sub>s</sub> : Contenido de agregado.

### 2.4.5 Diagrama de componentes de MAC compactada

El diagrama de componentes graficado en la Figura 2-7, es un modelo usado para representar una mezcla compactada en términos de las diferentes masas y volúmenes

utilizados en los cálculos volumétricos. El diagrama considera vacíos de aire, ligante asfáltico y agregado pétreo.

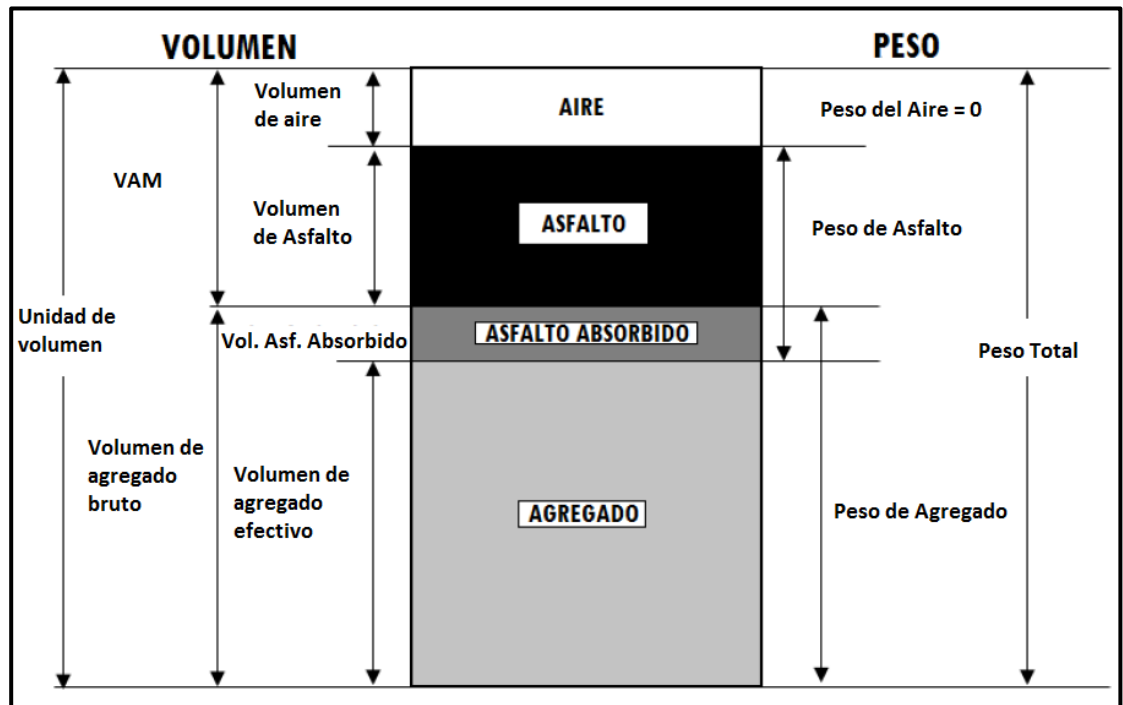


Figura 2-7: Diagrama de componentes de una MAC [4].

El diagrama, brinda una clara definición de peso específico, que 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 peso específico bruto, que se calcula dividiendo el total de la muestra por su volumen total. También grafica definiciones, tales como: contenido de asfalto, asfalto efectivo, asfalto absorbido,  $V_a$  y  $V_A$ . Sin mostrar el VFA.

## 2.5 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Las muestras, se someten a deformación en su rango lineal bajo cargas repetidas o cargas con velocidad de deformación controlada. Se miden las amplitudes de la tensión y de la deformación, junto con el desfase entre tensión y deformación.

El estado de tensiones provocado por una carga simple sobre la estructura de un pavimento, como se observa en la Figura 2-8, se pueden diferenciar cuatro casos [5].

- Caso 1: Compresión triaxial en la superficie inmediatamente bajo la carga.
- Caso 2: Compresión vertical junto con tracción longitudinal y transversal en la capa inferior del pavimento.
- Caso 3: Tracción lateral en la superficie, a una cierta distancia de la carga.
- Caso 4: Compresión lateral en el fondo de la capa de pavimento, a una cierta distancia de la carga.

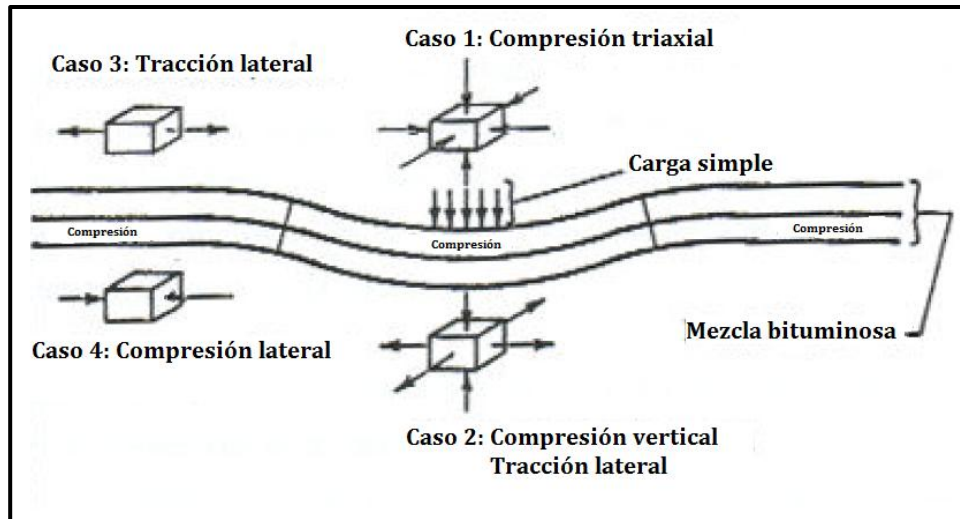


Figura 2-8: Estado de tensiones en pavimento bajo una carga simple.

Existen ensayos que representan cada uno de los casos de estados tensionales, pero no hay uno que los represente todos a la vez.

El ensayo de tracción indirecta, representa el estado de tensiones en la parte inferior de la capa asfáltica o zona de tracción (Caso 2). La metodología del ensayo es práctico y sencillo, caracteriza las propiedades de las mezclas bituminosas o evalúa la falla provocada por tensiones de tracción.

El método consiste en aplicar una carga a lo largo del diámetro vertical de la probeta, a una probeta cilíndrica de diámetro nominal de 80 [mm], 100 [mm], 120 [mm], 150 [mm] o 200 [mm] con un espesor entre 30 [mm] a 75 [mm], extraída de un pavimento o fabricadas en laboratorio. Esta carga se aplica en dos generatrices opuestas, dos diámetros trazados a 90°. Se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta.

La carga de compresión provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, como queda representado en la Figura 2-9.

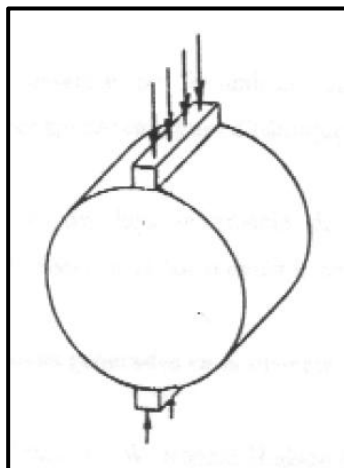


Figura 2-9: Configuración de carga de ensayo de tracción indirecta [5].

### 2.5.1 Temperatura de Ensayo.

Se recomienda que para que los resultados del ensayo Tracción Indirecta sean válidos; la temperatura varíe entre 10 [°C] y 25 [°C]; esto se debe a que en este rango el valor de la resistencia tiene una variación lineal, predominando un comportamiento elástico. Con temperatura mayor a 30 [°C] se obtiene una mayor dispersión en los resultados, adquiriendo una tendencia parabólica de comportamiento viscoso.

### 2.5.2 Velocidad de Carga de Ensayo.

En comparaciones entre ensayos de Compresión Axial y Tracción Indirecta no se han encontrado diferencias para cargas de corta duración, mientras que para ensayos de aplicación de cargas largas, las diferencias son significativas. Considerando lo anterior y que las cargas de corta duración representan el paso de ruedas, es posible utilizar el ensayo de Tracción Indirecta para estudiar el efecto del tránsito.

### 2.5.3 Temperatura de Compactación.

La temperatura de compactación tiene un efecto significativo en la resistencia a la Tracción Indirecta. Estudios, demostraron la importante reducción de resistencia a la tracción indirecta, al disminuir la temperatura de compactación cuando se ha elaborado la mezcla con el contenido óptimo de ligante [5].

## 2.6 VALOR ABSOLUTO DEL MÓDULO COMPLEJO

El Módulo de Rigidez y Módulo Dinámico, se definen como el valor absoluto del Módulo complejo, que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal.

Los valores del módulo pueden emplearse tanto para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento, como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico.

El método de ensayo que permite su determinación, como ASSHTO T 342-11 (Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)) cubre procedimientos para preparar y ensayar mezclas asfálticas para determinar los valores del módulo dinámico. Igualmente estos procedimientos y metodología se pueden realizar bajo la norma UNE-EN 12697-26, ANEXO C (Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 26: Rigidez) para determinar el Módulo de Rigidez.

El módulo complejo, correspondiente a la Ecuación 2-10, es la relación entre el esfuerzo y la deformación para un material visco-elástico lineal sometido a una carga de onda sinusoidal, en un tiempo  $t$ ;

Que cuando se aplica un esfuerzo ( $\sigma$ ) se indica en la Ecuación 2-10.

$$\sigma = \sigma_0 * \text{sen}(\omega * t)$$

*Ecuación 2-10: Esfuerzo aplicado.*

Donde:

$\sigma_0$ : Amplitud del esfuerzo.

$\omega$ : Velocidad angular.

Con una velocidad angular igual a  $\omega = 2 * \pi * f$ .

El esfuerzo aplicado da lugar a una deformación ( $\varepsilon$ ) según Ecuación 2-11.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \text{sen}(\omega * (t - \Phi))$$

Ecuación 2-11: Deformación resultante.

Donde:

$\varepsilon_0$ : Amplitud de la deformación.

$\Phi$ : Ángulo de desfase.

Luego, la relación entre esfuerzo y deformación define el módulo complejo como se indica en Ecuación 2-12.

$$\mathbf{E}^* = |E^*| * (\cos(\Phi) + i * \text{sen}(\Phi))$$

Ecuación 2-12: Módulo Complejo.

El Módulo complejo, se puede expresar de dos maneras, mediante sus componentes, su componente real  $E_1$  y una imaginaria  $E_2$ , como se indica en Ecuación 2-13.

$$\mathbf{E}_1 = |E^*| * \cos(\Phi)$$

$$\mathbf{E}_2 = |E^*| * \text{sen}(\Phi)$$

Ecuación 2-13: Ecuaciones de componentes de Módulo complejo.

O mediante el valor absoluto del Módulo complejo  $|E^*|$  y ángulo de desfase  $\Phi$ , como se indica en Ecuación 2-14.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

Ecuación 2-14:  $|E^*|$  y ángulo de fase.

Para materiales visco-elásticos como mezclas asfálticas, el ángulo de fase se encuentra entre los cero y noventa grados ( $0^\circ < \Phi < 90^\circ$ ), mientras que para un material totalmente elástico el ángulo es igual a cero  $\Phi = 0^\circ$  y para un material viscoso puro, el ángulo de desfase es de noventa grados  $\Phi = 90^\circ$ . La Figura 2-10, muestra la respuesta de un material visco-elástico, según formulas vistas.

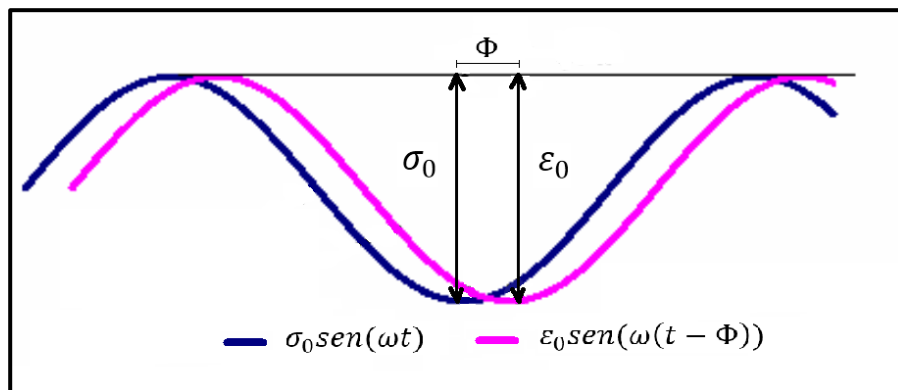


Figura 2-10: Esfuerzo y deformación de material visco-elástico [6].

El Módulo Secante, correspondiente a la Ecuación 2-15, es la relación entre el esfuerzo y la deformación en el tiempo  $t$  de carga, para un material sometido a una carga con una velocidad de deformación controlada.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)}$$

*Ecuación 2-15: Módulo Secante.*

Mediante estudios, se ha demostrado que a bajas temperaturas, es decir dentro del rango elástico, el Módulo Complejo es igual al Módulo de Rigidez.

El módulo dinámico en compresión de la mezcla, es similar en principio al módulo complejo cortante de ligantes asfálticos ( $G^*$ ). Ambos módulos están teóricamente relacionados por medio de la Ecuación 2-16.

$$E^* = 2 * (1 + \mu) * G^* \quad (\text{Módulo de Poisson})$$

*Ecuación 2-16: Relación entre  $E^*$  y  $G^*$ .*

### 2.6.1 Módulo de Rigidez

El valor de Módulo de Rigidez (UNE-EN 12697 ANEXO C), puede ser determinado experimentalmente para las mezclas asfálticas empleadas en pavimentos y caracterizar las mismas en función de la rigidez, siendo una guía del comportamiento relativo en el pavimento. Lo que significa que el valor del Módulo es calculado automáticamente por el equipo en el cual se realiza el Ensayo de Tracción Indirecta.

En el laboratorio se aplica un pulso de carga sobre el manto lateral de una probeta cilíndrica, y se mide la deformación axial que ésta sufre en cada ciclo de carga. El actuador de carga debe aplicar impulsos de carga repetidos que se alternen con periodos de descanso. La carga debe tener la forma de onda de medio seno o parecida. La forma de impulso de carga se muestra en la Figura 2-11.

El pulso de carga está pensado para replicar lo que ocurre en el pavimento mientras, una rueda de camión se encuentra a una distancia considerable de un punto en el pavimento, la tensión en ese punto es cero; cuando la rueda está exactamente en el punto considerado, la tensión es máxima. El tiempo de duración del pulso de carga depende de la velocidad del camión y de la profundidad bajo la superficie del pavimento.

El valor de carga máxima se debe ajustar para alcanzar una deformación horizontal transitoria máxima del 0,005% del diámetro de la probeta.

El periodo de repetición del pulso aplicado deberá ser de  $3 \pm 0,1$  [s], equivalente a una frecuencia de 0,33 [Hz].

El periodo ascendente recomendado es de  $124 \pm 4$  [ms], pero se pueden utilizar otros periodos. El factor de superficie de carga es la relación entre la superficie sombreada de la Figura 2-11 y el producto del tiempo de subida por la carga máxima. El factor de superficie recomendado es 0,6 y cuando este se desvía, el Módulo de rigidez medido debe ser corregido [7].

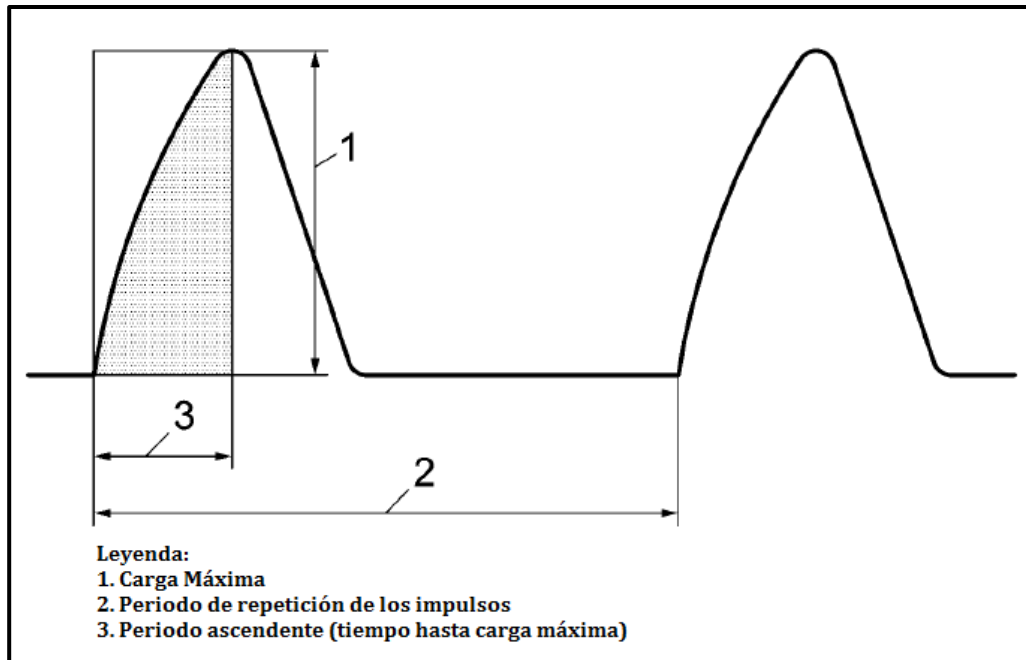


Figura 2-11: Forma de impulso de carga, con periodo ascendente y carga máxima [7].

### 2.6.2 Módulo Dinámico

La propiedad más importante de una mezcla asfáltica en caliente, que influye en la respuesta estructural de un pavimento asfáltico, es el módulo de una MAC.

Durante el proyecto de la nueva guía de diseño (Design Guide for New & Rehabilitated Pavements), el Módulo Dinámico fue elegido como el parámetro requerido para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en pavimentos de MAC [8].

La naturaleza visco-elástica de una mezcla asfáltica puede ser caracterizada en parte por su MD (módulo dinámico). El MD es una medida de la resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación bajo una carga sinusoidal, el cual se determina a partir del máximo esfuerzo aplicado y la máxima deformación axial recuperable, en el rango viscoelástico lineal (hasta 150 microstrain).

La temperatura y velocidad de cargan influyen significativamente en el Módulo Dinámico, para una dada MAC.

El procedimiento de la Guía de diseño Empírico Mecanicista de Pavimento AASHTO (MEPDG) ayuda a predecir el comportamiento futuro del pavimento sometido a esfuerzos y deformaciones, mediante los parámetros de la curva maestra del módulo dinámico para el diseño de la estructura del pavimento. Ya que la curva considera la variación de temperatura y carga que se puede producir, da como resultado una mejor predicción del envejecimiento de la mezcla asfáltica.

La curva maestra se construye utilizando el principio de superposición tiempo-temperatura, lo que quiere decir que un material visco-elástico puede tener la misma rigidez, o sea, el mismo MD ante distintas combinaciones de temperatura de ensayo y tiempo de carga. Puede tener, mismo MD en distintos tiempos, con medición de flujo a distintas temperaturas. El principio es aplicable a materiales termoreológicamente

simples (TRS), es decir que: 1) el material no sufre cambios químicos o físicos por el cambio de temperatura; 2) no hay una fase de transición como resultados del cambio de temperatura; 3) no hay heterogeneidad en la muestra; y 4) se aplica solamente para el rango visco-elástico [9].

Al ensayar el Módulo Dinámico, estudiar los resultados obtenidos y generar la curva maestra, se pueden concluir y obtener relaciones entre el valor del Módulo Dinámico y diferentes parámetros, como: frecuencia de carga, temperatura, envejecimiento, humedad, rigidez del ligante, contenido de ligante asfáltico y porcentaje de vacíos de aire.

### 3 TRABAJO EN LABORATORIO

El trabajo realizado en laboratorio LEMCO, contempla el diseño volumétrico de una MAC, que cumpla con criterios Superpave en conjunto con “Especificaciones técnicas especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por Superpave” (ETE N°1A), la labor se desarrolla en equipo, junto a los memoristas: Nicolás Escobar, Camila Loyola y Andrés Vásquez.

Y de manera individual, se desarrollan los ensayos de Módulo de Rigidez -a través de ensayo de Tracción Indirecta- y ensayo de Módulo Dinámico.

El proceso lógico del desarrollo de diseño, consta de los siguientes pasos:

1. Selección de los Materiales (Ligante Asfáltico y agregados pétreos).
2. Selección de la Estructura del Agregado de Diseño.
3. Selección del Contenido de Ligante Asfáltico de Diseño.
4. Evaluación de la Sensibilidad a la humedad de la Mezcla Asfáltica.

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

#### 3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

##### 3.1.1 Selección de Ligante asfáltico

Parte importante de la metodología Superpave, son las especificaciones que brinda para la selección de ligante, el cual debe seleccionarse de acuerdo a su grado de performance (PG), grado que está asociado a las altas y bajas temperaturas.

Según el proyecto y sus exigencias, el ligante asfáltico debe ser modificado y con un grado PG de al menos un valor PG 76-22. El grado obtenido en el ligante que se utilizará en el diseño es de valor PG 82-22.

Superpave, en sus especificaciones sobre ligante, se enfoca en simular por medio de ensayos de laboratorio los estados críticos a los cuales se ve expuesto el asfalto durante su vida útil [10]:

- Primer estado: asfalto original, estado que se da durante el transporte, almacenamiento y manejo del ligante asfáltico.
- Segundo estado: envejecimiento producido durante el mezclado y colocación de la mezcla asfáltica. Estado simulado a través del ensayo en Horno de película delgada rotativa RTFO.
- Tercer estado: envejecimiento severo de la mezcla asfáltica cuando ha permanecido en servicio por un largo período. Estado simulado a través de ensayo en equipo a presión PAV.

Las propiedades físicas del asfalto empleado, son medidas sobre asfaltos envejecidos en el laboratorio, simulando las condiciones reales que el pavimento experimenta en su etapa operativa. Dichas propiedades son medidas mediante la utilización de los siguientes equipos utilizados en el diseño, cuyo objetivo se detalla en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Equipos para determinar Propiedades físicas del asfalto [10].

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

Existe una amplia variedad de equipos y pruebas para evaluar a los ligantes asfálticos, para este diseño de mezcla, se utilizan pruebas como: punto de inflamación, RV a 135°C, DSR, pérdida de masa y BBR, pruebas aplicadas sobre el ligante modificado. Los resultados obtenidos y los criterios respectivos se aprecian en la Tabla 3-2:

Tabla 3-2: Resultados de ensayos exigidos sobre ligante y su criterio de aceptabilidad.

Ensayo Propiedad	Resultados de Ensayo	Criterio
<b>Ligante Original</b>		
Punto de Inflamación	306	235 [°C] mínimo
Viscosidad Rotacional 135°C	2,23	3 [Pa*s] máximo
Reómetro Dinámico de Corte G*/Senα @82°C	1,14	1,00 [kPa] mínimo
<b>Ligante Envejecido - HPDR</b>		
Pérdida de Masa	0,06	1,00% máximo
Reómetro Dinámico de Corte G*/Senα @82°C	2,6	2,20 [kPa] mínimo
<b>Ligante Envejecido - PAV</b>		
Reómetro Dinámico de Corte G*/Senα @34°C	4095	5000 [kPa] máximo
Reómetro de Flexión Stiffness @-12°C	28,95	300 [MPa] máximo
Reómetro de Flexión Valor m @-12°C	0,392	0,300 mínimo
<b>Grado de Desempeño PG</b>	<b>82-22</b>	
<b>Temperatura de Mezclado</b>	<b>174 ± 5°C</b>	
<b>Temperatura de Compactación</b>	<b>157 ± 10°C</b>	

Como se observa en la tabla, los resultados obtenidos para cada ensayo, cumplen con los criterios de aceptabilidad exigidos por Superpave en conjunto con ETE N°1A, por lo tanto se cumple que el ligante utilizado con PG 82-22, cumple con las especificaciones. La temperatura de mezclado obtenida es de 174±5 [°C] y con una temperatura de compactación de 157±10 [°C], dato proporcionado por la empresa productora del asfalto.

### 3.1.2 Selección de Agregado

Los agregados utilizados en el diseño de la MAC, corresponden a tres pilas de acopio, 2 de material grueso (3/4" y 1/2") y 1 de material fino (Polvo de roca 3/8").

#### 3.1.2.1 Análisis Granulométrico

Se deben determinar las fracciones granulométricas del agregado, los resultados obtenidos, son utilizados para corroborar que el material cumpla con una correcta distribución de sus partículas y cumpla con lo exigido.

El análisis granulométrico de Agregado Grueso (sección 8.202.3) y Fino (sección 8.202.4), se realiza según Manual de Carreteras. [11].

Los resultados de análisis granulométrico, de las 3 pilas de acopio se presentan en la Tabla 3-3 y en la Figura 3-1.

Tabla 3-3: Granulometría de los agregados.

Granulometría					
Porcentaje que pasa (%)					
Tamiz			Grava 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca 3/8"
[mm]	[mm] elevado a 0,45	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	3/4"	100	100	100
12,5	3,12	1/2"	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

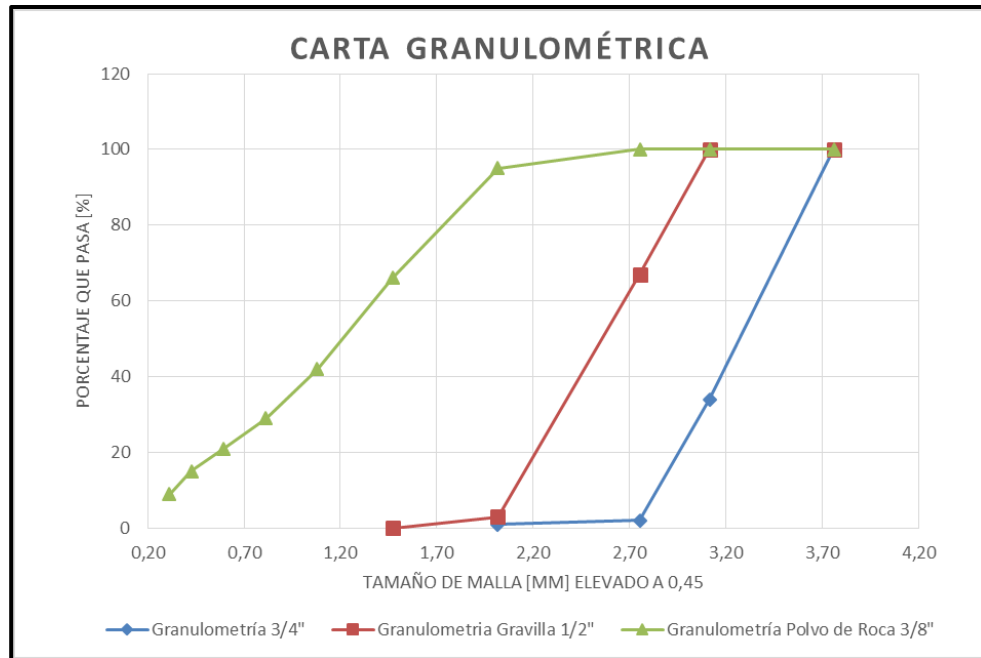


Figura 3-1: Gráfico de granulometría de los agregados

Previo a seleccionar una mezcla, se deben obtener los valores de características como Gravedad específica bruta o Densidad real seca ( $G_{sb}$ ) y Gravedad específica aparente o Densidad real neta ( $G_{sa}$ ), realizados según procedimiento descrito en sección 8.202.20 y 8.202.21 de Manual de Carreteras, respectivamente. También índices como, Absorción de agua, sales solubles e Índice de Plasticidad.

Los resultados de dichas características, de las pilas según tamaño de agregado, se muestran en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Características del agregado por cada pila.

Características	3/4"	1/2"	Polvo de roca	Requerimiento Superpave
Densidad real seca ( $G_{sb}$ ) [ $Kg/m^3$ ]	2688	2684	2655	-
Densidad real neta ( $G_{sa}$ ) [ $Kg/m^3$ ]	2774	2780	2779	
Absorción de agua [%]	1,2	1,3	1,7	
Sales solubles [%]	No se detectan	No se detectan	No se detectan	Informar
Índice de plasticidad [%]	-	-	No plástico	N.P (no plástico)

### 3.1.2.2 Propiedades de Consenso y Propiedades de Origen

Las **propiedades de Consenso** son consideradas críticas para lograr un alto comportamiento de la mezcla, estas propiedades están ligadas a la calidad del agregado para producir una mezcla durable y resistente.

Las propiedades de consenso con sus respectivas normativas son las siguientes, mostradas en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Propiedades de Consenso y sus normas.

Propiedad de Consenso	Norma utilizada
Angularidad del Agregado Grueso	ASTM D5821-01 y M.C 8.202.6 [12] [13]
Angularidad del Agregado Fino	AASHTO T-304 [14]
Partículas Planas y Alargadas	ASTM D 4791-99 [15]
Contenido de Arcilla (Equivalente de Arena)	AASHTO T-176 y M.C 8.202.9 [16] y [17]

Cada agregado debe ser analizado de manera individual para verificar el cumplimiento de los requisitos que establece Superpave. Luego, estos valores son ponderados para obtener las propiedades de la mezcla en las cuales intervendrán. Por lo que, aun cuando algunos materiales no cumplan los criterios de forma individual, pueden ser usados si la mezcla de agregados en la que intervienen, satisfacen los criterios del diseño Superpave.

Los resultados de las propiedades de Consenso estudiadas para cada pila, se presentan en la Tabla 3-6, en ella se observa que todas las propiedades cumplen con los requerimientos Superpave.

Tabla 3-6: Resultados de Propiedades de Consenso.

Propiedades de Consenso	3/4"	1/2"	Polvo de roca	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 Planas 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 [%].				

Las **propiedades de Origen** son aquellas propiedades asociadas a la calidad de la fuente del agregado. Sin embargo, el programa SHRP no desarrolló una especificación de valores críticos de aceptabilidad para estas propiedades, ya que dichos valores son específicos de cada fuente de origen.

Las propiedades de origen con sus respectivas normativas son las siguientes, mostradas en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7: Propiedades de Origen y sus normas.

Propiedad de Origen	Norma utilizada
Tenacidad o dureza	AASHTO T-96 y M.C 8.202.11 [18] [19]
Durabilidad	AASHTO T-104 y M.C 8.202.17 [20] [21]
Materiales deletéreos	ASTM D 4791-99 y M.C 8.202.16 [15] [22]

Los resultados de las propiedades de Origen estudiadas para cada pila, se presentan en la Tabla 3-8, en ella se observa que todas las propiedades cumplen con los requerimientos exigidos por el proyecto especificado en las ETE N°1A.

Tabla 3-8: Resultados de Propiedades de Origen.

Propiedades de Origen	3/4"	1/2"	Polvo de roca	Requerimiento ETE N°1A
<b>Tenacidad [%]</b>	12	15	16	25% máximo
<b>Durabilidad [%]</b>				
Desintegración por sulfato de Sodio	1,0	1,0	0,7	10% máximo
Desintegración por sulfato de Magnesio	1,2	1,2	0,9	13% máximo
<b>Materiales deletéreos [%]</b>	0,03	0,13	0	5% máximo

### 3.1.3 Selección de la Estructura del Agregado de mezclas de prueba

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 materiales. Esta selección se describe como un proceso de prueba y error, ya que consiste en encontrar una dosificación (diferentes porcentajes de cada uno de los materiales) que satisfaga los requerimientos de la especificación Superpave para los tamices correspondientes. Para llevar a cabo este proceso de selección, tres mezclas de prueba son normalmente empleadas, las cuales se consideran aceptables si poseen adecuadas propiedades volumétricas, en función de un determinado contenido de ligante asfáltico inicial [4].

Una vez realizada esta etapa, se evalúa la mejor mezcla de prueba que cumpla con los requerimientos establecidos, donde dicha mezcla pasa a ser la estructura del agregado de diseño. Las mezclas de prueba utilizadas son 3, ya que es número estándar considerado para el diseño.

La mezcla de prueba debe pasar entre los puntos de control y los rangos de la banda granulométrica especificada por proyecto. Donde los puntos de control (máximos y mínimos para cada NMA) aseguran una buena gradación del agregado, evitando la segregación.

Los puntos de control existentes en Superpave, según el tamaño máximo nominal (NMAS) se detallan en la Tabla 3-9, en la cual se puede identificar los requerimientos que se deben cumplir para efectos de la presente Memoria, con un NMAS de 19 [mm].

Tabla 3-9: Requerimientos de gradación Superpave. [1]

NMAS	37,5 [mm]		25 [mm]		19 [mm]		12,5 [mm]		9,5 [mm]		4,75 [mm]	
	Mín. %P	Máx. %P	Mín. %P	Máx. %P	Mín. %P	Máx. %P	Mín. %P	Máx. %P	Mín. %P	Máx. %P	Mín. %P	Máx. %P
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
0,600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10	6	13

%P: porcentaje que pasa.

La banda granulométrica especificada para el proyecto corresponde a la Tabla 3-10.

Tabla 3-10: Banda granulométrica especificada.

Tamiz			Banda especificada	
[mm]	[mm] elevado a 0,45	ASTM	Porcentaje que pasa [%]	
25	4,26	1"	100	100
19	3,76	3/4"	100	100
12,5	3,12	1/2"	79	99
9,5	2,75	3/8"	68	88
4,75	2,02	N°4	48	68
2,36	1,47	N°8	33	53
1,18	1,08	N°16	20	40
0,600	0,81	N°30	14	30
0,300	0,59	N°50	9	21
0,150	0,43	N°100	6	16
0,075	0,31	N°200	3	6

### 3.1.3.1 Selección granulométrica de las mezclas de prueba.

Se busca encontrar una dosificación que cumpla con requerimientos establecidos previamente, mediante combinaciones matemáticas de las granulometrías individuales. Por lo que se debe comparar las mezclas de prueba con los requerimientos de puntos de control y con la banda especificada, verificando que las mezclas queden dentro de los rangos.

A modo resumen, se presentan los datos de las 3 mezclas de prueba en la Tabla 3-11, donde se puede apreciar que las 3 mezclas cumplen con los requerimientos. Gráficamente se pueden apreciar los resultados en la Figura 3-2.

Tabla 3-11: Resumen granulometría mezclas de prueba.

Tamiz			Mezcla de Prueba 1	Mezcla de Prueba 2	Mezcla de Prueba 3	Puntos de Control	Banda Especificada
[mm]	[mm] elevado a 0,45	ASTM					
25	4,26	1"	100	100	100	100	100
19	3,76	3/4"	100	100	100	90 - 100	100
12,5	3,12	1/2"	87	89	85	-90	79 - 99
9,5	2,75	3/8"	74	75	70	-	68 - 88
4,75	2,02	N°4	56	53	50	-	48 - 68
2,36	1,47	N°8	38	36	34	23 - 49	33 - 53
1,18	1,08	N°16	24	23	21	-	20 - 40
0,600	0,81	N°30	17	16	15	-	14 - 30
0,300	0,59	N°50	12	12	11	-	9 - 21
0,150	0,43	N°100	9	8	8	-	6 - 16
0,075	0,31	N°200	5,22	4,95	4,68	2 - 8	3 - 6

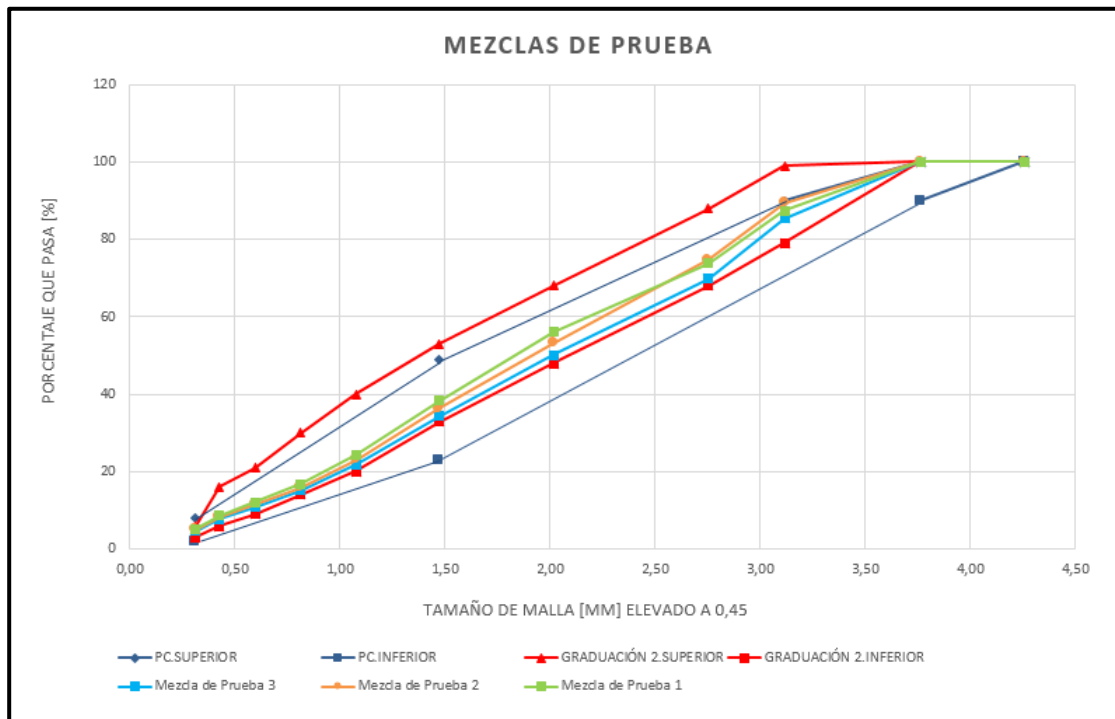


Figura 3-2: Gráfica granulométrica de mezclas de prueba.

Al tener las tres mezclas de prueba, se deben determinar las propiedades de los agregados mezclados. Las propiedades son estimadas matemáticamente a partir de las propiedades de los agregados individuales, para luego verificar que cumplan con los requerimientos. Dichas propiedades se presentan en la Tabla 3-12.

Tabla 3-12: Propiedades estimadas de las mezclas de agregados

GRAVEDADES ESPECÍFICAS				
PROPIEDAD	CRITERIO	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Gravedad Específica Bruta (Gsb)	-	2668	2669	2670
Gravedad Específica Aparente (Gsa)	-	2778	2778	2778
PROPIEDADES DE CONSENSO				
PROPIEDAD	CRITERIO	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Angularidad Agregado Grueso (1)-(2)	95%-90% mínimo	99% - 95%	99% - 95%	99% - 95%
Angularidad Agregado Fino	45% mínimo	50%	50%	50%
Partículas Planas y Alargadas	10% máximo	0,75%	0,88%	0,86%
Equivalente de Arena	45 mínimo	65%	65%	65%
PROPIEDADES DE ORIGEN				
PROPIEDAD	CRITERIO	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Tenacidad	25% máximo	15,16%	15,22%	15,00%
Durabilidad	10% máximo	2,87%	2,76%	2,66%
Materiales Deletéreos	5% máximo	0,036%	0,043%	0,041%
(1) Porcentaje de una o más caras fracturadas [%].				
(2) Porcentaje de dos o más caras fracturadas [%].				

### 3.1.4 Contenido de ligante asfáltico de mezclas de prueba

Se determina el contenido de ligante asfáltico de prueba ( $P_{bi}$ ) para cada mezcla de prueba. Para esto se calculan previamente, la gravedad específica efectiva ( $G_{se}$ ), el volumen de ligante asfáltico ( $V_{ba}$ ) y el volumen del ligante efectivo ( $V_{be}$ ). Los pasos a seguir para obtener  $P_{bi}$ , se detallan a continuación.

A partir de los valores de  $G_{sb}$  y  $G_{sa}$ , (Tabla 3-12) se obtiene  $G_{se}$ , según la Ecuación 3-1:

$$G_{se} = G_{sb} + 0,8 * (G_{sa} - G_{sb})$$

Ecuación 3-1: Estimación Gravedad Específica Efectiva.

El Volumen de Ligante Asfáltico ( $V_{ba}$ ) absorbido en el agregado se estima con la Ecuación 3-2:

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

Ecuación 3-2: Estimación de Volumen de Ligante asfáltico absorbido.

Donde:

$V_{ba}$ : Volumen Absorbido de ligante, [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] 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<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]).

El Volumen de Ligante Efectivo ( $V_{be}$ ) se determina según la Ecuación 3-3.

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

*Ecuación 3-3: Estimación Volumen de Ligante efectivo.*

Donde:

$S_n$ : tamaño de tamiz máximo nominal de la mezcla [pulgadas].

Finalmente, se determina el contenido de prueba inicial de ligante asfáltico, con la Ecuación 3-4 y 3-5.

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

*Ecuación 3-4: Estimación de Contenido de prueba inicial de ligante asfáltico.*

Con:

$$W_s = \frac{P_s * (1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}}$$

*Ecuación 3-5: Peso del agregado en  $P_{bi}$ .*

Donde:

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

$W_s$ : Peso del Agregado [g].

A continuación, en la Tabla 3-13 se presentan los resultados obtenidos, durante el desarrollo para obtener el contenido de prueba inicial de ligante asfáltico ( $P_{bi}$ ) y el valor de  $P_{bi}$  para cada mezcla de prueba.

*Tabla 3-13: Resultados de ligante asfáltico de mezclas de prueba.*

Características calculadas	Mezcla de prueba 1	Mezcla de prueba 2	Mezcla de prueba 3
<b>G<sub>se</sub></b>	2756,2	2756,5	2756,5
<b>V<sub>ba</sub></b>	0,0278	0,0277	0,0273
	2,781%	2,767%	2,729%
<b>V<sub>be</sub></b>	0,08943		
	8,943%		
<b>W<sub>s</sub> [g]</b>	2,317	2,317	2,317
<b>P<sub>bi</sub> [%]</b>	<b>4,91</b>	<b>4,91</b>	<b>4,89</b>

### 3.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS

Al obtener los resultados del contenido de prueba inicial de ligante asfáltico ( $P_{bi}$ ), se deben preparar dos mezclas como mínimo por cada mezcla de prueba, que luego serán compactadas con el SGC, obteniendo así las probetas. Además, se deben preparar dos mezclas más, para cada mezcla de prueba, con el fin de determinar la gravedad Específica Teórica Máxima ( $G_{mm}$ ).

Es importante tener en cuenta, que las mezclas diseñadas mediante método Superpave cuentan con un acondicionamiento específico. Dicho acondicionamiento, consiste en dejar la mezcla asfáltica durante 2 horas dentro del horno a la temperatura de compactación ( $157 \pm 10$  [°C] para efectos de la presente Memoria), sólo para agregados con un porcentaje de absorción de agua menor a 2%, de lo contrario, el acondicionamiento es más prolongado. Este acondicionamiento permite simular el envejecimiento a corto plazo que se produce durante el almacenamiento y transporte de la mezcla asfáltica, también brinda tiempo al agregado para que absorba el asfalto.

#### 3.2.1 Preparación de mezcla

1. Colocar el recipiente con el agregado pétreo y el envase de ligante asfáltico en el horno a una temperatura mayor en 15 [°C] que la temperatura de mezclado ( $174 \pm 5$  [°C]), hasta que se alcance dicha temperatura. Para evitar el envejecimiento excesivo no se debe mantener mucho tiempo después de lograr la temperatura deseada.
2. Colocar el recipiente con los agregados a temperatura de mezclado sobre una balanza y tarar la balanza.
3. Colocar todos los recipientes y bandejas necesarias en el horno, entre 30 [min] y 1 [h] antes de mezclar.
4. Formar un cráter en el agregado e incorporar el asfalto hasta alcanzar el peso deseado.



Figura 3-3: Incorporación de ligante asfáltico a mezcla.

5. Mezclar el asfalto con el agregado, utilizando un una espátula (con su hoja calentada previamente), durante entre 60 y 120 segundos. Se debe cubrir el agregado pétreo, manteniendo la temperatura de mezclado dentro del rango especificado hasta que las partículas más gruesas se hayan cubierto totalmente.
6. Colocar la mezcla en un recipiente plano (bandeja).



Figura 3-4: Colocación de mezcla en bandeja.

7. Llevar la bandeja con la mezcla al horno por 2 horas a la temperatura de compactación de la mezcla ( $157 \pm 10$  [°C]). Revolver la mezcla al transcurrir 1 [h].
8. Repetir este procedimiento hasta completar el número de especímenes que serán ensayados.
9. El tiempo necesario entre una preparación y otra es de aproximadamente de 20 minutos.
10. Al terminar el envejecimiento, realizar el ensayo de gravedad específica teórica máxima y la compactación de especímenes, según sea el objetivo de la mezcla.

### 3.2.2 Fabricación de probetas

Según los requerimientos de la ETE N°1A, la compactación de las probetas deben cumplir con un número de giros.

- Número de giros de diseño ( $N_{\text{diseño}}$ ), es el número que se necesita para producir la compactación de diseño en terreno y debe cumplir con **75 giros**.
- Número de giros máximo ( $N_{\text{máximo}}$ ) es el número que produce la máxima compactación que se debe presentar en el campo y debe cumplir con **115 giros**.

El procedimiento a seguir para la compactación de especímenes es el siguiente:

1. Preparar el compactador giratorio mientras la muestra se envejece, en este punto, se debe verificar la presión y la altura del compactador.
2. Ajustar el número de giros de diseño ( $N_{\text{diseño}}$ ) en el compactador, el cual por requerimientos del proyecto, según ETE N°1A, corresponde a 75 giros.
3. Colocar molde de compactación y los platos complementarios en el horno a la temperatura de compactación, aproximadamente entre 45 y 60 minutos antes de la compactación del primer espécimen. Esto se realiza con el fin de reducir las pérdidas de temperatura durante la compactación.
4. Sacar el molde y los platos complementarios del horno.
5. Colocar el primer plato dentro del molde y luego un papel especial con la medida del diámetro del molde untado con desmoldante.
6. Verter la mezcla envejecida en el molde, nivelarla y colocar otro papel especial untado con desmoldante, seguido del segundo plato.
7. Depositar el molde con la muestra dentro del compactador, centrándolo sobre el piso de carga que aplicará la presión.
8. Iniciar la compactación. Compactar hasta que alcance el  $N_{\text{diseño}}$ . La altura del espécimen es constantemente monitoreada y registrada luego de cada giro.
9. El compactador termina la compactación luego que alcance el  $N_{\text{diseño}}$ . Retirar el molde con la muestra compactada.
10. Esperar que la muestra compactada se enfríe, luego se procede a retirar el espécimen del molde, se debe esperar un tiempo prudente, evitando que el espécimen se distorsione.
11. Retirar los papeles de la base y la superficie e identificar cada mezcla de prueba con un marcador.
12. Repetir el procedimiento de compactación para todas las muestras a ser ensayadas.



Figura 3-5:(1) SGC; (2) moldes de compactador.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DE MEZCLA DE DISEÑO

#### 3.3.1 Selección de estructura de agregado de diseño

Con el fin de determinar los parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas de prueba, se realizan los ensayos para determinar la Gravedad Específica Teórica Máxima ( $G_{mm}$ ) y la Gravedad Específica Bruta ( $G_{mb}$ ).

##### 3.3.1.1 Gravedad Específica Teórica Máxima ( $G_{mm}$ )

Según la Norma AASHTO T-209, se determina la  $G_{mm}$  (medida) de cada mezcla de prueba en su estado suelto, para lo que se debe saturar la mezcla aplicando vacío, con el fin de extraer el aire que contiene la mezcla. La expresión para determinar la Gravedad Específica Teórica Máxima es la Ecuación 3-6.

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

Ecuación 3-6: Determinación de  $G_{mm}$ .

Donde:

$M_m$ : 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].

$\rho_t$ : densidad del agua a  $T^\circ$  de ensaye [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

##### 3.3.1.2 Gravedad Específica Bruta ( $G_{mb}$ )

Parámetro medido sobre probeta compactada a temperatura ambiente. Se determina según la norma AASHTO T-166 la  $G_{mb}$  (medida). El procedimiento utilizado es para probetas con un porcentaje de absorción de agua menos a 2%. La expresión para determinar la Gravedad Específica Bruta es la Ecuación 3-7.

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

Ecuación 3-7: 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].

Conociendo el peso de la mezcla, el diámetro del molde fijo de 150 [mm] y la medida de la altura para cualquier giro de compactación, la Gravedad Específica Bruta del espécimen puede ser estimada ( $G_{mb}$  (estimada)) para cualquier número de giros durante la compactación, considerando el volumen de la probeta como de un cilindro de paredes lisas de diámetro conocido y altura medida [2].

Al comparar los valores de  $G_{mb}$  (medida) y  $G_{mb}$  (estimada) para el  $N_{m\acute{a}ximo}$  de cada espécimen existe una diferencia, debido a que el espécimen se considera como un cilindro liso, lo que no refleja la realidad. El volumen real es menor que la consideración, ya que contempla la presencia de vacíos superficiales del espécimen.

Por lo anterior, es que se debe realizar una corrección a  $G_{mb}$  (estimada) para un determinado número de giros, mediante un factor, obtenido mediante la relación entre  $G_{mb}$  (medida) y  $G_{mb}$  (estimada) para  $N_{m\acute{a}ximo}$  [2].

### 3.3.1.3 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 Ecuación 3-8.

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

Ecuación 3-8: 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 [cm<sup>3</sup>], se calcula usando:

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

Se calcula el factor de corrección, mediante la relación de la Ecuación 3-9.

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

Ecuación 3-9: Determinación de factor de corrección.

Donde:

$G_{mb}$  (medida): Gravedad Específica bruta medida al  $N_{dise\tilde{n}o}$ .

$G_{mb}$  (estimada): Gravedad Específica bruta medida al  $N_{dise\tilde{n}o}$ .

El  $G_{mb}$  (estimado) a otro nivel de compactación se determina usando la Ecuación 3-10.

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

Ecuación 3-10: Gravedad Específica Bruta corregida.

Donde:

$G_{mb}$  (corregida): Gravedad Específica bruta corregida del espécimen a algún nivel de revolución.

C: factor de corrección

$G_{mb}$  (estimada): Gravedad Específica bruta estimada a alguna revolución.

Finalmente se calcula el %  $G_{mm}$  para cada uno de los especímenes de prueba. Para ello, se divide la  $G_{mb}$  (corregida) por el valor de  $G_{mm}$  medida. 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.

Los valores de Densificación de cada mezcla de prueba se presentan en la Tabla 3-14, Tabla 3-15 y Tabla 3-16.

Los puntos de comparación importantes son el % $G_{mm}$  para  $N_{inicial}$  (7 giros),  $N_{diseño}$  (75 giros) y  $N_{máximo}$  (115 giros), los cuales se han resaltado para cada densificación.

Tabla 3-14: Densificación para mezcla de prueba 1.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA DE PRUEBA 1									
$G_{mm}$	2,517								
N° de Giros	Especímen 1				Especímen 2				$G_{mm}$ [%] promedio
	$H_t$ [mm]	$G_{mb}$ (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mb}$ (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mm}$ [%]	$H_t$ [mm]	$G_{mb}$ (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mb}$ (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mm}$ [%]	
<b>7</b>	125,2	2,11	2,20	87,23%	126,0	2,10	2,19	86,89%	<b>87,06%</b>
<b>75</b>	114,3	2,31	2,41	95,55%	114,9	2,30	2,40	95,28%	<b>95,42%</b>
<b>115</b>	112,8	2,34	2,44	96,82%	113,4	2,33	2,43	96,54%	<b>96,68%</b>
$G_{mb}$ (Medido)	2,437			2,430					

Tabla 3-15: Densificación para mezcla de prueba 2.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA DE PRUEBA 2									
$G_{mm}$	2,522								
N° de Giros	Especímen 1				Especímen 2				$G_{mm}$ [%] promedio
	$H_t$ [mm]	$G_{mb}$ (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mb}$ (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mm}$ [%]	$H_t$ [mm]	$G_{mb}$ (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mb}$ (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mm}$ [%]	
<b>7</b>	126,7	2,08	2,18	86,25%	126,3	2,09	2,18	86,47%	86,36%
<b>75</b>	115,2	2,29	2,39	94,86%	115,5	2,28	2,38	94,55%	94,71%
<b>115</b>	113,7	2,32	2,42	96,11%	114,0	2,31	2,42	95,80%	95,96%
$G_{mb}$ (Medido)	2,424			2,416					

Tabla 3-16: Densificación para mezcla de prueba 3.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA DE PRUEBA 3									
G <sub>mm</sub>	2,515								
N° de Giros	Especimen 1				Especimen 2				G <sub>mm</sub> [%] promedio
	H <sub>t</sub> [mm]	G <sub>mb</sub> (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mb</sub> (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mm</sub> [%]	H <sub>t</sub> [mm]	G <sub>mb</sub> (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mb</sub> (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mm</sub> [%]	
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%
G <sub>mb</sub> (Medido)	2,443				2,439				

### 3.3.1.4 Parámetros Volumétricos de las Mezclas de prueba compactadas

Se determina el promedio de % G<sub>mm</sub> para N<sub>inicial</sub> (7 giros), N<sub>diseño</sub> (75 giros) y N<sub>máximo</sub> (115 giros) para cada una de las 3 mezclas de prueba. Se presentan dichos promedios en la Tabla 3-17.

Tabla 3-17: Promedio %G<sub>mm</sub> para N<sub>inicial</sub>, N<sub>diseño</sub> y N<sub>máximo</sub> para mezclas de prueba.

Mezcla de prueba	Promedio %G <sub>mm</sub> @ N <sub>inicial</sub>	Promedio %G <sub>mm</sub> @ N <sub>diseño</sub>	Promedio %G <sub>mm</sub> @ N <sub>máximo</sub>
1	87,1%	95,4%	96,7%
2	86,4%	94,7%	96,0%
3	87,0%	95,6%	96,8%

Se determina el porcentaje de vacíos de aire (V<sub>a</sub>) y Vacíos de Agregado Mineral (VAM) para N<sub>diseño</sub>. Según las expresiones mostradas en la Ecuación 3-11 y Ecuación 3-12.

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

Ecuación 3-11: Cantidad de Vacíos de aire.

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

Ecuación 3-12: Cantidad de Vacíos de Agregado Mineral.

Los resultados de  $V_a$  y VAM, para cada mezcla de prueba se muestran en la Tabla 3-18.

Tabla 3-18: Resultados de  $V_a$  y VAM.

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

La Tabla 3-19 presenta un resumen de los valores de la compactación de las muestras de prueba.

Tabla 3-19: 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%

Como premisa de diseño de mezclas por metodología Superpave, es utilizar en cada una de las muestras de prueba, la cantidad de ligante asfáltico que permita alcanzar un 4% de vacíos de aire, es decir, un  $G_{mm}$  de 96%.

En la Tabla 3-17 se puede observar que no se cumple en ninguna de las 3 mezclas de prueba, la premisa antes mencionada. Debido a que las mezclas de prueba tienen diferentes contenidos de vacíos de aire para  $N_{diseño}$ , sus propiedades volumétricas y de compactación no pueden ser comparadas.

Por ejemplo, la Mezcla de Prueba 3 contiene una cantidad de asfalto menor que la necesaria para poder alcanzar el  $N_{diseño}$  con 4% de vacíos de aire (tiene 4,4%).

Por lo tanto, nace la pregunta: si se usara más asfalto en dicha mezcla para lograr alcanzar el 4% de vacíos, ¿Podrían el VAM y las demás propiedades exigidas lograr hasta un nivel que sea aceptable? Dar una respuesta a esta pregunta, resulta importante para el método de diseño.

Por lo tanto, lo que se debe hacer, es calcular para cada una de las mezclas de prueba, el contenido de ligante asfáltico estimado para alcanzar un 4% de vacíos de aire [2]. A continuación se muestra la fórmula a utilizar, en la Ecuación 3-13.

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

Ecuación 3-13: 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 asfáltico [%].
- $V_a$ : porcentaje de vacíos de aire para  $N_{diseño}$  [%].

Las propiedades volumétricas VAM y VFA de compactación de la mezcla, se estiman luego para el nuevo contenido de ligante asfáltico, usando las siguientes ecuaciones.

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

Ecuación 3-14: Estimación de VAM para un 4% de vacíos de aire.

Donde:

$\%VAM_{inicial}$ :  $\%VAM$  para el contenido de ligante de prueba.  
 C: constante (0,1 si  $V_a < 4\%$ ; 0,2 si  $V_a > 4\%$ ).

$$\%VFA_{estimado} = 100\% * \frac{\%VAM_{estimado} - 4}{\%VAM_{estimado}}$$

Ecuación 3-15: Estimación de VFA para un 4% de vacíos de aire.

También se calcula el  $\%G_{mm}$  para  $N_{inicial}$  y para  $N_{máximo}$  como:

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

Ecuación 3-16: Estimación de  $\%G_{mm\ @N_{inicial}}$  para un 4% de vacíos de aire.

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

Ecuación 3-17: 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  $N_{diseño}$ . En las Tabla 3-20 y Tabla 3-21, respectivamente.

Tabla 3-20: Propiedades volumétricas de la mezcla estimada para  $N_{diseño}$ .

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 3-21: 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 las mezclas establecidos por Superpave. Para el tránsito de diseño y el tamaño máximo nominal, los criterios volumétricos y de densificación son los que se representan en la Tabla 3-22.

Tabla 3-22: Criterios volumétricos y de densificación para mezclas Superpave.

Parámetro	Criterio
% de Vacíos de Aire	4.0%
% VAM mínimo	13.0% (19 mm tamaño Máximo nominal)
%VFA	65% - 78% (0,3 a 3*10 <sup>6</sup> ESALs)
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>inicial</sub>	≤ 90,5%
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>máximo</sub>	<98%

Finalmente, existe un rango requerido para la proporción de polvo o filler (DP). Dicho criterio se debe cumplir para todos los niveles de tránsito y donde el factor se calcula como el porcentaje en peso del material que pasa el tamiz de 0.075 [mm] (por vía húmeda) dividido por el contenido de ligante asfáltico efectivo.

Primero, se calcula contenido del ligante asfáltico efectivo, según Ecuación 3-18.

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

Ecuación 3-18: Estimación de ligante asfáltico efectivo a 4% de Va.

Luego la proporción de polvo se calcula según Ecuación 3-19.

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

Ecuación 3-19: Estimación de la proporción de Polvo para un 4% de Va.

Los resultados obtenidos para  $P_{be,estimado}$  y para la proporción de polvo (DP) y su criterio de aceptación se muestran en la Tabla 3-23.

Tabla 3-23: 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	

Una vez estimadas todas las propiedades de la mezcla, se deben analizar los valores de las mezclas de prueba y decidir cuál de ellas es aceptable para definirla como la estructura del agregado de diseño.

Como resumen, se presenta la Tabla 3-24, con las propiedades estimadas y criterios requeridos, para analizar y elegir de mejor manera la estructura de agregados adecuada.

Tabla 3-24: Propiedades Volumétricas estimadas.

Propiedades Volumétricas Estimadas	Criterio de aceptabilidad	Valores obtenidos		
		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Ligante Asfáltico Estimado, %	-	5,2%	<b>5,4%</b>	5,0%
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>inicial</sub>	<89%	87,6%	<b>87,7%</b>	87,4%
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>diseño</sub>	<b>96%</b>	96,0%	<b>96,0%</b>	96,0%
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>máximo</sub>	<98%	97,3%	<b>97,2%</b>	97,2%
% Vacíos de Aire	<b>4,00%</b>	4,0%	<b>4,0%</b>	4,0%
%VAM mínimo	<b>15,0% (13,0% - 19 mm)</b>	14,3%	<b>14,6%</b>	14,1%
%VFA	<b>65 - 78%</b>	72,0%	<b>72,7%</b>	71,5%
Proporción de Polvo	<b>0.6 - 1.2</b>	1,30	<b>1,17</b>	1,18

La Mezcla de prueba 1, no cumple con el criterio de proporción de polvo, por lo que queda fuera de la elección.

La Mezcla de prueba 2 es la elegida por las siguientes razones:

- Menor Proporción de Polvo en la mezcla.
- Mezcla con el porcentaje de VAM mínimo más prometedor en función de cumplir con el 15% mínimo estipulado en las ETE N°1A.
- Menor %G<sub>mm</sub>@N<sub>máximo</sub>, parámetro encargado de controlar el límite superior de densificación.
- Una mayor cantidad de ligante asfáltico en Superpave, es señal que se requirió un menor esfuerzo de compactación para lograr el óptimo, por lo que si se hubiese escogido un nivel de tránsito mayor (mayor a 75 Números de Giro) como dato de entrada del diseño, mayor sería el esfuerzo de compactación reflejado en el mayor número de giros y por consiguiente menor sería el contenido de ligante asfáltico óptimo dosificado.

Posterior a la elección de la estructura de los agregados de diseño, se debe elegir el porcentaje de ligante asfáltico de diseño.

### 3.3.2 Selección de porcentaje de ligante asfáltico de diseño

Los requerimientos según Especificaciones técnicas especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por Superpave (ETE N°1A), exige como selección para el porcentaje de ligante asfáltico, elegir aquel contenido de ligante asfáltico correspondiente a un 3,5% de vacíos de aire y en base a eso verificar si los parámetros volumétricos cumplen los criterios que establece el método. Se debe 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, se compactan especímenes con diferentes contenidos de ligante asfáltico, los que posteriormente son evaluados para determinar el contenido de ligante asfáltico definitivo de diseño.

Se deben confeccionar un mínimo de 2 especímenes para cada uno de los siguientes contenidos de asfalto [2].

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

Por lo tanto para la Mezcla de prueba 2, correspondiente a la seleccionada con un contenido de ligante asfáltico estimado de 5,4%. Los contenidos de ligante asfáltico de diseño son 4,9%, 5,4%, 5,9% y 6,4%. Los 4 contenidos son lo mínimo a usar para el análisis en el Nivel 1 de Superpave.

También, se preparan un mínimo de 2 especímenes para determinar  $G_{mm}$  para el contenido estimado de ligante. Los especímenes son preparados y ensayados de igual manera que los especímenes de la sección Selección de estructura de agregado de diseño.

Los valores de Densificación de cada mezcla, para los 4 contenidos de ligante asfáltico de diseño se presentan en la Tabla 3-25, Tabla 3-26, Tabla 3-27 y Tabla 3-28.

Los puntos de comparación importantes son el  $\%G_{mm}$  para  $N_{inicial}$  (7 giros),  $N_{diseño}$  (75 giros) y  $N_{máximo}$  (115 giros), los cuales se han resaltado para cada densificación.

Tabla 3-25: Densificación para Mezcla 2 con 4,9% de contenido de asfalto.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 4,9% - Diseño Superpave Aeropuerto									
$G_{mm}$	2,520								
N° de Giros	Especímen 1				Especímen 2				$G_{mm} [\%]$ promedio
	$H_t$ [mm]	$G_{mb}$ (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mb}$ (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mm} [\%]$	$H_t$ [mm]	$G_{mb}$ (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mb}$ (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	$G_{mm} [\%]$	
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%
$G_{mb}$ (Medido)	2,432				2,433				

Tabla 3-26: Densificación para Mezcla 2 con 5,4% de contenido de asfalto.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 5,4% - Diseño Superpave Aeropuerto									
<b>G<sub>mm</sub></b>	2,503								
N° de Giros	Especimen 1				Especimen 2				G <sub>mm</sub> [%] promedio
	H <sub>t</sub> [mm]	G <sub>mb</sub> (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mb</sub> (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mm</sub> [%]	H <sub>t</sub> [mm]	G <sub>mb</sub> (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mb</sub> (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mm</sub> [%]	
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%
<b>G<sub>mb</sub> (Medido)</b>	2,447			2,448					

Tabla 3-27: Densificación para Mezcla 2 con 5,9% de contenido de asfalto.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 5,9% - Diseño Superpave Aeropuerto									
<b>G<sub>mm</sub></b>	2,486								
N° de Giros	Especimen 1				Especimen 2				G <sub>mm</sub> [%] promedio
	H <sub>t</sub> [mm]	G <sub>mb</sub> (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mb</sub> (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mm</sub> [%]	H <sub>t</sub> [mm]	G <sub>mb</sub> (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mb</sub> (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mm</sub> [%]	
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%
<b>G<sub>mb</sub> (Medido)</b>	2,449			2,448					

Tabla 3-28: Densificación para Mezcla 2 con 6,4% de contenido de asfalto.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 6,4% - Diseño Superpave Aeropuerto									
<b>G<sub>mm</sub></b>	2,467								
N° de Giros	Especimen 1				Especimen 2				G <sub>mm</sub> [%] promedio
	H <sub>t</sub> [mm]	G <sub>mb</sub> (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mb</sub> (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mm</sub> [%]	H <sub>t</sub> [mm]	G <sub>mb</sub> (est) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mb</sub> (corr) [g/cm <sup>3</sup> ]	G <sub>mm</sub> [%]	
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%
<b>G<sub>mb</sub> (Medido)</b>	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 más representativos para este diseño, como son  $N_{\text{inicial}}$  (7 giros),  $N_{\text{diseño}}$  (75 giros) y  $N_{\text{máximo}}$  (115 giros).

En la Tabla 3-29 se presentan los valores de compactación para los distintos porcentajes de ligante asfáltico.

Tabla 3-29: Resumen de compactación de la Mezcla 2.

% de Asfalto	%G <sub>mm</sub> @ N <sub>inicial</sub>	%G <sub>mm</sub> @ N <sub>diseño</sub>	%G <sub>mm</sub> @ N <sub>máximo</sub>
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%

Se calculan las distintas propiedades volumétricas para  $N_{\text{diseño}}$ , con cada contenido de ligante asfáltico de prueba, presentados en la Tabla 3-30. Con estos datos, es posible generar gráficas de factores como el contenido de vacíos de aire, VAM y VFA, en función del contenido de ligante asfáltico [2].

Tabla 3-30: Resumen de propiedades volumétricas de Mezcla 2, para  $N_{\text{diseño}}$ .

%Asfalto	% Vacíos de Aire	%VAM	%VFA	G <sub>mm</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	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 cumplir con el requerimiento exigido por ETE N°1A, que es lograr un 3,5% de Vacíos de Aire. Por lo anterior es que se elige el contenido de ligante asfáltico de 5,4%.

Para el contenido de ligante asfáltico de diseño, se debe verificar que todas las otras propiedades cumplan con los criterios de aceptabilidad establecidos.

A partir de los resultados obtenidos, se generan gráficos que muestran propiedades como Vacíos de Aire, VAM y VFA, en función del contenido de ligante asfáltico, junto a la demarcación de los criterios exigidos según Superpave y las ETE N°1A. Dichos gráficos se presentan en las Figuras 3-6, 3-7, 3-8 y 3-9.

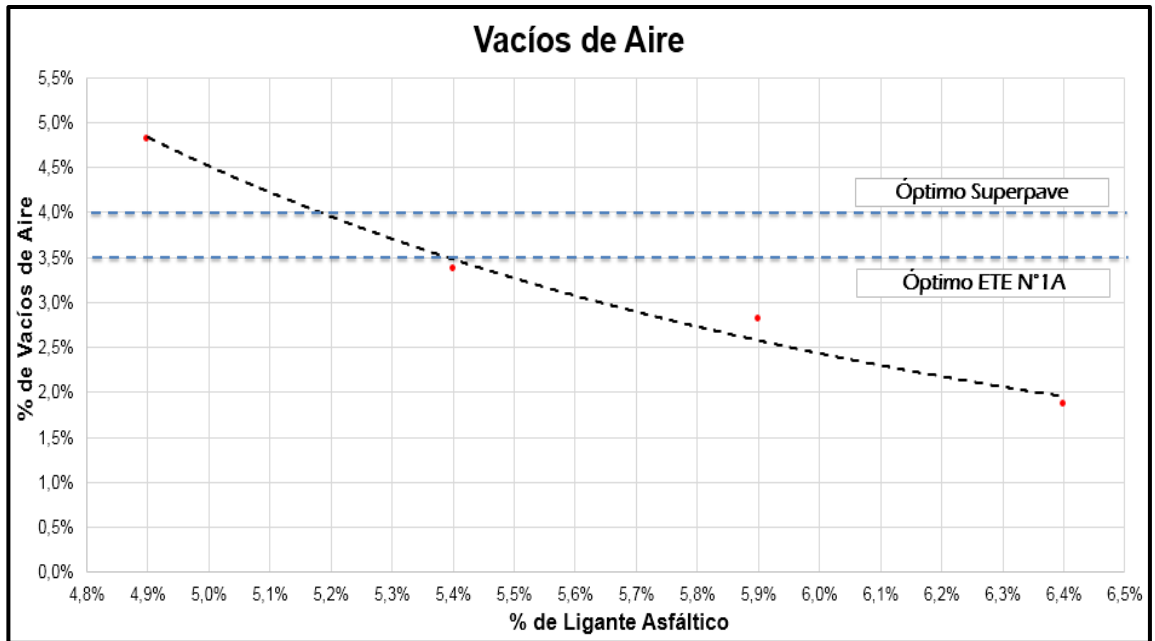


Figura 3-6: Cantidad de Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico.

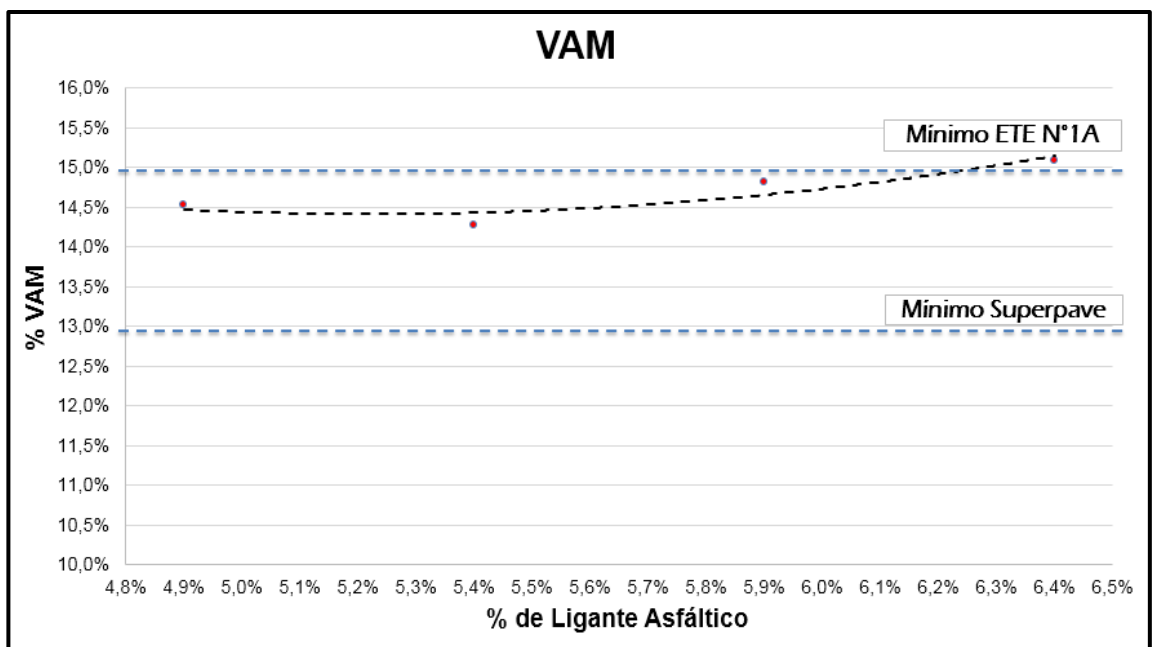


Figura 3-7: Vacíos en el agregado mineral versus contenido de ligante asfáltico.

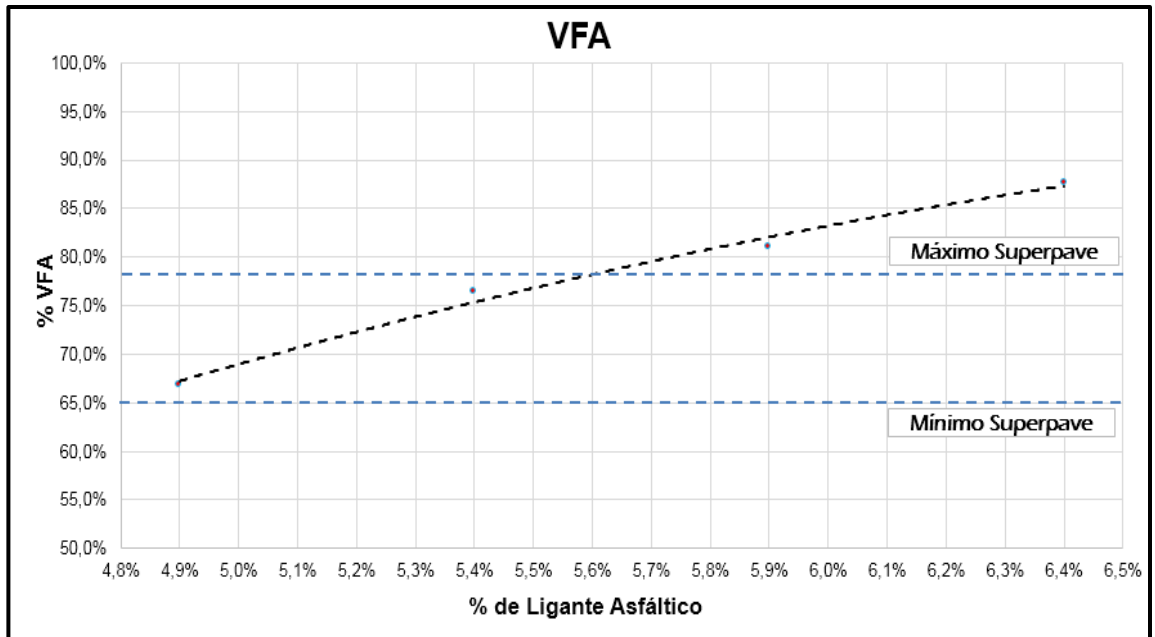


Figura 3-8: Vacíos llenos con asfalto versus contenido de ligante asfáltico.

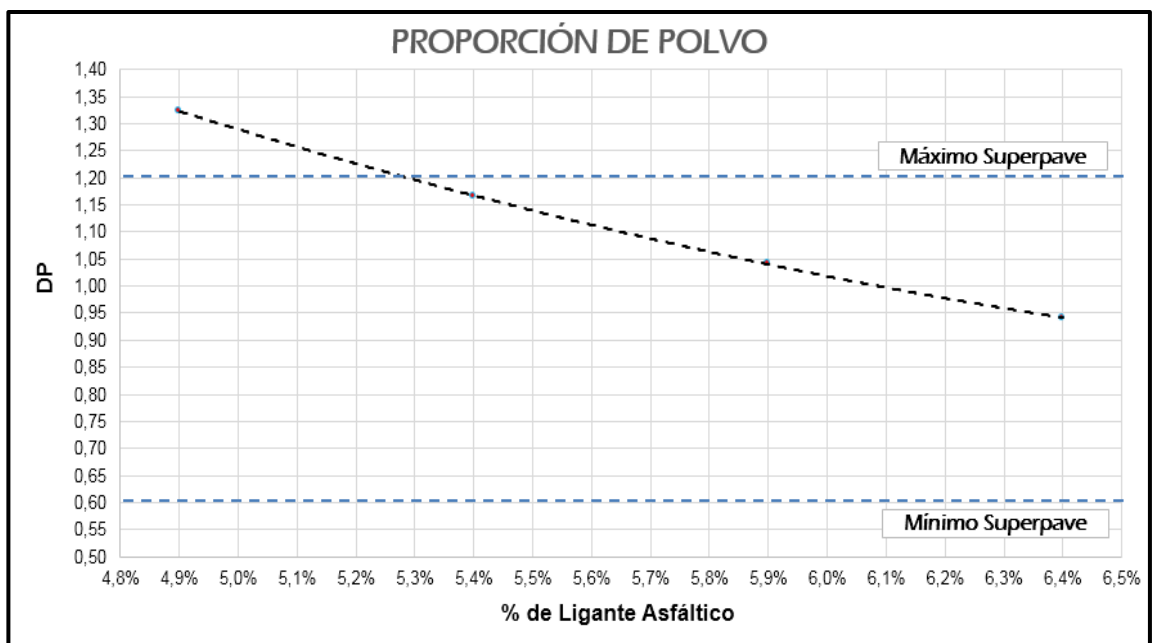


Figura 3-9: Proporción de polvo versus contenido de ligante asfáltico.

A partir de las gráficas construidas, se ajusta el valor del ligante asfáltico a un 3,5% y por ende, los valores de VAM, VFA y DP varían levemente.

Los valores de diseño para una mezcla de tamaño máximo nominal de 19 [mm] (Mezcla de Prueba 2) con un contenido asfáltico de diseño de 5,4% y los respectivos criterios de aceptabilidad, se presentan en la Tabla 3-31.

Tabla 3-31: 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 <sub>mm</sub> @ N <sub>inicial</sub> = 7	87,7	≤ 90,5 %	-
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>diseño</sub> = 75	96,6	96 %	-
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>máximo</sub> = 115	97,9	< 98%	-

### 3.3.3 Evaluación de la Sensibilidad a la humedad de la Mezcla Asfáltica

Finalmente, se evalúa la Sensibilidad a la humedad de la mezcla de diseño, ensayo en el cual se utiliza la norma ASTM D4867 Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt concrete paving Mixtures [23] (Sensibilidad a la humedad por medio de ensayo de Tensión Indirecta TSR), según ETE N°1A, donde exige obtener al menos un resultado de 75%. Seis especímenes son compactados a 7% de vacíos de aire idealmente, 3 de ellos forman el grupo de especímenes de control y los otros 3 el grupo de especímenes acondicionados, sometidos al vacío para alcanzar un grado de saturación constante del 55 al 80%. Todos los especímenes son ensayados para determinar su resistencia a la tracción indirecta, obteniendo así la relación entre la resistencia del grupo de especímenes acondicionados y el grupo de especímenes de control, siendo el valor mínimo según Superpave un 80%.

Los resultados son entregados en laboratorio y se muestran en la Tabla 3-32.

Tabla 3-32: Resultados de Sensibilidad a la humedad de la mezcla de diseño (TSR)

Designación muestras	2	3	5	1	4	6	Promedio
Tensión condición seca [Kpa]	-	-	-	716,0	691,4	661,1	689,5
Tensión condición húmeda [Kpa]	641,1	665,1	652,2	-	-	-	652,8
TSR [%]	95%						

Se obtiene un valor de 95% de TSR, valor que supera los valores mínimos exigidos, cumpliendo por completo el Nivel 1 del diseño volumétrico para la Mezcla de Prueba 2.

### 3.4 MÓDULO DE RIGIDEZ

Para el desarrollo de la fase experimental del Módulo de Rigidez, se cumplen etapas previas al ensayo en sí, tales como: (1) Confección de probetas cilíndricas a partir de mezcla diseñada previamente; (2) Realización de ensayo para determinar la densidad de la probeta; y (3) Conocer el equipo a utilizar y los dispositivos necesarios. Para finalmente dar paso a la ejecución de Ensayo de Tracción Indirecta.

El ensayo se realiza según la Norma UNE-EN 12697-26 año 2006, ANEXO C (Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 26: Rigidez) [7].

#### 3.4.1 Confección de probetas

##### 3.4.1.1 Preparación de Mezcla para ensayo de Módulo de Rigidez

La confección de probetas cilíndricas se realiza a partir de la mezcla diseñada previamente. Para dicha mezcla se sigue el procedimiento detallado en la sección 3.2.1 Preparación de mezcla.

##### 3.4.1.2 Fabricación de Probeta para ensayo de Módulo de Rigidez

La compactación de las probetas para el ensayo de Módulo de Rigidez se desarrolla según el procedimiento descrito en la sección 3.2.2 Fabricación de probetas, salvo de un punto que varía de tal procedimiento.

- Punto 2 del procedimiento, dice: Ajustar el número de giros de diseño ( $N_{\text{diseño}}$ ) en el compactador, el cual por requerimientos del proyecto, según ETE N°1A, corresponde a 75 giros.

Como se menciona en esta Memoria, las probetas pueden ser compactadas de acuerdo al número seleccionado de giros o hasta llegar a una altura determinada de la muestra. Para la preparación de la mezcla para el ensayo de Módulo de Rigidez, cambia a:

- Ajustar el equipo SGC, según la altura deseada.

##### 3.4.1.3 Preparación de probetas para ensayo de Módulo de Rigidez

Según normativa, la cantidad mínima de probetas necesarias para ensayar y para obtener resultados de Módulo de Rigidez, es de 4 probetas.

Una vez obtenidas las probetas, es necesario que sean preparadas para el ensayo, cumpliendo las siguientes condiciones:

Las probetas cilíndricas deben tener un espesor comprendido entre 30[mm] y 75[mm] Con un diámetro nominal de 80[mm], 100 [mm], 120 [mm], 150 [mm] o 200 [mm].

Para este estudio, se fabrican 2 probetas de 134 [mm] de altura con un diámetro de 150 [mm]. Posterior a cortes de altura, se obtienen 4 especímenes con 60[mm] de altura aproximadamente.

Para el corte es necesario marcar la altura deseada, utilizando cinta engomada para una mayor precisión, como se muestra en la Figura 3-10.



Figura 3-10: Demarcación de probetas para posterior corte.

Cada probeta preparada en laboratorio es cortada utilizando una sierra con hoja punta diamante, con el fin de obtener un cilindro recto, como se muestra en la Figura 3-11. Con el corte de la probeta se deben obtener dos muestras que estén dentro del rango del espesor necesario para el ensayo.



Figura 3-11: Corte de probetas con sierra diamantada.

Una vez cortadas las probetas, se lavan para eliminar todas las partículas de árido que sobresalgan de la cara diametral. Inicialmente se secan con un paño húmedo y luego se secan al horno a masa constante, a una temperatura menor de 20 [°C]. La probeta se considera seca tras al menos de 8 [h] de secado y cuando tras realizar dos pesadas consecutivas, separadas al menos 4 [h], difieren en menos del 0,1 % [7].

Finalmente, con un marcador, se debe trazar un diámetro en una de las caras de la probeta y luego un segundo diámetro a  $90 \pm 10$  [°] respecto del primero. Identificando correctamente cada diámetro.

### 3.4.2 Ensayo de densidad real para mezcla compactada

Se calcula la densidad real de la probeta, equivalente a la gravedad específica bruta ( $G_{mb}$ ), parámetro medido sobre probeta compactada a temperatura ambiente y que es solicitado para ensayo de Módulo de Rigidez.

Se determina según la norma AASHTO T-166 o M.C 8.302.38.

El procedimiento utilizado para las probetas obtenidas, antes de ser cortadas, es para probetas con un porcentaje de absorción de agua menos a 2% y es el que se detalla a continuación.

1. Secar la probeta hasta masa constante, enfriándola a temperatura ambiente ( $25 \pm 1$  [°C]). Registrar la masa seca como A.
2. Sumergir la probeta en un baño de agua  $25 \pm 1$  [°C] durante 3 a 5 minutos. Registrar esta masa como C.
3. Sacar probeta del agua y secar con paño húmedo. Designar como masa B.
4. Determinar el porcentaje de agua absorbida según la Ecuación 3-20.

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

*Ecuación 3-20: Determinación de porcentaje de agua absorbida.*

Si  $A_{ab}$  es mayor que 2, se debe emplear otro método.

5. Calcular la densidad real de acuerdo a la Ecuación 3-21.

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

*Ecuación 3-21: Determinación de densidad real de mezcla compactada*

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].

6. Determinar porcentaje de Vacíos de aire (%  $V_a$ ) para cada probeta, según la expresión dada en la Ecuación 2-5: Porcentaje de vacíos de aire. Considerando Gravedad específica Teórica Máxima como  $G_{mm}$  y Gravedad específica bruta como  $G_{mb}$ .

### 3.4.3 Equipo, dispositivos y sistema de medición a utilizar en Ensayo de Tracción Indirecta [7]

#### 3.4.3.1 Dispositivos generales a utilizar

- Termómetro: con medición adecuada y precisión de  $0,1$ [°C], para determinar la temperatura de la probeta y del horno de conservación.
- Soporte: debe permitir sujetar la probeta cilíndrica durante el corte de ésta.
- Sierra: debe cortar y ajustar las probetas a las dimensiones requeridas. Se recomienda sierra con punta de diamante.

### 3.4.3.2 Equipo a utilizar

- Estructura de carga fabricada en acero: se utiliza un equipo servo hidráulico marca Cooper Technology (CRT-HYD 25-II). Sus componentes principales se pueden distinguir en la Figura 3-12.

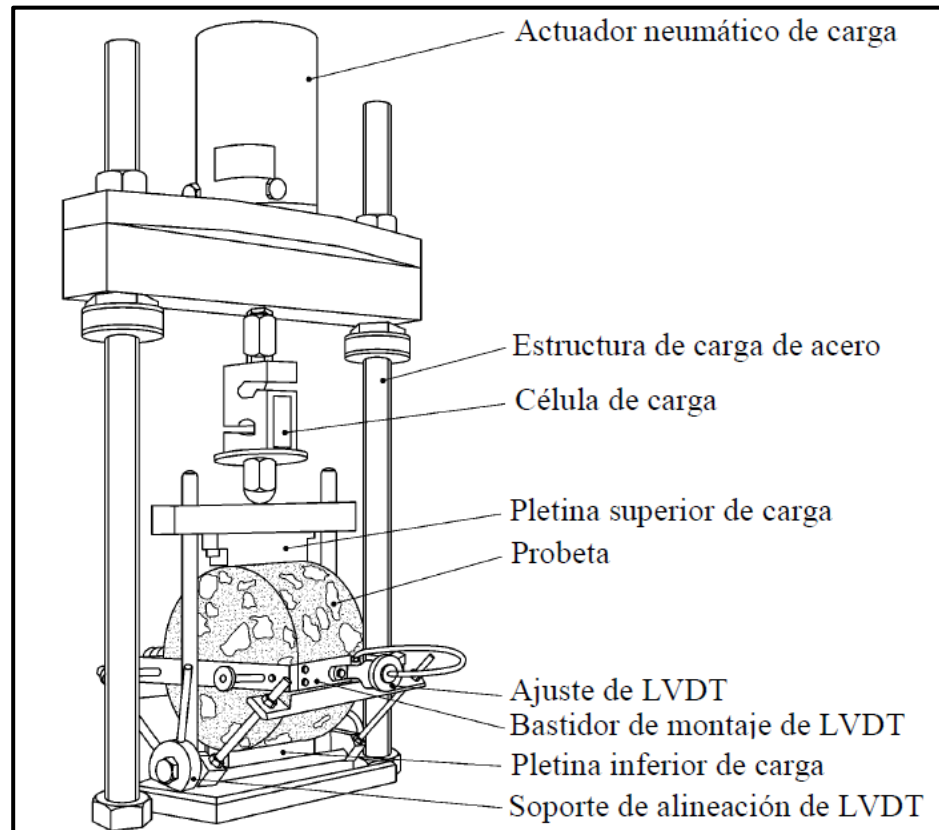


Figura 3-12: Principales componentes de Equipo de ensayo [7].

- Dos pletinas de carga de acero inoxidable: Las dimensiones de éstas dependen del diámetro nominal de la probeta. La probeta a utilizar de 150 [mm] de diámetro, requiere pletinas con anchura de  $19 \pm 0,1$  [mm] y tolerancia en el radio del segmento cóncavo de  $75 \pm 1$  [mm].
- Sistema de carga: Este sistema debe contar con un actuador de carga adecuado, que pueda aplicar una carga a lo largo del diámetro vertical de la probeta a través de las pletinas de carga. El actuador de carga debe aplicar impulsos de carga repetidos que se alterne con periodos de descanso. Durante el ensayo se deben controlar los tiempos de carga [7]. La carga tiene forma de una onda de medio seno o parecida, donde se aplican términos como: carga máxima, periodo de repetición de los impulsos y periodo ascendente, los cuales pueden ser revisados en detalle en la sección 2.6.1 Módulo de Rigidez de la presente Memoria.

### 3.4.3.3 Sistema de medición de la deformación

Se debe contar con un sistema que registre la deformación diametral horizontal transitoria de la probeta, durante la aplicación del impulso de carga. La exactitud de medición debe ser menor a 0,2 [µm].

Bastidor de montaje de LVDT y soporte de alineación de LVDT, ambos dispositivos se complementan para dar soporte y la ubicación correcta a la probeta, además, a través del bastidor de montaje se conecta la probeta con los LVDT (transformador diferencial de variación lineal), los cuales miden desplazamiento lineal.

En la Figura 3-13 izquierda, se muestra la disposición adecuada para medir la deformación diametral horizontal. Se montan dos LVDT, uno frente al otro, en un bastidor rígido fijado a la probeta (Figura 3-13 derecha). Durante el ensayo, el bastidor debe estar sujeto por las mordazas solamente y no debe estar en contacto con ninguna otra parte del equipo.

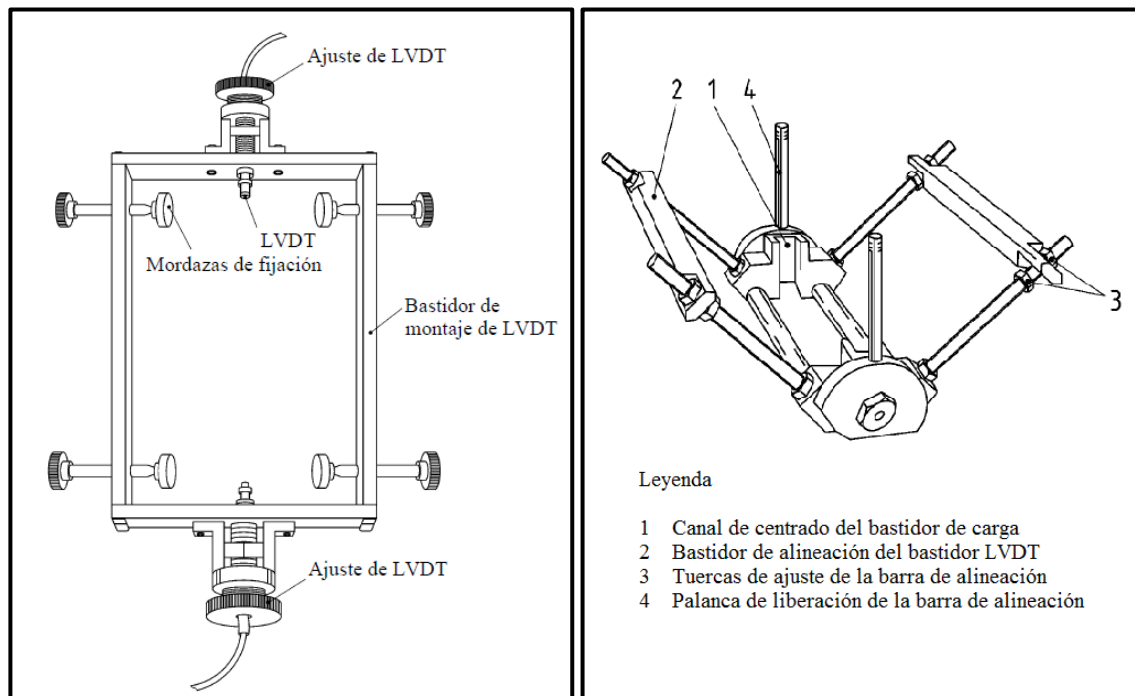


Figura 3-13: Bastidor de montaje de LVDT (izquierda) y soporte de alineación de LVDT (derecha) [7].

### 3.4.3.4 Equipo de registro

Unidad de interfaz digital conectada a un microordenador que controla y registra las señales eléctricas de los transductores de carga y de la deformación.

Durante el transcurso del ensayo, luego de ser aplicados los 10 pulsos de acondicionamiento, el software calcula en Módulo de Rigidez para cada uno de los siguientes 5 pulsos de carga, mediante la Ecuación 3-22.

$$S_m = \frac{F * (v + 0,27)}{(z * h)}$$

Ecuación 3-22: Módulo de Rigidez [7].

Donde:

$S_m$ : Módulo de Rigidez Medido [MPa].

F: Valor máximo de la carga vertical aplicada [N].

z: Amplitud de la deformación horizontal del ciclo de carga [mm].

h: Espesor medio de la probeta [mm].

v: Coeficiente de Poisson (se asume un valor de 0,35 para todas las temperaturas).

Luego, el software realiza un ajuste al Módulo de Rigidez medido utilizando un factor de superficie de carga de 0,60.

### **3.4.4 Ejecución de Ensayo de Tracción Indirecta**

#### *3.4.4.1 Acondicionamiento de probeta*

Cada probeta a ensayar se debe mantener a una temperatura controlada, hasta que haya alcanzado la temperatura de ensayo. Este proceso de climatización es de aproximadamente dos horas y se realiza en el mismo equipo utilizado para el posterior ensayo de Tracción Indirecta.

Para el presente estudio, es exigido por las ETE N°1A que el ensayo se realice a 15 [°C] de temperatura, por lo que las 4 probetas son acondicionadas a dicha temperatura.

#### *3.4.4.2 Posicionamiento de probeta*

El procedimiento del posicionamiento de la probeta se debe realizar con precisión, siguiendo los siguientes pasos.

1. Colocar la probeta centrada sobre la pletina inferior de carga con uno de sus diámetros marcados en posición vertical. Con la palanca de alineación hacia abajo, se verifica que las barras transversales se encuentren correctamente paralelas. Para esto es necesario que se verifique la horizontalidad con un nivel de burbuja.
2. Una vez posicionada la probeta respecto a uno de sus diámetros, colocar el bastidor sobre las barras transversales, verificando que ambos ajustes de LVDT queden en el diámetro trazado, al igual que las mordazas de fijación. Verificar la horizontalidad con nivel de burbuja.
3. Colocar cruceta sobre la probeta, verificando que quede centrada. Luego, se procede al apriete de las cuatro mordazas de fijación. Se debe tener cuidado de no efectuar un apriete excesivo de las mordazas.
4. Finalmente, una vez posicionada la probeta con los dispositivos indicados, se coloca el conjunto dentro del equipo. Se introducen ambos transductores de LVDT cuidadosamente por los orificios de ajuste LVDT del bastidor.

#### *3.4.4.3 Uso de software ITSM*

Para ejecutar la prueba de ensayo se utiliza Software ITSM instalado en computador conectado a equipo CRT-HYD 25-II. El software es sencillo y se desarrolla de una

manera progresiva lógica. A medida que avanza, solicita datos y proporciona instrucciones para el buen desarrollo del ensayo.

Para más detalles del procedimiento, recurrir a Memoria “Determinación de Módulo de Rigidez por medio de Tracción Indirecta sobre probetas cilíndricas bajo Norma Española UNE-EN 12697-26:2006” [24].

A continuación se presenta el procedimiento de manera breve.

1. Iniciar software ISTM en computador conectado a equipo. Clic en *ITSM Test*.
2. Aparece ventana que indica que se debe verificar que la probeta esté correctamente posicionada y que la palanca del soporte de alineación de LVDT debe encontrarse de manera horizontal. Clic en *Continuar*.
3. Se da la opción de crear un archivo para guardar datos de prueba, se debe asignar nombre del archivo. Clic en *Guardar*.
4. Ingresar nombre del operador, según las opciones, seleccionar, añadir o quitar operador. Se indica que se debe tomar nota de las dimensiones de la probeta y de la referencia de la probeta.
5. Ingresar referencia para la probeta. Clic en *OK*.
6. Ventana solicita datos a ingresar, como:
  - Temperatura de Ensayo, en [°C].
  - Diámetro de la Probeta, en [mm].
  - Espesor de la Probeta, en [mm].
  - Coeficiente de Poisson, con valor de 0,35.
  - Tiempo de subida deseado, en [ms].
  - Deformación Horizontal deseada, en [microns].
  - Número de pulsos de preparación.

Ingresar datos y dar Clic en *Continuar*.

7. Ingresar densidad real ( $G_{mb}$ ) en [kg/m<sup>3</sup>] de la probeta a ensayar. Clic en *OK*.
8. Ventana solicita datos a ingresar necesarios para el informe de la prueba, como:
  - Número de serie del informe.
  - Nombre del cliente.
  - Fecha de emisión.
  - Nombre de la persona responsable.
  - Tipo y origen de la mezcla bituminosa.
  - Método de fabricación de la mezcla bituminosa.
  - Método de compactación.
  - Método de determinación de densidad.
  - Condiciones de almacenaje.

Ingresar datos y dar Clic en *Continuar*.

9. Dos cuadros de diálogo consecutivos, alertan la verificación del correcto posicionamiento de la probeta. Ajustar barras transversales y levantar palanca. Clic en *Aceptar*.
10. Posicionar el conjunto debajo del actuador de carga.
11. Pide usar flechas para bajar el actuador hasta que esté entre 5 y 10 [mm] sobre la semi-bola. Una vez en su sitio, Clic en *Hacer contacto*.
12. Ajustar LVDTs. Ambas flechas deben cambiar de color blanco a rojo. Clic *Continuar*.
13. Subir palancas y luego esperar estabilización de temperatura. Clic en *Aceptar*.

14. Inicio a fase de acondicionamiento. Clic *Continuar*.
15. Verificar que los LVDT se encuentre en posición (flechas rojas). Clic *Continuar*.
16. Dar inicio al ensayo en sí. Clic en *Comenzar ensayo*.
17. Entrega gráficas y datos como:
  - Número de pulso.
  - Fuerza vertical, en [kN].
  - Esfuerzo horizontal [kPa].
  - Tiempo de subida, en [ms].
  - Deformación horizontal, en [microns].
  - Factor de área de carga.
  - Módulo Resiliente Medido y ajustado.
  - Promedio de cada parámetro.

Clic en *Continuar*.

18. Ventana, pide girar la probeta en 90° para realizar ensayo en segundo diámetro. Proceder con el giro y hacer Clic en *OK*.
19. Pide verificar nuevamente que los LVDT estén en rango correcto. Luego repetir procedimiento desde punto 9 al punto 17.
20. Se obtienen gráficas y datos al igual que en punto 17. Clic en *Imprimir*. Se genera un informe con los datos del ensayo en formato PDF.

#### 3.4.4.4 Consideraciones para correcta Medición de Módulo de Rigidez

Algunos puntos importantes para obtener un resultado correcto, son los siguientes:

- Se aplican al menos, 10 pulsos de carga para acondicionamiento y 5 de medición, para que el equipo se ajuste a la magnitud de carga y a su duración.
- Si la deformación diametral horizontal es menor a 3 [μm] o mayor de 20 [μm], significa que la temperatura de ensayo o el método de ensayo no son adecuados.
- Se recomienda un tiempo de carga de  $124 \pm 4$  [ms] y  $7 \pm 2$  [μm] como valor adecuado de deformación horizontal para una probeta de 150 [mm] de diámetro.
- Si la tensión vertical es menor que 0,5 [kN], significa que la temperatura del ensayo o el método de ensayo no son adecuados.
- El valor medio del Módulo de Rigidez de cada ensayo está comprendido entre +10% o -20% del valor medio registrado para el primer ensayo. Si la diferencia entre los valores no se encuentra en el rango anteriormente señalado, los resultados se deben rechazar.

### 3.5 MÓDULO DINÁMICO

Para el desarrollo de la fase experimental del ensayo de Módulo Dinámico, se cumplen etapas previas al ensayo en sí, tales como: (1) Confección de probetas cilíndricas a partir de mezcla diseñada previamente; (2) Realización de ensayo para determinar la densidad de la probeta; y (3) Conocer el equipo a utilizar y los dispositivos necesarios. Para finalmente dar paso a la ejecución de Ensayo de Módulo Dinámico.

El ensayo se realiza según la Norma AASHTO T342-11 (Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)) [25].

#### 3.5.1 Confección de probetas

##### 3.5.1.1 Preparación de Mezcla para ensayo de Módulo Dinámico

La confección de probetas cilíndricas se realiza a partir de la mezcla diseñada previamente. Para dicha mezcla se sigue el procedimiento detallado en la sección 3.2.1 Preparación de mezcla.

##### 3.5.1.2 Fabricación de Probeta para ensayo de Módulo Dinámico

La compactación de las probetas para el ensayo de Módulo de Dinámico se desarrolla según el procedimiento descrito en la sección 3.2.2 Fabricación de probetas, salvo de un punto que varía de tal procedimiento.

- Punto 2 del procedimiento, dice: Ajustar el número de giros de diseño ( $N_{\text{diseño}}$ ) en el compactador, el cual por requerimientos del proyecto, según ETE N°1A, corresponde a 75 giros.

Como se menciona en esta Memoria, las probetas pueden ser compactadas de acuerdo al número seleccionado de giros o hasta llegar a una altura determinada de la muestra. Para la preparación de la mezcla para el ensayo de Módulo Dinámico, cambia a:

- Ajustar el equipo SGC, según la altura deseada.

##### 3.5.1.3 Preparación de probetas para ensayo de Módulo Dinámico

Según normativa, la cantidad mínima de probetas necesarias para ensayar y para obtener resultados de Módulo de Rigidez, es de 2 probetas. Cantidad utilizada para este trabajo, la cual designa la precisión del ensayo.

Una vez obtenidas las probetas, es necesario que sean preparadas para el ensayo, cumpliendo las siguientes condiciones:

- Las probetas cilíndricas compactadas son de un diámetro de 150 [mm] con una altura de 180 [mm] (Figura 3-14 izquierda). Posteriormente, mediante testiguera (Figura 3-14 derecha) y cortes con sierra se obtiene un núcleo de 100 [mm] de diámetro con 150 [mm] de altura.

Para el corte es necesario marcar la altura deseada, utilizando cinta engomada para una mayor precisión. Se debe tener especial cuidado en que la muestra resultante cumpla con lados lisos, paralelos y libres de ranuras.



Figura 3-14: Probeta cilíndrica compactada (izquierda) y testiguera en funcionamiento (derecha).

- Los extremos de las probetas deben ser aserradas y deben cumplir tolerancias como: no deben superar los  $\pm 0,005$  [mm] de ondulación medida a través de cualquier diámetro y las caras de la probeta deben ser perpendiculares al eje, a no más de 1 grado de desviación.  
Para cumplir lo anterior, luego de aserrar las caras, éstas son sometidas a una rectificación, como se puede ver en la Figura 3-15. Luego, se verifica mediante medidas y comparador óptico.



Figura 3-15: Equipo de rectificación en funcionamiento.

- Al preparar las mezclas se determina el Contenido de Vacíos de aire ( $V_a$ ) según normativa. Se deben rechazar las probetas que difieran en más de 0,5 % respecto al contenido de  $V_a$  determinado en diseño.  
Se debe considerar que, al sacar el núcleo o testigo de la probeta de 150 [mm] de diámetro, éste disminuye su cantidad de vacíos de aire entre 1,5% a 2,5%.

### 3.5.2 Ensayo de densidad real para núcleo

Se calcula la densidad real de la probeta, equivalente a la gravedad específica bruta ( $G_{mb}$ ), parámetro medido sobre el núcleo extraído, que se debe encontrar a temperatura ambiente. Además, se calcula el porcentaje de Vacíos de aire, que debe cumplir con requisito mencionado anteriormente.

Se determina según la norma AASHTO T-166 o M.C 8.302.38.

El procedimiento es el descrito en la sección 3.4.2 Ensayo de densidad real para mezcla compactada.

### 3.5.3 Equipo y dispositivos utilizados en ensayo de Módulo Dinámico

Al igual que para el ensayo de Módulo de Rigidez, el equipo utilizado es el servo hidráulico marca Cooper Technology (CRT-HYD 25-II). El cual posee una cabina térmica la cual puede ser ambientada en un rango de temperaturas de -15 a 60 [°C] y además de su sistema hidráulico de carga, el cual aplica cargas de 50 a 200 [MPa] a frecuencias entre 0 hasta 70 [Hz] [26].

#### 3.5.3.1 Dispositivo CRT-SPTLV

El CRT-SPTLV es un equipamiento diseñado para ser utilizado junto al equipo servo hidráulico, el cual tiene como función el montaje y configuración de los LVDT sobre la probeta a ensayar.

A las probetas se le deben pegar 4 topes metálicos con un pegamento epóxico, las cuales soportarán los LVDT a través de soportes plásticos. El dispositivo antes mencionado, cumple con la función de dejar los topes ubicados correctamente en la probeta, utilizando aire comprimido en contra de los topes mientras el pegamento se seca.

En la Figura 3-16, se muestra la probeta ubicada sobre el dispositivo, previo al pegado de los topes y la probeta con topes pegados y soportes plásticos ubicados.



Figura 3-16: Probeta sobre dispositivo (izquierda) y probeta con topes y soportes plásticos (derecha).

### 3.5.4 Ejecución de Ensayo Módulo Dinámico

#### 3.5.4.1 Posicionamiento de probeta

Al tener la probeta con los 4 topes metálicos pegados y los cuatro soportes plásticos ubicados y fijos a cada tope, el conjunto está listo para ser ubicado dentro del equipo.

Previo a introducir la probeta en el equipo, se preparan 2 membranas de teflón por probeta, con la medida del diámetro de la probeta. Dichas membranas son utilizadas como reductoras de fricción.

También, se debe instalar el pistón de carga en el equipo, el cual se atornilla al sistema de carga desde el interior del equipo hacia fuera, por un compartimento en la parte superior de la Cabina Térmica.

A continuación, para el posicionamiento de la probeta dentro del equipo, se siguen los siguientes pasos: (1) ubicar un disco de acero en el centro del equipo, alineado con el pistón de carga; (2) sobre el disco colocar una de las membranas de teflón; (3) luego, sobre la membrana ubicar la probeta con topes y soportes plásticos; (4) ubicar la segunda membrana de teflón sobre la probeta; y (4) finalizar con el segundo disco de acero, con una semi-bola sobre él.

Luego de posicionar la probeta, se ubican los LVDT a cada lado de la probeta, posteriormente se cierra la puerta del equipo. Finalmente, se ingresa la temperatura deseada en el controlador.

#### 3.5.4.2 Procedimiento de ensayo y uso de Software TP-62

El ensayo consiste en aplicar una carga tipo Harvesine de forma axial y de compresión a distintas temperaturas (-10°C, 4°C, 21°C, 37°C y 54°C) y por cada temperatura la probeta se somete a distintas frecuencias de carga (0,1 [Hz], 0,5 [Hz], 1, 5 [Hz], 10 [Hz] y 25 [Hz]), aplicando una carga que mantenga la deformación en el rango elástico. Finalmente con el esfuerzo aplicado y la deformación recuperable se calcula el módulo dinámico.

Se debe colocar la muestra de ensayo en la cámara térmica del equipo y dejar que se equilibre la temperatura de ensayo especificada  $\pm 0,3$  [°C]. Para lograr la temperatura especificada, el tiempo mínimo para lograr el equilibrio se detalla en la Tabla 3-33.

Tabla 3-33: Tiempos recomendados de equilibrio [25].

Temperatura del espécimen [°C]	Tiempo desde temperatura ambiente (25 [°C]) [h]	Tiempo desde temperatura de ensayo previo [h]
-10	Toda la noche	Toda la noche
4	Toda la noche	4 horas o toda la noche
21	1	3
38	2	2
54	3	1

Aplicar una carga de contacto, igual al 5% de la carga dinámica que se aplica a la muestra.

Aplicar una carga sinusoidal tipo Haversine a la muestra de una manera cíclica. La carga dinámica se debe ajustar para obtener deformaciones axiales entre 50 y 150 microstrain. La carga dinámica oscila entre 15 y 2800 [kPa] y mientras temperaturas más frías, es necesaria una mayor capacidad de carga.

El equipo utilizado tiene un rango de aplicación de cargas entre los 50 [kPa] y 2000 [kPa], por lo que los rangos de carga son modificados. En la Tabla 3-34, se presenta el rango recomendado por normativa y el rango utilizado en laboratorio, propuesto por Mauricio Toro [27].

Tabla 3-34: Rangos de carga dinámica.

Temperatura [°C]	AASHTO T342-11 [17]	Memoria M. Toro UTFSM
-10	1400 a 2800	1800 a 2000
4	700 a 1400	800 a 1200
21	350 a 700	100 a 350
37	140 a 250	50 a 140
54	35 a 70	50

Las pruebas a cada temperatura comienzan con mayor frecuencia de carga, hasta llegar a la más baja. La cantidad de ciclos con que son cargadas las probetas a cada frecuencia, se presentan en la Tabla 3-35.

Tabla 3-35: Número de ciclos para la secuencia de ensayo [25].

Frecuencia [Hz]	Número de Ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

El uso del software TP-62 utilizado para el desarrollo del ensayo de Módulo Dinámico, se ejecuta según los siguientes pasos:

1. Iniciar software TP-62 en computador conectado a equipo. Clic en *ITSM Test*.
2. Aparece ventana que indica que se debe verificar que el sistema hidráulico se encuentre encendido. Clic en *OK*.
3. Cuadro de diálogo requiere ingresar parámetros, como:

- Nombre del espécimen
- Temperatura de ensayo [°C]
- Tope de carga dinámica [kPa]
- Límite de máxima deformación axial [%]
- Acondicionamiento
- Diámetro de probeta [mm]
- Distancia entre apoyos de LVDT [mm]

Ingresar datos. Clic en *Continuar*.

4. Indicar dónde guardar el archivo de salida.
5. Ventana de posición de pistón de carga. Con botones 'UP' y 'DOWN' se posiciona el pistón de carga cerca de la probeta y se presiona botón 'MAKE CONTACT' para que el pistón baje controladamente hasta hacer contacto con la probeta. Clic en *Continuar*.
6. Ventana muestra deformación de LVDT en milímetros y la lectura de celda de carga en Newton, la cual no debe pasar de los 100 Newton. Verificar que LVDT se encuentre en posición. Clic en *Continuar*.
7. Comienza el ensayo, ventana muestra la ubicación en el barrido de frecuencias para la temperatura de ensayo, gráficas comparativas entre la carga aplicada y la respuesta medida en la probeta, y una serie de datos que serán entregados en el informe final.
8. Al finalizar el ensayo aparece mensaje '*Ensayo terminado exitosamente*'. Clic en *OK*.
9. Verificar la existencia de archivo de texto (.txt) en la ubicación entregada previamente. El archivo cuenta con los resultados de Módulo Dinámico para cada frecuencia.
10. Repetir todo el procedimiento para cada temperatura de ensayo.

#### 3.5.4.3 Consideraciones para correcta Medición de Módulo Dinámico

- La carga dinámica se debe ajustar para obtener deformaciones axiales entre 50 y 150 microstrain, ya que a esta deformación la probeta se comporta como un material viscoelástico lineal.
- Si se determina que el rango de la deformación permanente acumulado es mayor que 1500 micro unidades de tensión, la muestra debe ser desechada al final del ensayo y se debe reducir el nivel de carga máxima a la mitad.

#### 3.5.4.4 Curva Maestra y Factor de desplazamiento

Con los resultados obtenidos en el ensayo se construye una curva maestra, la cual se utiliza para comparar el desempeño de la mezcla a distintas frecuencias de cargas a una temperatura de referencia, la temperatura ampliamente utilizada y la que se utiliza en este estudio es la de 21 [°C].

Las curvas maestras se generan utilizando el principio de superposición de tiempo-temperatura, el cual permite que los datos obtenidos en laboratorio a diferentes frecuencias sean desplazados horizontalmente en relación a una temperatura de referencia, alineando así las diversas curvas para formar una curva maestra única.

La curva maestra se obtiene a través del ajuste a una ecuación sigmoideal propuesta por Mirza y Witczak, según la Ecuación 3-23.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(t_r))}}$$

*Ecuación 3-23: Ecuación sigmoideal de Mirza y Witczak.*

Donde:

$|E^*|$ : Módulo dinámico.

$t_r$ : Tiempo de carga a la temperatura de referencia (tiempo reducido).

$\delta$ : Valor mínimo del módulo.

$\delta + \alpha$ : Valor máximo del módulo.

$\beta, \gamma$ : Parámetros que describen la forma de la función sigmoideal.

En la Ecuación 3-23, el parámetro  $\delta$  influye en la inclinación de la función y  $\beta$ , la posición horizontal del punto de inflexión. Además,  $\delta$  y  $\alpha$  dependen de la granulometría del agregado, contenido de ligante y contenido de vacíos de aire. Los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$ , por otra parte, dependen de las características del aglomerante asfáltico y la magnitud de  $\delta$  y  $\alpha$  [27].

Mientras que, el factor de desplazamiento se define como el desplazamiento necesario de los datos a una temperatura dada. El factor se expresa según la Ecuación 3-2.

La frecuencia reducida, se expresa con la Ecuación 3-24.

$$f_r = f * a(T) \rightarrow \log(f_r) = \log(f) + \log(a(T))$$

De otra manera,

$$t_r = \frac{t}{a(T)} \rightarrow \log(t_r) = \log(t) - \log(a(T))$$

*Ecuación 3-24: Factor de desplazamiento.*

Donde:

$f_r$ : frecuencia reducida ( frecuencia de carga a temperatura de referencia).

$f$ : frecuencia de carga.

$a(T)$ : factor de corrección horizontal (shift factor).

$T$ : tiempo de carga.

$t_r$ : tiempo de carga a la temperatura de referencia.

Durante el presente trabajo, se construye la curva ajustando la función sigmoideal a resultados de módulo dinámico obtenidos en el laboratorio utilizando una regresión no lineal de mínimos cuadrados, lo que se puede resolver utilizando la función Solver en Excel.

#### 3.5.4.5 Curva Isócrona

Además de la curva maestra, una manera de analizar los resultados del ensayo de Módulo Dinámico, es graficando una curva isócrona, que es simplemente la gráfica de algunas funciones viscoelásticas, como el Módulo Dinámico frente a la temperatura, con frecuencia de carga constante, según Christensen y Anderson [28].

### 3.5.4.6 Velocidad del vehículo y tiempo de solicitación en un punto

Barksdale, en 1971, investigó sobre los tiempos de pulsación en diferentes puntos de los pavimentos asfálticos. Donde el pulso puede ser aproximado por una función de triángulo o de Haversine, como se muestra en la Figura 3-17.

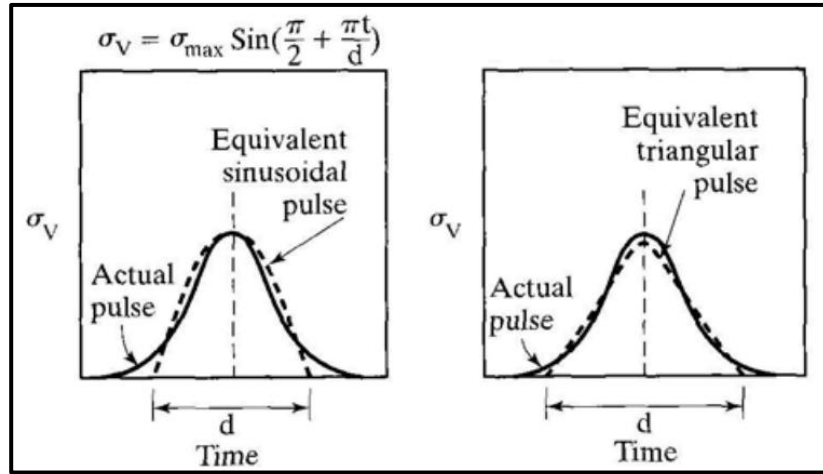


Figura 3-17: Equivalente de pulso haversine y pulso triangular [29].

Después de considerar los efectos inerciales y viscosos basados en los pulsos verticales medidos en la carretera de prueba AASHTO, concluye que el tiempo de pulso puede estar relacionado con la velocidad y profundidad del vehículo, según la gráfica que se muestra en la Figura 3-18 [29].

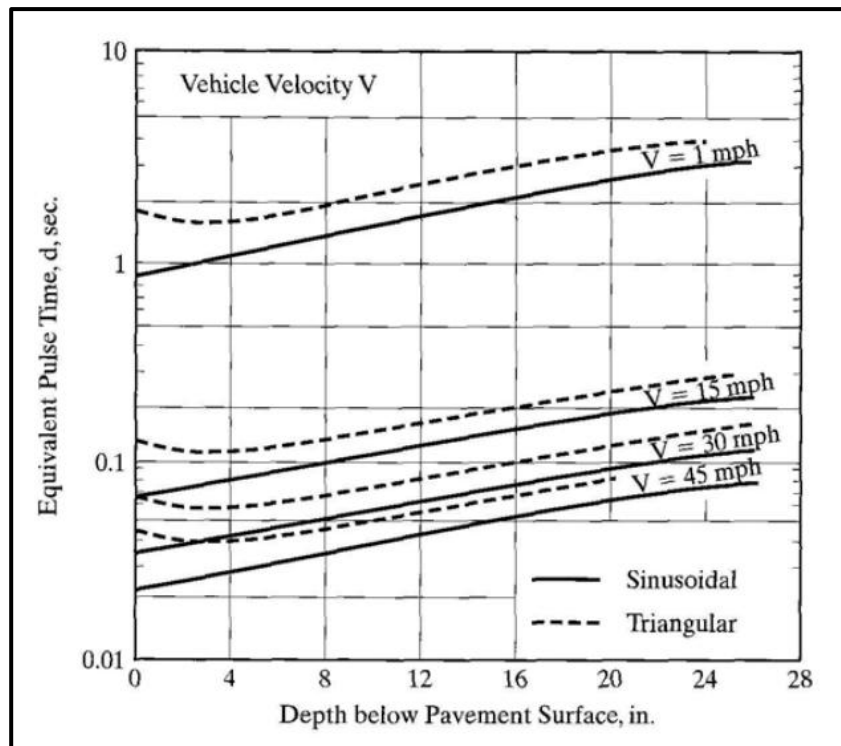


Figura 3-18: Pulso de esfuerzo vertical bajo una carga haversine o triangular (Barksdale, 1971) [29].

El gráfico muestra como a mayor velocidad del vehículo, el tiempo de aplicación de la carga disminuye, también queda claro que simulando el esfuerzo vertical con una onda triangular, los tiempos de aplicación aumentan. A su vez, se puede observar que el tiempo de duración de la carga aumenta con la profundidad del pavimento.

En 1974, Brown formuló una ecuación que relaciona el tiempo de carga con la velocidad del vehículo y el perfil de profundidad del pavimento. El tiempo de carga se consideró como el promedio de los tiempos de pulso de los cinturones en tres direcciones como se obtiene de la teoría elástica de capas. Se define la relación entre el tiempo de carga, la profundidad y la velocidad del vehículo según la Ecuación 3-25 [30].

$$\log(t) = 0,5d - 0,2 - 0,94\log(v)$$

*Ecuación 3-25: Determinación de tiempo de carga.*

Donde:

- t: tiempo de carga [s].
- d: profundidad de pavimento [m].
- v: velocidad de vehículo [km/h].

Brown demostró que el tiempo de carga calculado a partir de la Ecuación 3-25, es igual a 0,48 veces el tiempo de carga definido por Barksdale. Es mediante la mencionada ecuación, que se puede comprobar el resultado obtenido a partir del gráfico de Barksdale.

El gráfico de Barksdale brinda el tiempo o duración de una carga en función de la velocidad y profundidad.

Recordar que la frecuencia puede ser calculada como el inverso del período, que en este caso corresponde a la duración del pulso de carga. Por lo que se puede decir que, la frecuencia aumenta con la velocidad y disminuye a mayor profundidad.

## 3.6 RESULTADOS

### 3.6.1 Módulo de Rigidez

#### 3.6.1.1 Mezcla a compactar

A partir de las ecuaciones: Ecuación 2-5: Porcentaje de vacíos de aire., la Ecuación 3-8: Determinación de  $G_{mb}$  estimada. y Ecuación 3-9: Determinación de factor de corrección., se logra determinar la masa a utilizar en la mezcla a compactar. Los resultados se presentan en la Tabla 3-36.

Tabla 3-36: Masa de mezcla a compactar

Muestra	Cantidad de Asfalto [%]	$G_{mm}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Vacíos de aire [%]	Masa a utilizar [g]
Mezcla A	5,4	2503	3,5	5553
Mezcla B				

#### 3.6.1.2 Datos de compactación de probetas

La compactación es configurada por altura, la cual es de 134 [mm] para cada probeta. A continuación, en Tabla 3-37, se presentan datos pertinentes a la compactación.

Tabla 3-37: Datos de compactación de probetas

Muestra	Fecha de compactación	Número de giros	Altura final [mm]
Probeta A	14 julio 2016	196	134
Probeta B	14 julio 2016	214	134

#### 3.6.1.3 Gravedad Específica Bruta $G_{mb}$ y % Vacíos de aire en probetas compactadas

Los resultados de  $G_{mb}$  y de  $V_a$  para las probetas compactadas con porcentaje de absorción de agua ( $A_{ab}$ ) menor a 2%, se presentan en la Tabla 3-38.

Tabla 3-38: Datos de  $G_{mb}$  y datos necesarios para su obtención

Muestra	A [g]	B [g]	C [g]	$A_{ab}$ [%]	$G_{mb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$V_a$ [%]
Probeta A	5544,3	5560,7	3252,3	0,71	2402	4,0
Probeta B	5543,1	5558,4	3254,1	0,66	2406	3,9

A: Masa probeta al aire.  
 B: Masa probeta saturada y superficialmente seca.  
 C: Masa probeta sumergida en agua.

### 3.6.1.4 Resultado de Módulo de Rigidez medido por diámetro

Para el presente estudio, las ETE N°1A, requiere que el ensayo se realice a 15 [°C].

Por normativa, se recomienda un tiempo de carga de  $124 \pm 4$  [ms] y como valor adecuado de deformación horizontal para una probeta de 150 [mm] de diámetro, se espera un valor de  $7 \pm 2$  [ $\mu\text{m}$ ]. Más detalles se encuentran en ANEXO B: "Ensayo de Módulo de Rigidez".

Tabla 3-39: Resultados de Módulo Medido y Módulo Ajustado en cada diámetro aplicado.

Probeta	Ensayo aplicado en	$G_{mb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura [°C]	Tiempo de carga [ms]	Deformación horizontal [ $\mu\text{m}$ ]	Módulo Medido [MPa]	Módulo Ajustado [MPa]
A1	1 <sup>er</sup> diámetro	2402	15	125	6,9	8012	8090
	2 <sup>do</sup> diámetro			124	7,0	7778	7800
A2	1 <sup>er</sup> diámetro	2402		123	6,9	8742	8807
	2 <sup>do</sup> diámetro			126	7,0	8743	8808
B1	1 <sup>er</sup> diámetro	2406		125	6,8	8567	8650
	2 <sup>do</sup> diámetro			125	6,9	8799	8842
B2	1 <sup>er</sup> diámetro	2406		124	6,8	10135	10201
	2 <sup>do</sup> diámetro			125	7,0	9767	9873

### 3.6.1.5 Resultado final de Módulo de Rigidez para cada probeta y su variación

El valor medio del Módulo de Rigidez de cada ensayo se debe encontrar entre +10% o el -20% del valor medio registrado para el primer ensayo. El valor medio de los dos ensayos se registra como el Módulo de Rigidez de la probeta.

Tabla 3-40: Resultados de Módulo de Rigidez y Módulo de rigidez Ajustado.

Probeta	Ensayo aplicado en	Módulo Medido [MPa]	Variación Módulo Medido [%]	Módulo Ajustado [MPa]	Variación Módulo Ajustado [%]	Módulo de Rigidez [MPa]	Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]
A1	1 <sup>er</sup> diámetro	8012	3%	8090	4%	7895	7945
	2 <sup>do</sup> diámetro	7778		7800			
A2	1 <sup>er</sup> diámetro	8742	0%	8807	-0,011%	8743	8808
	2 <sup>do</sup> diámetro	8743		8808			
B1	1 <sup>er</sup> diámetro	8567	-3%	8650	-2,2%	8683	8746
	2 <sup>do</sup> diámetro	8799		8842			
B2	1 <sup>er</sup> diámetro	10135	4%	10201	3%	9951	10037
	2 <sup>do</sup> diámetro	9767		9873			

### 3.6.2 Módulo Dinámico

Según el numeral 9.8 de la norma utilizada, el número de probetas a ensayar depende del número de LVDT's utilizados y la precisión que se desea. En este caso se utilizan 2 LVDT's por cada probeta, definiendo así un límite en la precisión de los resultados de  $\pm 18\%$ , precisión que se cumple para las probetas gemelas ensayadas.

Previo a los resultados del ensayo de Módulo Dinámico, se presentan resultados pertinentes a la probeta a ensayar en la Tabla 3-41. Más detalles se encuentran en ANEXO C: "Ensayo de Módulo Dinámico".

Tabla 3-41: Características de probetas a ensayar.

Probeta	Diámetro [mm]	Largo [mm]	$G_{mm}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$G_{mb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	% Va
Probeta M5	100	151	2503	2321	7,3
Probeta M8	100	150	2503	2323	7,2

#### 3.6.2.1 Datos obtenidos en ensayo de Módulo Dinámico

Tabla 3-42: Datos obtenidos en ensayo de MD.

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	E*  [MPa] Probeta M8	E*  [MPa] Probeta M5	E*  [MPa] Promedio	Desviación estándar (S)	Coefficiente de Variación
<b>-10</b>	25	12849,1	11229,5	<b>12039,3</b>	1145,2	9,5%
	10	12792,4	11323,3	<b>12057,9</b>	1038,8	8,6%
	5	12504,4	11158,9	<b>11831,6</b>	951,4	8,0%
	1	11477,3	9990,3	<b>10733,8</b>	1051,4	9,8%
	0,5	10945,5	9613,3	<b>10279,4</b>	942	9,2%
	0,1	9803	8548,3	<b>9175,7</b>	887,2	9,7%
<b>4</b>	25	8518	7557,1	<b>8037,5</b>	679,4	8,5%
	10	8153,8	7172,9	<b>7663,4</b>	693,6	9,1%
	5	7686,6	6845	<b>7265,8</b>	595,1	8,2%
	1	6435,9	5776,5	<b>6106,2</b>	466,2	7,6%
	0,5	5882,5	5383,9	<b>5633,2</b>	352,6	6,3%
	0,1	4664,9	4411,8	<b>4538,3</b>	179	3,9%
<b>21</b>	25	3717,1	3426,9	<b>3572</b>	205,2	5,7%
	10	3384,2	3108,4	<b>3246,3</b>	195	6,0%
	5	2987,8	2765,4	<b>2876,6</b>	157,3	5,5%
	1	2103,8	2085,2	<b>2094,5</b>	13,2	0,6%
	0,5	1803,4	1839,9	<b>1821,7</b>	25,8	1,4%
	0,1	1191,1	1332,3	<b>1261,7</b>	99,9	7,9%

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	E*  [MPa] Probeta M8	E*  [MPa] Probeta M5	E*  [MPa] Promedio	Desviación estándar (S)	Coefficiente de Variación
38	25	1193,6	1203,7	1198,7	7,1	0,6%
	10	1082,6	1029,4	1056	37,6	3,6%
	5	889,3	892,9	891,1	2,5	0,3%
	1	539,4	609,6	574,5	49,7	8,6%
	0,5	433,4	497,9	465,7	45,6	9,8%
	0,1	296,9	345,6	321,2	34,4	10,7%
54	25	559,4	545,7	552,5	9,7	1,8%
	10	431	467,6	449,3	25,9	5,8%
	5	356,8	405,8	381,3	34,7	9,1%
	1	241,5	278,5	260	26,2	10,1%
	0,5	205,4	247,9	226,6	30	13,3%
	0,1	151	170,5	160,7	13,7	8,5%

A partir de los datos antes presentados, en la Tabla 3-42, se grafica el promedio de Módulo Dinámico versus la frecuencia para cada temperatura, en escala logarítmica, como se muestra en la Figura 3-19.

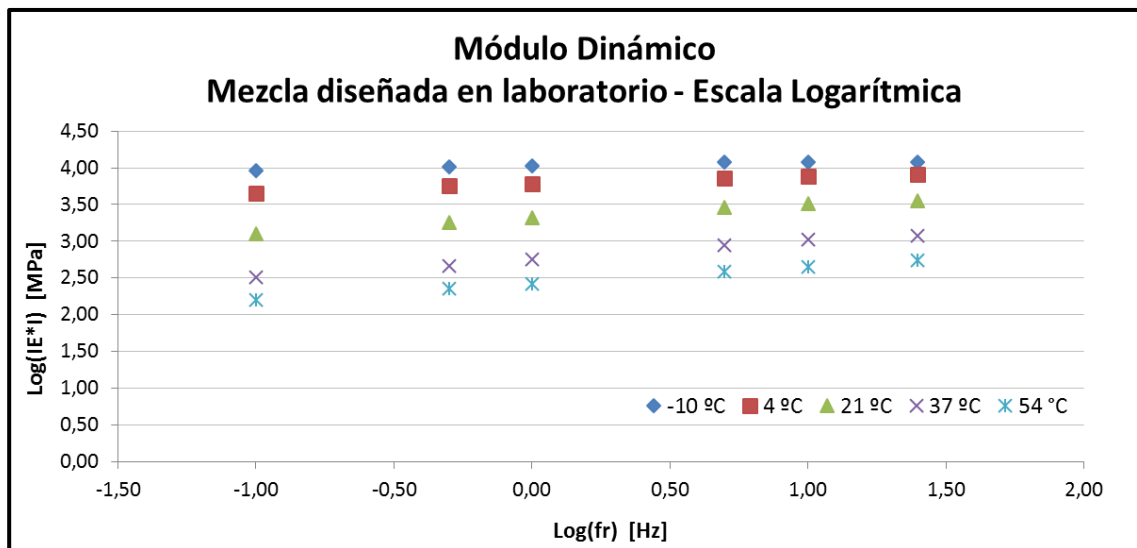


Figura 3-19: Resultados Módulo Dinámico,  $|E^*|$  versus frecuencia.

### 3.6.2.2 Curva Maestra resultante

Al aplicar el factor de desplazamiento, los datos obtenidos a las diferentes temperaturas (-10 [°C], 4 [°C], 21 [°C], 37 [°C] y 54 [°C]) y frecuencias, son ajustados a una temperatura de referencia de 21 [°C], por lo que se logran alinear las diferentes curvas, formando una curva única.

El proceso de formación de curva maestra queda graficado en la Figura 3-20.

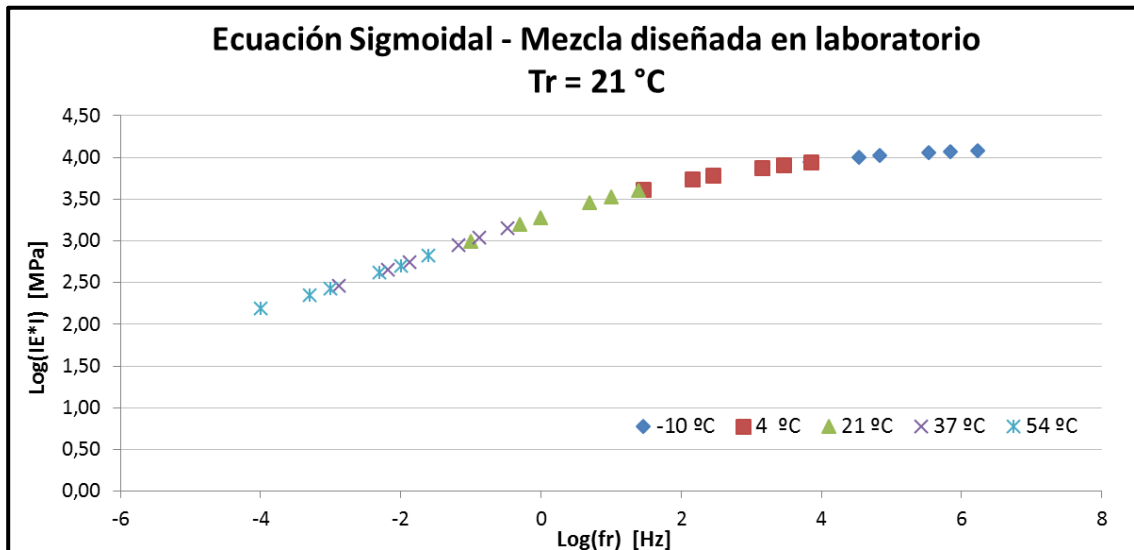


Figura 3-20: Formación de curva maestra por ecuación sigmoial.

Al suavizar la función formada por la ecuación Sigmoial mostrada en la Figura anterior, se obtiene la Curva Maestra, como se muestra en la Figura 3-21.

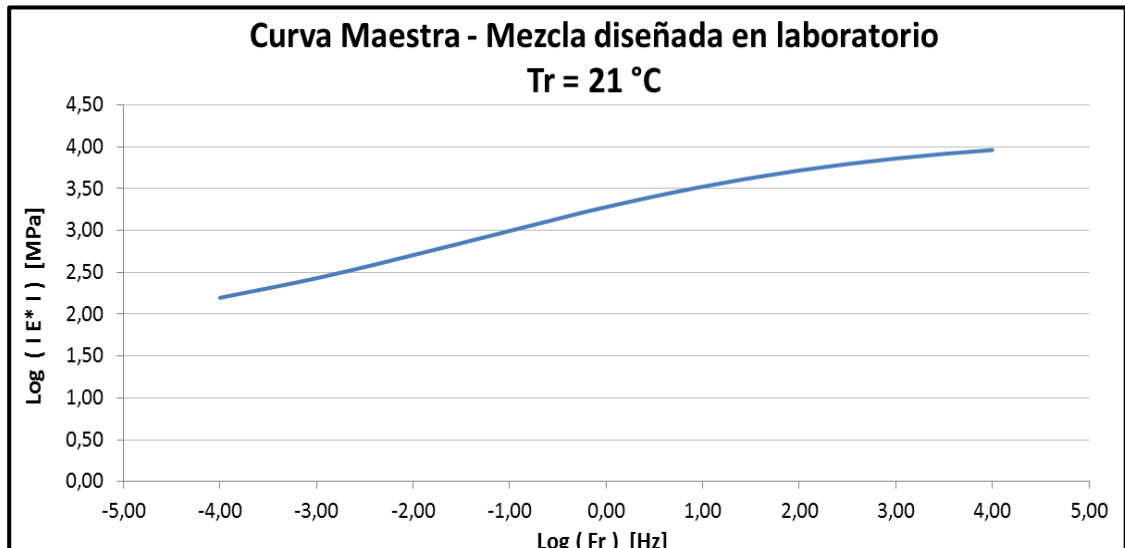


Figura 3-21: Curva Maestra, con temperatura de referencia de 21 [°C].

### 3.6.2.3 Curva Isócrona resultante

Además de la curva maestra, una manera de analizar los resultados del ensayo de Módulo Dinámico, es graficando una curva isócrona.

Las Curva Isócrona de la Figura 3-22, muestran el Módulo Dinámico en Megapascuales versus temperatura en grados Celsius, para 3 frecuencias fijas (13 [Hz], 30 [Hz] y 50 [Hz]).

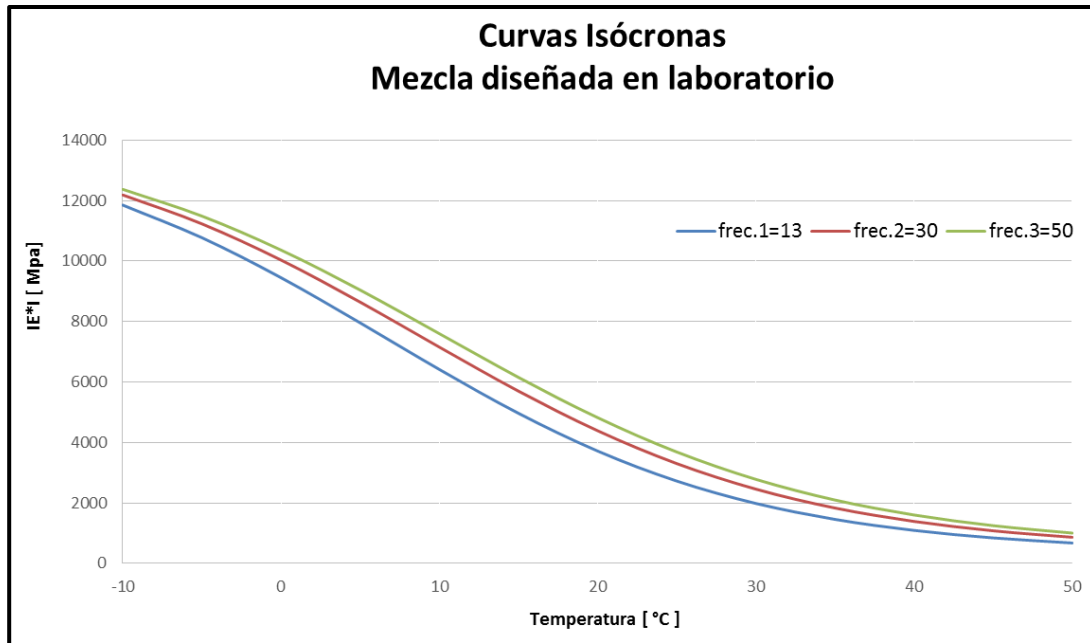


Figura 3-22: Curvas Isócronas, para 3 frecuencias fijas.

#### 3.6.2.4 Resultados según velocidad

La carpeta asfáltica del proyecto tiene una profundidad de 160 [mm], para obtener resultados se debe medir el tiempo del pulso en la mitad de la profundidad de la capa, por lo tanto, se utiliza una profundidad de 80 [mm].

Se evalúan los tiempos de pulso para las velocidades de 24 [km/h], 48 [km/h] y 72 [km/h], equivalentes a 15 [mph], 30 [mph] y 45 [mph] respectivamente.

Utilizando el gráfico de Barksdale y los datos de entrada antes mencionados, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 3-43.

Tabla 3-43: Resultados según gráfico de Barksdale.

Velocidad de vehículo		Profundidad debajo de la superficie del pavimento		Tiempo de pulso estimado Barksdale [s]
[mph]	[km/h]	[in]	[mm]	
15	24	3,15	80	<b>0,072</b>
30	48			<b>0,039</b>
45	72			<b>0,025</b>

A modo de comprobación, se utiliza la fórmula de Brown, que queda expresa en la Ecuación 3-25. Mediante la ecuación, se obtiene el tiempo de pulso en segundos, a la cual se le aplica un factor especificado por Brown, el cual divide el tiempo del pulso obtenido en el gráfico de Barksdale por 0,48.

Los resultados obtenidos a través de dicha ecuación, se muestran en la Tabla 3-44.

Tabla 3-44: Resultados según ecuación y factor de Brown.

Velocidad [km/h]	Profundidad [m]	Tiempo de pulso Brown [s]	Aplicación de factor $0,48^{-1}$ [s]
24	0,08	0,034882	0,0726
48		0,018182	0,0378
72		0,01242	0,0258

Al comprobar los resultados, se define el valor final de tiempo de pulso y frecuencia para cada velocidad, según como se muestra en la Tabla 3-45.

Tabla 3-45: Tiempo de pulso y frecuencia para cada velocidad.

Velocidad [km/h]	Profundidad [m]	Tiempo de pulso [s]	Frecuencia [Hz]
24	0,08	0,07	14
48		0,04	25
72		0,025	40

Finalmente, se obtienen las Curvas Isócronas según velocidad como se muestran en la Figura 3-23, las cuales muestran el Módulo Dinámico en Megapascales versus temperatura en grados Celsius, para 3 velocidades fijas (24 [km/h], 48 [km/h] y 72 [km/h]).

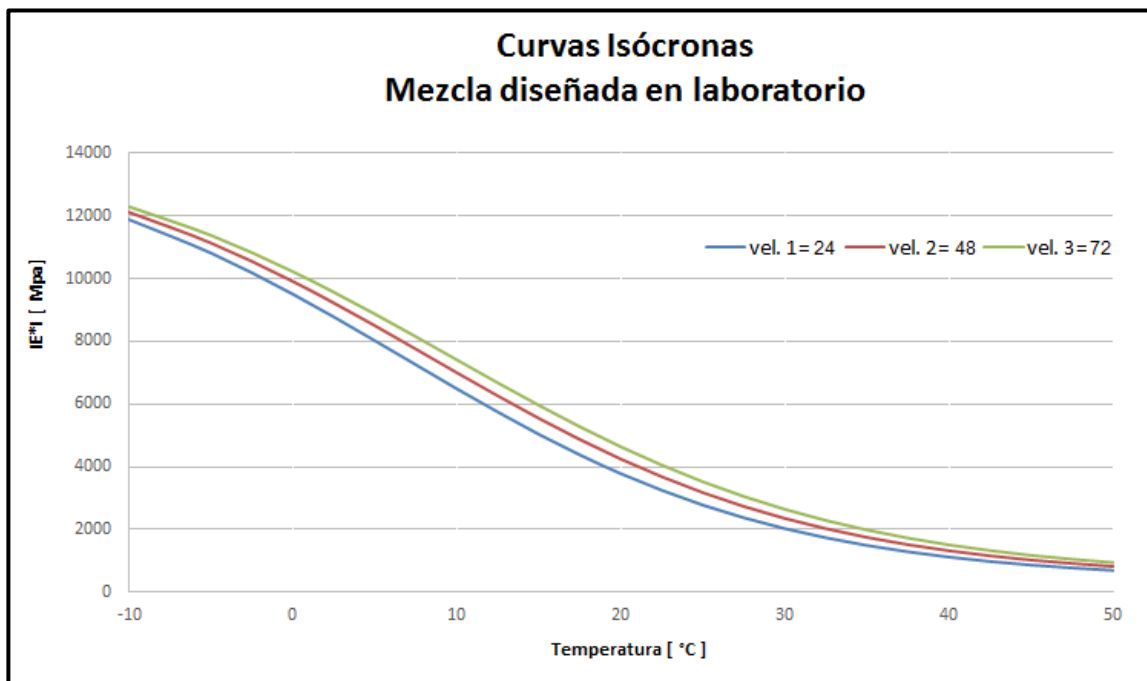


Figura 3-23: Curvas Isócronas, según 3 velocidades fijas.

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 MÓDULO DE RIGIDEZ

Se verifican las condiciones de aceptabilidad para los resultados del ensayo de Módulo de Rigidez, según parámetros descritos en la Norma pertinente [7] y en las “Especificaciones técnicas especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por Superpave” (ETE N°1A). De no ser cumplidas dichas condiciones los resultados deben ser rechazados.

- Como principal objetivo, exigido por ETE N°1A, para un ensayo de Módulo de Rigidez, realizado a 15 [°C], se debe obtener un valor mínimo de 4.000 [MPa]. Exigencia cumplida a cabalidad, según resultados obtenidos para cada una de las probetas ensayadas.
- Los valores de deformación horizontal para una probeta de 150 [mm] de diámetro, deben cumplir el rango de  $7 \pm 2$  [ $\mu\text{m}$ ]. Además, si la deformación es menor a 3 [ $\mu\text{m}$ ] o mayor de 20 [ $\mu\text{m}$ ], significa que la temperatura de ensayo o el método de ensayo no son adecuados. Los resultados obtenidos, se encuentran todos dentro del rango aceptable, siendo 6,9 [ $\mu\text{m}$ ] el menor valor obtenido y el mayor valor es de 7,0 [ $\mu\text{m}$ ] por cada probeta.
- El periodo ascendente, que es el tiempo hasta lograr la carga máxima, debe estar dentro del rango de  $124 \pm 4$  [ms], condición que se cumple para cada una de las probetas sin mayor dificultad. El menor tiempo de carga obtenido por ensayo a cada diámetro de las probetas es de 123 [ms] y el mayor tiempo es de 126 [ms], obteniendo resultados por probeta dentro del rango aceptable como se muestra en la Tabla 4-1.

Los resultados para los parámetros antes mencionados, quedan expuestos en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Resultados de Módulo de Rigidez, obtenidos para cada probeta.

Probeta	Tiempo de carga [ms]	Deformación horizontal [ $\mu\text{m}$ ]	Módulo Medido [MPa]	Módulo Ajustado [MPa]
A1	124,4	6,9	7895	7945
A2	124,8	7,0	8743	8808
B1	124,9	6,9	8683	8746
B2	124,4	6,9	9951	10037

- Los valores de la tensión vertical deben ser mayor que 0,5 [kN], de lo contrario, significa que la temperatura del ensayo o el método de ensayo no son adecuados. La menor tensión vertical ejercida es de 5,37 [kN] durante los ensayos sobre cada diámetro de las probetas, por lo que todas las probetas ensayadas cumplen con la fuerza vertical mínima.

- La variación porcentual del Módulo de Rigidez, tanto del Módulo Medido como del Módulo Ajustado, debe encontrarse en el rango de +10 % a -20 % respecto al valor registrado para el primer ensayo. En la Figura 4-1, se grafica la variación porcentual obtenida para cada probeta, mediante la cual se puede verificar que se cumple con la condición en todos los casos.

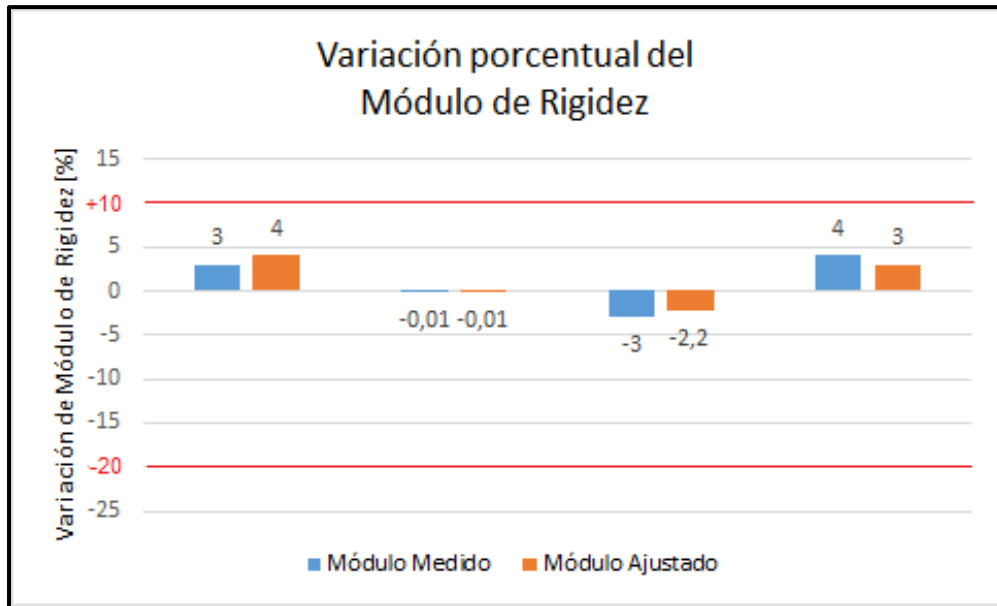


Figura 4-1: Variación porcentual del Módulo de Rigidez.

- La temperatura utilizada durante el ensayo es de 15 [°C]. Es recomendable realizar el ensayo a máximo 40 [°C] o menor temperatura, ya que con dicha temperatura se debe tener especial cuidado en la aparición de resultados no lineales y una posible fluencia en la probeta.
- Las probetas ensayadas cumplen con las dimensiones requeridas, ya que se encuentran entre los 30 [mm] y 70 [mm] de espesor, con un diámetro de 150[mm]. Parámetro importante, ya que el espesor es requerido para el cálculo de Módulo de Rigidez.
- La gravedad específica bruta ( $G_{mb}$ ) o densidad aparente, es utilizada como dato de entrada para el desarrollo del ensayo de Módulo de rigidez. La densidad aparente de las probetas no deben diferir en más del 1% del promedio de la densidad del lote de probetas, en caso de no cumplir, la probeta debe ser rechazada. Las probetas utilizadas cumplen con el requisito, difiriendo como máximo en un 0,08% del promedio del lote.

## 4.2 MÓDULO DINÁMICO

Se verifican las condiciones de aceptabilidad para los resultados del ensayo de Módulo Dinámico, según parámetros descritos en la Norma pertinente [25]. De no ser cumplidas dichas condiciones los resultados deben ser rechazados.

- Las probetas fabricadas para el ensayo de Módulo Dinámico, deben cumplir con el porcentaje de Vacíos de aire de diseño, con una tolerancia de  $\pm 0,5\%$ . Las probetas utilizadas cumplen con el rango, con  $+0,2\%$  y  $+0,3\%$  de vacíos de aire respecto del valor de diseño. Es primordial considerar la disminución del porcentaje de vacíos de aire al extraer testigos o núcleos como probetas.
- Al analizar los datos obtenidos en laboratorio (Tabla 3-42), se afirma que los valores de porcentaje de vacíos de aire se comportan de manera inversa al incremento del resultado de Módulo Dinámico, ya que a menor porcentaje de vacíos de aire, mayor valor de Módulo Dinámico.
- Es importante cumplir con las exigencia en el dimensionamiento de las probetas, como no superar los  $\pm 0,005$  [mm] de ondulación medida a través de cualquier diámetro y las caras de la probeta deben ser perpendiculares al eje, a no más de 1 grado de desviación. Las probetas ensayadas cumplen con las dimensiones exigidas, ya que al existir alguna leve desviación, al aplicar cargas dinámicas sobre la probeta, ésta puede perder su posición.
- Los valores de deformaciones obtenidos al aplicar la carga dinámica, se deben encontrar entre 50 y 150 microstrain, ya que es el rango donde la probeta se comporta como un material viscoelástico lineal. Además, si se determina que el rango de la deformación permanente acumulada, después de cada ensayo a cada temperatura, es mayor que 1500 microstrain, la muestra debe ser desechada. Ambas probetas cumplen con lo anteriormente expuesto, de no ser así, el software utilizado durante el ensayo, arroja el mensaje “Maximum Strain Exceeded. Test Stopped”, donde se indica que la deformación máxima se ha excedido y el ensayo es detenido.
- Se debe tener en cuenta que durante el ensayo, se pueden controlar variables, como la temperatura y la frecuencia o velocidad de carga y por ende el Módulo Dinámico, como variable dependiente. Por eso se hace necesaria la Curva maestra, que resume estas 3 variables en una gráfica de 2 variables, eliminando la variable temperatura. Se fija una temperatura de referencia de 21 [°C]. A partir de la gráfica de la curva maestra obtenida (Figura 3-21), se observa que la mezcla diseñada en laboratorio, a medida que aumenta la frecuencia de carga también aumenta el valor de Módulo Dinámico.
- Para ajustar la curva maestra, primero se debe seleccionar la temperatura de referencia, luego se ajusta la función sigmoïdal a resultados de módulo dinámico obtenidos en el laboratorio utilizando una regresión no lineal de mínimos cuadrados, lo que se puede resolver utilizando la función Solver en Excel.

Luego se calcula la bondad de ajuste entre valores de Módulo Dinámico estimado y medido. Se calcula el error estándar ( $S_e$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que deben cumplir con un valor menor a 0,05 en el caso del error y un valor superior a 0,99 para  $R^2$ .

Los valores obtenidos son:

$$\text{Error estándar } S_e = 0,0390$$

$$\text{Coeficiente de determinación } R^2 = 0,9960$$

Los resultados de  $S_e$  y  $R^2$ , indican que los valores obtenidos para el Módulo Dinámico medido son bien representados por los resultados estimados.

En la Figura 4-2, se observa la relación entre el logaritmo del Módulo Dinámico estimado y el medido.

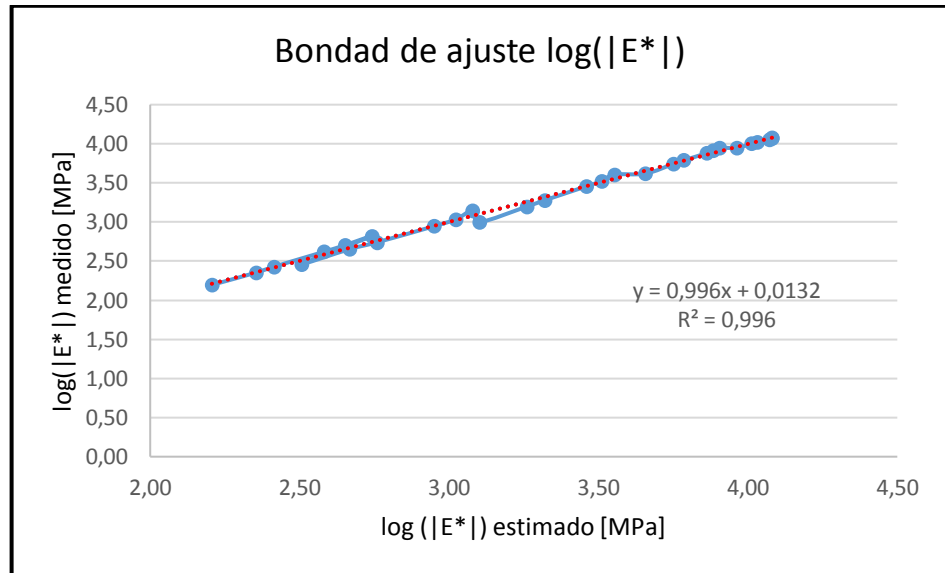


Figura 4-2: Bondad de Ajuste de  $\log(|E^*|)$ .

- Además de la curva maestra, una manera de analizar los resultados del ensayo de Módulo Dinámico, es graficando una curva isócrona, que es la gráfica de algunas funciones viscoelásticas, como el Módulo Dinámico frente a la temperatura, con frecuencia de carga constante. A partir de la gráfica de las Curvas Isócronas (Figura 3-22 y Figura 3-23) se observa que a medida que aumenta la temperatura va disminuyendo el Módulo Dinámico independiente de la frecuencia o velocidad de carga fijada.

Por ejemplo, para una velocidad de 72 [km/h], con una temperatura relativamente baja, de 10 [°C] y para una temperatura alta de 50 [°C] en el pavimento, se obtienen valores de Módulo Dinámico de 7408 [MPa] y 943 [MPa] respectivamente.

## 4.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ENSAYOS

### 4.3.1 Módulo de Rigidez

El ensayo de Módulo de Rigidez, se realiza según Norma UNE-EN 12697-26, ANEXO C [7], se utiliza el equipo servo hidráulico CRT-HYD 25-II y el software ISTM para la extracción de datos.

Las ventajas y desventajas que presenta el método, se expresan a continuación.

#### 4.3.1.1 Ventajas

- El ensayo toma menos tiempo que el ensayo de Módulo Dinámico. Se pueden ensayar las 4 probetas necesarias para obtener resultados durante un (1) día.

#### 4.3.1.2 Desventajas

- No se pueden obtener conclusiones del valor del Módulo de Rigidez respecto a la variación de frecuencias o velocidad de carga.
- Presenta un menor rango de temperatura de estudio en las altas temperaturas, como máximo se puede ensayar a una temperatura de 40 [°C].

### 4.3.2 Módulo Dinámico

El ensayo de Módulo dinámico, se realiza según Norma AASHTO T342-11 [25], se utiliza el equipo servo hidráulico CRT-HYD 25-II y el software TP-62 para la extracción de datos.

Las ventajas y desventajas que presenta el método, se expresan a continuación.

#### 4.3.2.1 Ventajas

- Controla parámetros de entrada, como temperatura y frecuencia de carga o velocidad de carga.
- Permite construir una Curva Maestra a una temperatura de referencia, mediante la cual se puede concluir respecto a la relación que existe entre el valor de Módulo dinámico y la frecuencia o velocidad de carga.
- El ensayo es NO destructivo, por lo que las probetas ensayadas por Módulo Dinámico, posteriormente pueden ser utilizadas en el ensayo de Flow Number.

#### 4.3.2.2 Desventajas

- La confección de la probeta posee mayor dificultad que la utilizada en el ensayo de Módulo de Rigidez, ya que se debe tener extremo cuidado con cumplir el dimensionamiento de ellas y en la extracción de núcleos.

## 5 CONCLUSIONES

Se obtienen resultados para los ensayos de Módulo de Rigidez y Módulo Dinámico, para una mezcla diseñada en laboratorio a través de la metodología Superpave, que además cumple con las especificaciones exigidas por el proyecto Conservación rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez año 2016 Etapa I.

En este capítulo se detallan las conclusiones y comentarios obtenidos al terminar el proceso de investigación y trabajo de laboratorio, en el cual se alcanzaron todos los objetivos planteados al inicio de esta Memoria.

- Es imprescindible realizar una correcta selección de los componentes de una mezcla asfáltica Superpave, como lo son la estructura de agregados pétreos y el contenido óptimo de ligante asfáltico. Junto a lo anterior, es importante cumplir con cada criterio exigido durante el desarrollo del diseño de la mezcla asfáltica, ya que se nota significativamente un cambio en las propiedades volumétricas al modificar alguno de los parámetros, lo que incide directamente en las propiedades mecánicas de la mezcla diseñada compactada.
- Se logró diseñar una mezcla asfáltica, que cumple con los criterios de aceptabilidad Superpave y con los requerimientos exigidos por las especificaciones técnicas del proyecto.
- Se diseñó una mezcla asfáltica con una estructura de agregados pétreos que tiene una combinación granulométrica con agregado  $\frac{3}{4}$ " 16%, agregado  $\frac{1}{2}$ " 29% y polvo de roca un 55%, con un contenido óptimo de ligante asfáltico de un 5,4% para un contenido de vacíos de aire de 3,5%.
- Es de significativa importancia contar con un laboratorio completamente equipado, esencialmente con un compactador giratorio Superpave (SGC) en buenas condiciones, calibrado cada vez antes de ser utilizado, el que debe ser utilizado por alguien que conozca el procedimiento e ingreso de datos de entrada en el compactador. También, es necesario tener balanzas de diferentes tolerancias y precisión, junto a hornos y termómetros certificados que cumplan con las tolerancias de error en sus medidas. Son factores controlables que afectan directamente en las propiedades de la mezcla asfáltica.
- Conociendo la conformación idónea de la mezcla asfáltica, se procedió a confeccionar probetas para los ensayos de Módulo de Rigidez y Módulo Dinámico. Se tuvo extremo cuidado con el dimensionamiento de las probetas, en especial con las probetas destinadas al ensayo de Módulo Dinámico, para ellas se extrajeron núcleos con la máquina testiguera para cumplir con el diámetro y posterior aserrado con la sierra con disco diamantado para obtener la altura adecuada. Se utilizó máquina rectificadora para cumplir tolerancia de ondulación en las caras de la probeta.
- Se cumplió con un Módulo de Rigidez mínimo de 4.000 [MPa] exigido en las especificaciones técnicas del proyecto, para las 4 probetas ensayadas. Cada probeta cumplió con la variación permitida para el valor de Módulo de Rigidez obtenido entre el primer y segundo diámetro ensayado para cada probeta.

- La variación de las cantidades de vacíos de aire entre las probetas utilizadas en el Módulo de Rigidez es pequeña, de un 0,1%. Se observó una ligera tendencia, entre mayor fue el porcentaje de vacíos de aire, menor es el valor obtenido como Módulo de Rigidez. No se pudo concluir respecto a parámetros como la cantidad de ligante asfáltico, temperatura, envejecimiento o frecuencias de carga, ya que fueron invariables en el estudio.
- Se cumplió con la realización del ensayo de Módulo Dinámico, para cada una de las probetas y temperaturas estudiadas, sin sobrepasar los límites de deformación recuperable y deformación permanente acumulada para cada una de ellas.
- Con los resultados del ensayo, se construyó una curva maestra con una temperatura de referencia a 21 [°C], de la cual se desprende que, a medida que aumenta la frecuencia o velocidad de carga, también aumenta el valor de Módulo Dinámico.
- Mediante el gráfico de Barksdale y la comprobación con la ecuación de Brown, se obtuvo el tiempo o duración de una carga en función de la velocidad y profundidad bajo la superficie del pavimento. Concluyendo que la frecuencia es directamente proporcional a la velocidad y que disminuye a mayor profundidad.
- También se analizaron los resultados mediante curvas isócronas, con los valores de Módulo Dinámico versus temperatura., en las cuales quedó claro que, a medida que aumenta la temperatura, va en disminución el valor de Módulo Dinámico, independiente de la frecuencia o velocidad de carga fijada.
- Se analizaron los datos obtenidos en laboratorio y se concluyó que los valores de porcentaje de vacíos de aire se comportan de manera inversa al incremento del resultado de Módulo Dinámico, ya que a menor porcentaje de vacíos de aire, mayor valor de Módulo Dinámico.
- Al realizar el ensayo de Módulo Dinámico y estudiar los resultados obtenidos, se pudo concluir y obtener relaciones entre el valor del Módulo Dinámico y diferentes parámetros, como: frecuencia de carga, temperatura y porcentaje de vacíos de aire. Mientras que los parámetros de envejecimiento, humedad, rigidez del ligante y contenido de ligante asfáltico, no entregan conclusiones en el presente estudio, ya que son invariables entre una probeta y otra.
- Al comparar los ensayos de Módulo de Rigidez y Módulo Dinámico, se dejaron en evidencia sus ventajas y desventajas, determinando que el Módulo Dinámico realizado bajo la norma y software mencionados en esta Memoria, entrega más completos resultados, que permiten concluir respecto a más parámetros que en el Módulo de Rigidez.
- Al analizar los resultados del Módulo Dinámico, con la misma exigencia del Módulo de Rigidez, para una temperatura de 15 [°C], se superan los 4.000 [MPa] para las diferentes velocidades evaluadas (20 [km/h], 50 [km/h] y 100 [km/h]).

Los valores de Módulo Dinámico obtenidos para los parámetros antes mencionados son de 4.968 [MPa], 5.701 [MPa] y 6.156 [MPa] respectivamente.

- En promedio el valor obtenido para el Módulo de Rigidez es de 8.800 [MPa] aproximadamente, valor equivalente al Módulo Dinámico a una temperatura de 5 [°C]. En las diferentes velocidades evaluadas (50 [km/h], 100 [km/h] y 120[km/h]), los valores de Módulo Dinámico obtenidos son de 8.644 [MPa], 9.043 [MPa] y 9.206 [MPa] respectivamente, valores cercanos a los diferentes valores de Módulo de Rigidez.
- Al ejecutar el proyecto, utilizando el diseño de mezcla Superpave, denota un cambio progresivo del comúnmente utilizado método Marshall al nuevo método de diseño volumétrico para mezclas asfálticas en caliente.
- En términos generales, si podemos predecir de mejor forma el desempeño futuro de nuestros pavimentos, entonces existe la posibilidad de poder disminuir considerablemente la posibilidad de ejecutar proyectos en los cuales el pavimento falle prematuramente.

A modo de recomendación, se expresan los siguientes comentarios:

- Especificar en exigencias, un valor mínimo y máximo del Módulo, ya que uno demasiado alto podría implicar fragilidad en la mezcla.
- Al especificar el Módulo, considerar el rango de temperaturas de la zona en la que se construirá el pavimento con la mezcla asfáltica diseñada.
- Para el ensayo de Módulo de Rigidez, hacer uso de la norma UNE-EN 12697-26, ANEXO C (Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 26: Rigidez) del año 2012, ya que en ella se considera un rango para la edad de la probeta.
- Realizar ambos ensayos variando más parámetros y así obtener más conclusiones importantes respecto a los resultados.

## 6 REFERENCIAS

- [1] Asphalt Institute, MS-2 Asphalt Mix Design Methods, 7 ed., 2014.
- [2] Asphalt Institute, Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis, Lexington, KY, 1994.
- [3] ASTM D 6373, Standard specification for performance grade asphalt binder, 2007.
- [4] V. Lorca y C. Wahr, *Memoria Diseño Volumétrico de una mezcla asfáltica en caliente mediante metodología SUPERPAVE*, Valparaíso, 2016.
- [5] J. Moreno, *Capítulo 3: El ensayo de tracción indirecta*, Barcelona: UPC, 2006.
- [6] C. Sandoval, «Capítulo 4: Valoración de la Rigidez de las mezclas Asfálticas,» *Revista Facultad de Ingeniería*, 2015.
- [7] Norma Europea, *Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 26: Rigidez*, Madrid: AENOR, 2006.
- [8] NCHRP Project 1-37A, Design Guide for New & Rehabilitated Pavements, 2002.
- [9] LanammeUCR, «Aplicación del módulo dinámico en el diseño de pavimentos,» Centro de Transferencia Tecnológica - LanammeUCR, 17 junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=afzUpjGx2hY>.
- [10] Bitumix CVV, *Metodología Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas*, 2005, p. 15.
- [11] Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras públicas, Especificaciones y métodos de muestreo, ensayo y control, Manual de Carreteras, Volumen 8, 2014.
- [12] ASTM D 5821-01, Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate, 2005.
- [13] M.C 8.202.6, Método para determinar la cubicidad de las partículas, 2014.
- [14] AASHTO T-304, Uncompacted Void Content of Fine Aggregate, Washington D.C.
- [15] ASTM D 4791-99, Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate, 2005.
- [16] AASHTO T-176, Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test, Washington D.C.
- [17] M.C 8.202.9, Método para determinar el equivalente de arena.
- [18] 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.
- [19] M.C 8.202.11, Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los Ángeles, 2014.
- [20] AASHTO T-104, Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.

- [21] M.C 8.202.17, Método de los sulfatos para determinar la desintegración, 2014.
- [22] M.C 8.202.16, Método para determinar el contenido de partículas desmenuzables, 2014.
- [23] ASTM D4867 , Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt concrete paving Mixtures, 2014.
- [24] S. Valero y C. Wahr, *Determinación de Módulo de Rigidez por medio de Tracción Indirecta sobre probetas cilíndricas bajo Norma Española UNE-EN 12697-26:2006*, Valparaíso, 2016.
- [25] AASHTO T342-11, *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*, 2011.
- [26] Cooper Technology, *CRT-HYD25 UniversalServo Hydraulic Testing Machine, User Manual*, 2008.
- [27] M. Toro y C. Wahr, *Memoria Caracterización del Módulo Dinámico de mezclas asfálticas chilenas y caracterización de la Rigidez a bajas temperaturas de betunes con BBR*, Valparaíso, 2013.
- [28] G. García y M. Thopmsom, «HMA Dynamic Modulus Predictive Model - A review,» Illinois, 2007.
- [29] Y. H. Huang, *Pavement Analysis and Design*, 2 ed., Pearson, 2004.
- [30] I. Al-Qadi, W. Xie y M. Elseifi, *Frequency Determination from Vehicular Loading TimePulse to Predict Appropriate Complex Modulus in MEPDG*.
- [31] G. Sandoval, *Estudio de comportamiento del Módulo de Rigidez en mezclas asfálticas, determinado mediante ensayos de laboratorio y obtenidos con instrumentación de terreno.*, Santiago: PUC, 2010.
- [32] NCHRP, *Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures*, 2004.
- [33] Dirección de Aeropuertos, Ministerio de Obras Públicas, *Especificaciones Técnicas Especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por Superpave*, Santiago, 2015.
- [34] AASHTO T-112, *Standard Method of Test for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregate*, Washington D.C.
- [35] AASHTO T-209, *Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot-Mix Asphalt Paving Mixtures*, Washington, D.C.
- [36] AASHTO T-166, *Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens*, Washington, D.C.



Tabla 7-2: Granulometría de Mezcla de Prueba 2.

Mezcla de Prueba 2 - Agregado 19 [mm] - 3/4"										
Material	100%	Grava 3/4"		Gravilla 1/2"		Polvo de Roca 3/8"		Mezcla de Prueba	Objetivo Superpave	Objetivo Graduación #2
% Usado		16%		29%		55%				
Tamiz [Gráfico]	Tamiz [ASTM]	% Que Pasa	% Propuesto	% Que Pasa	% Propuesto	% Que Pasa	% Propuesto			
4,26	1"	100	16,00	100	29,00	100	55,00	100,0	100	100
3,76	3/4"	100	16,00	100	29,00	100	55,00	100,0	90 - 100	100
3,12	1/2"	34	5,44	100	29,00	100	55,00	89,4	-90	79 - 99
2,75	3/8"	2	0,32	67	19,43	100	55,00	74,8	-	68 - 88
2,02	N°4	1	0,00	3	0,87	95	52,25	53,1	-	48 - 68
1,47	N°8			0	0,00	66	36,30	36,3	23 - 49	33 - 53
1,08	N°16					42	23,10	23,1	-	20 - 40
0,81	N°30					29	15,95	16,0	-	14 - 30
0,59	N°50					21	11,55	11,6	-	9 - 21
0,43	N°100					15	8,25	8,3	-	6 - 16
0,31	N°200					9,0	4,95	4,95	2 - 8	3 - 6

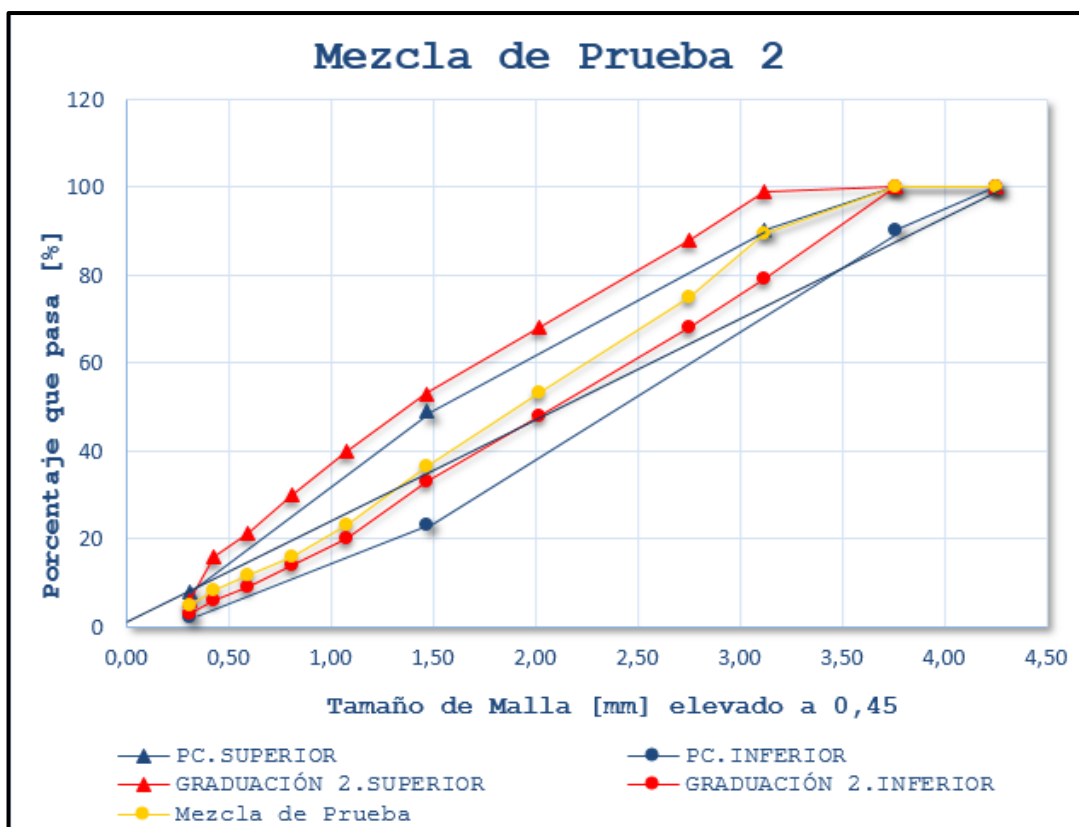


Figura 7-2: Gráfica granulométrica Mezcla de prueba 2.

Tabla 7-3: Granulometría de Mezcla de Prueba 3.

Mezcla de Prueba 3 - Agregado 19 [mm] - 3/4"										
Material	100%	Grava 3/4"		Gravilla 1/2"		Polvo de Roca 3/8"		Mezcla de Prueba	Objetivo Superpave	Objetivo Graduación #2
% Usado		22%		26%		52%				
Tamiz [Gráfico]	Tamiz [ASTM]	% Que Pasa	% Propuesto	% Que Pasa	% Propuesto	% Que Pasa	% Propuesto			
4,26	1"	100	22,00	100	26,00	100	52,00	100,0	100	100
3,76	3/4"	100	22,00	100	26,00	100	52,00	100,0	90 - 100	100
3,12	1/2"	34	7,48	100	26,00	100	52,00	85,5	-90	79 - 99
2,75	3/8"	2	0,44	67	17,42	100	52,00	69,9	-	68 - 88
2,02	N°4	1	0,00	3	0,78	95	49,40	50,2	-	48 - 68
1,47	N°8			0	0,00	66	34,32	34,3	23 - 49	33 - 53
1,08	N°16					42	21,84	21,8	-	20 - 40
0,81	N°30					29	15,08	15,1	-	14 - 30
0,59	N°50					21	10,92	10,9	-	9 - 21
0,43	N°100					15	7,80	7,8	-	6 - 16
0,31	N°200					9,0	4,68	4,68	2 - 8	3 - 6

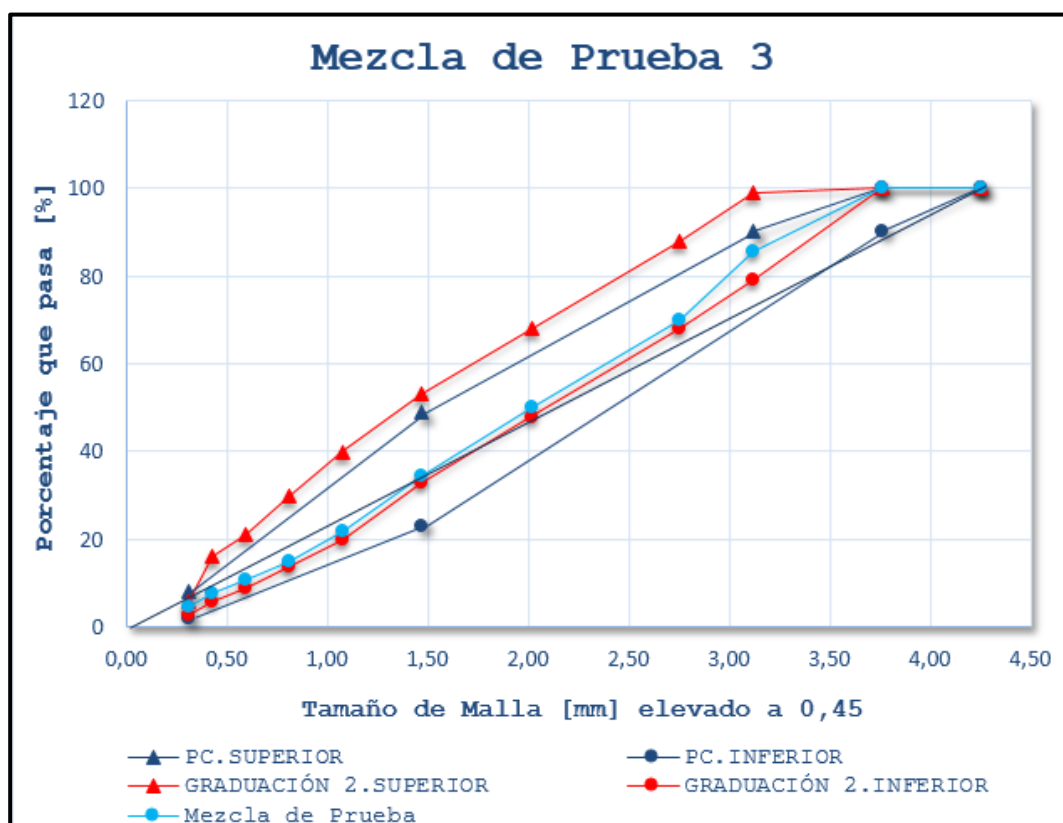


Figura 7-3: Gráfica granulométrica Mezcla de prueba 3.

## ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA ( $G_{mb}$ ) PARA MEZCLAS DE PRUEBA

Los resultados obtenidos de  $G_{mb}$  para las 3 mezclas de prueba se presentan en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4: Gravedad específica Bruta para Mezclas de prueba 1, 2 y 3.

MEZCLA DE PRUEBA 1	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [g]	1919,2	1866,4
Masa Sumergida [g]	1133,0	1099,6
Masa SSS [g]	1920,6	1868
$G_{mb}$ (medido) [g/cm]	<b>2,437</b>	<b>2,430</b>
Absorción del Espécimen [%]	0,18%	0,18%

MEZCLA DE PRUEBA 2	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [g]	1932,7	1870,5
Masa Sumergida [g]	1136,8	1097,7
Masa SSS [g]	1934,1	1871,8
$G_{mb}$ (medido) [g/cm]	<b>2,424</b>	<b>2,416</b>
Absorción del Espécimen [%]	0,18%	0,17%

MEZCLA DE PRUEBA 3	Espécimen 1	Espécimen 2
Masa Seca [g]	1852,1	1864,9
Masa Sumergida [g]	1095,3	1101,5
Masa SSS [g]	1853,3	1866
$G_{mb}$ (medido) [g/cm]	<b>2,443</b>	<b>2,439</b>
Absorción del Espécimen [%]	0,16%	0,14%

**ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA ( $G_{mm}$ ) PARA MEZCLAS DE PRUEBA**

*Tabla 7-5: Gravedad específica teórica Máxima para Mezclas de prueba 1, 2 y 3.*

<b>MEZCLA DE PRUEBA 1</b>					
<b>Densidad Máxima Muestra 1</b>		<b>[g]</b>	<b>Densidad Máxima Muestra 2</b>		<b>[g]</b>
Masa Muestra a T°Ambiente	<b>Mm</b>	2603,3	Masa Muestra a T°Ambiente	<b>Mm</b>	2563,9
Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5832,4	Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5830,5
Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7403,6	Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7379,5
Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2515,09</b>	Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2519,01</b>
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar					4
<b><math>G_{mm}</math> (medido) [g/cm<sup>3</sup>]</b>					<b>2,517</b>

<b>MEZCLA DE PRUEBA 2</b>					
<b>Densidad Máxima Muestra 1</b>		<b>[g]</b>	<b>Densidad Máxima Muestra 2</b>		<b>[g]</b>
Masa Muestra a T°Ambiente	<b>Mm</b>	2602,9	Masa Muestra a T°Ambiente	<b>Mm</b>	2593,6
Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5829,9	Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5831,5
Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7404,0	Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7399,4
Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2522,77</b>	Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2521,36</b>
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar					1
<b><math>G_{mm}</math> (medido) [g/cm<sup>3</sup>]</b>					<b>2,522</b>

<b>MEZCLA DE PRUEBA 3</b>					
<b>Densidad Máxima Muestra 1</b>		<b>[g]</b>	<b>Densidad Máxima Muestra 2</b>		<b>[g]</b>
Masa Muestra a T°Ambiente	<b>Mm</b>	2591,0	Masa Muestra a T°Ambiente	<b>Mm</b>	2602,6
Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5830,1	Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5831,4
Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7397,2	Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7403,4
Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2523,258</b>	Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2518,077</b>
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar					5
<b><math>G_{mm}</math> (medido) [g/cm<sup>3</sup>]</b>					<b>2,521</b>

## DENSIFICACIÓN PARA MEZCLAS DE PRUEBA

Tabla 7-6: Datos de densificación para Mezcla de prueba 1.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA DE PRUEBA 1									
<b>G<sub>mm</sub></b> <b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>2,517</b>								
<b>N° de Giros</b>	<b>Espécimen A</b>				<b>Espécimen B</b>				<b>Promedio G<sub>mm</sub> [%]</b>
	<b>Ht [mm]</b>	<b>G<sub>mb</sub> [est]</b>	<b>G<sub>mb</sub> [corr]</b>	<b>G<sub>mm</sub> [%]</b>	<b>Ht [mm]</b>	<b>G<sub>mb</sub> [est]</b>	<b>G<sub>mb</sub> [corr]</b>	<b>G<sub>mm</sub> [%]</b>	
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%
<b>G<sub>mb</sub></b> <b>[g/cm<sup>3</sup>]</b> <b>(Medido)</b>		<b>2,437</b>				<b>2,430</b>			
<b>A<sub>mx</sub></b>	176,715				<b>A<sub>mx</sub></b>	176,715			
<b>Peso Total</b>	4667,4				<b>Peso Total</b>	4672,9	<b>Va [%]</b>	<b>4,6</b>	
<b>Factor de Corrección</b>	1,041				<b>Factor de Corrección</b>	1,042			

Tabla 7-7: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA DE PRUEBA 2									
$G_{mm}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,522								
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				Promedio $G_{mm}$ [%]
	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	
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%
$G_{mb}$ [g/cm <sup>3</sup> ] (Medido)		2,424			2,416				
$A_{mx}$	176,715				$A_{mx}$	176,715			
Peso Total	4663,6				Peso Total	4662,3	Va [%]	5,3	
Factor de Corrección	1,044				Factor de Corrección	1,044			

Tabla 7-8: Datos de densificación para Mezcla de prueba 3.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA DE PRUEBA 3									
$G_{mm}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,521								
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				Promedio $G_{mm}$ [%]
	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	
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%
$G_{mb}$ (Medido)		2,443				2,439			
$A_{mx}$	176,715				$A_{mx}$	176,715			
Peso Total	4671,0				Peso Total	4678,5	Va [%]	4,4	
Factor de Corrección	1,047				Factor de Corrección	1,047			

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA PARA MEZCLA DE PRUEBA 2,  
VARIANDO EL PORCENTAJE DE LIGANTE ASFÁLTICO

*Tabla 7-9: Gravedad específica bruta para Mezcla 2, según porcentaje de ligante asfáltico.*

<b>MEZCLA 2/4,9% LIGANTE ASFÁLTICO</b>	<b>Espécimen 1</b>	<b>Espécimen 2</b>
Masa Seca [g]	1784,1	1789,6
Masa Sumergida [g]	1051,5	1054,8
Masa SSS [g]	1785,1	1790,3
<b>G<sub>mb</sub> (medido) [g/cm]</b>	<b>2,432</b>	<b>2,433</b>
Absorción del Espécimen [%]	0,14%	0,10%

<b>MEZCLA 2/5,4% LIGANTE ASFÁLTICO</b>	<b>Espécimen 1</b>	<b>Espécimen 2</b>
Masa Seca [g]	1787,4	1640,8
Masa Sumergida [g]	1057,8	973,8
Masa SSS [g]	1788,3	1641,6
<b>G<sub>mb</sub> (medido) [g/cm]</b>	<b>2,447</b>	<b>2,448</b>
Absorción del Espécimen [%]	0,12%	0,12%

<b>MEZCLA 2/5,9% LIGANTE ASFÁLTICO</b>	<b>Espécimen 1</b>	<b>Espécimen 2</b>
Masa Seca [g]	1779,1	1876,5
Masa Sumergida [g]	1053,1	1110,4
Masa SSS [g]	1779,7	1877,1
<b>G<sub>mb</sub> (medido) [g/cm]</b>	<b>2,449</b>	<b>2,448</b>
Absorción del Espécimen [%]	0,08%	0,08%

<b>MEZCLA 2/6,4% LIGANTE ASFÁLTICO</b>	<b>Espécimen 1</b>	<b>Espécimen 2</b>
Masa Seca [g]	1707,5	1662,5
Masa Sumergida [g]	1011,0	984,7
Masa SSS [g]	1707,9	1663,0
<b>G<sub>mb</sub> (medido) [g/cm]</b>	<b>2,450</b>	<b>2,451</b>
Absorción del Espécimen [%]	0,06%	0,07%

**ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA PARA MEZCLA DE PRUEBA 2, VARIANDO EL PORCENTAJE DE LIGANTE ASFÁLTICO**

*Tabla 7-10: Gravedad específica teórica máxima para Mezcla 2, según porcentaje de ligante asfáltico.*

<b>MEZCLA 1 / 4,9% LIGANTE ASFÁLTICO</b>					
<b>Densidad Máxima Muestra 1</b>		<b>[g]</b>	<b>Densidad Máxima Muestra 2</b>		<b>[g]</b>
Masa Muestra a T° Ambiente	<b>Mm</b>	2607,7	Masa Muestra a T° Ambiente	<b>Mm</b>	2601,0
Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5829,2	Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5831,3
Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7405,0	Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7403,5
Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2519,757</b>	Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2520,856</b>
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar			1		
<b>G<sub>mm</sub> (medido) [g/cm<sup>3</sup>]</b>			<b>2,520</b>		

<b>MEZCLA 1 / 5,4% LIGANTE ASFÁLTICO</b>					
<b>Densidad Máxima Muestra 1</b>		<b>[g]</b>	<b>Densidad Máxima Muestra 2</b>		<b>[g]</b>
Masa Muestra a T° Ambiente	<b>Mm</b>	2590,7	Masa Muestra a T° Ambiente	<b>Mm</b>	2594,5
Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5831,1	Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5830,1
Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7389,0	Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7391,6
Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2501,149</b>	Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2504,333</b>
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar			3		
<b>G<sub>mm</sub> (medido) [g/cm<sup>3</sup>]</b>			<b>2,503</b>		

<b>MEZCLA 1 / 5,9% LIGANTE ASFÁLTICO</b>					
<b>Densidad Máxima Muestra 1</b>		<b>[g]</b>	<b>Densidad Máxima Muestra 2</b>		<b>[g]</b>
Masa Muestra a T° Ambiente	<b>Mm</b>	2596,3	Masa Muestra a T° Ambiente	<b>Mm</b>	2600,7
Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5831,4	Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5832,0
Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7386,1	Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7389,6
Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2485,379</b>	Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2486,011</b>
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar			1		
<b>G<sub>mm</sub> (medido) [g/cm<sup>3</sup>]</b>			<b>2,486</b>		

<b>MEZCLA 1 / 6,4% LIGANTE ASFÁLTICO</b>					
<b>Densidad Máxima Muestra 1</b>		<b>[g]</b>	<b>Densidad Máxima Muestra 2</b>		<b>[g]</b>
Masa Muestra a T° Ambiente	<b>Mm</b>	2597,6	Masa Muestra a T° Ambiente	<b>Mm</b>	2595,1
Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5830,8	Masa Recipiente lleno con Agua	<b>Mpa</b>	5829,5
Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7378,8	Masa Recipiente con Agua y Muestra	<b>Mpam</b>	7375,1
Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	<b>Pt</b>	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2467,671</b>	Densidad Máxima Sin Compactar		<b>2465,530</b>
Diferencia Densidad Máxima Sin Compactar			2		
<b>G<sub>mm</sub> (medido) [g/cm<sup>3</sup>]</b>			<b>2,467</b>		

**DENSIFICACIÓN PARA MEZCLA DE PRUEBA 2 CON 4,9% DE LIGANTE  
ASFÁLTICO**

*Tabla 7-11: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2, con 4,9% de ligante asfáltico.*

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

Tabla 7-12: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2, con 5,4% de ligante asfáltico.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 5,4%									
$G_{mm}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,503								
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				Promedio $G_{mm}$ [%]
	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	
5	127,5	2,08	2,16	86,26%	127,3	2,08	2,16	86,43%	86,35%
7	125,8	2,10	2,19	87,43%	125,5	2,11	2,19	87,67%	87,55%
10	123,8	2,14	2,22	88,84%	123,6	2,14	2,23	89,02%	88,93%
20	120,1	2,20	2,29	91,58%	120,0	2,20	2,30	91,69%	91,63%
30	118,1	2,24	2,33	93,13%	118,0	2,24	2,33	93,24%	93,19%
40	116,7	2,27	2,36	94,24%	116,7	2,27	2,36	94,28%	94,26%
50	115,7	2,29	2,38	95,06%	115,7	2,29	2,38	95,10%	95,08%
60	115,0	2,30	2,39	95,64%	114,9	2,30	2,40	95,76%	95,70%
70	114,4	2,31	2,41	96,14%	114,3	2,31	2,41	96,26%	96,20%
75	114,1	2,32	2,41	96,39%	114,0	2,32	2,42	96,52%	96,45%
80	113,9	2,32	2,42	96,56%	113,7	2,33	2,42	96,77%	96,67%
90	113,4	2,33	2,43	96,99%	113,3	2,34	2,43	97,11%	97,05%
100	113,0	2,34	2,44	97,33%	112,9	2,34	2,44	97,46%	97,39%
110	112,7	2,35	2,44	97,59%	112,6	2,35	2,45	97,72%	97,65%
115	112,5	2,35	2,45	97,76%	112,5	2,35	2,45	97,80%	97,78%
$G_{mb}$ [g/cm <sup>3</sup> ] (Medido)		2,447			2,448				
$A_{mx}$	176,715				$A_{mx}$	176,715			
Peso Total	4676,8				Peso Total	4675,8	Va [%]	3,55	
Factor de Corrección	1,040				Factor de Corrección	1,041			

Tabla 7-13: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2, con 5,9% de ligante asfáltico.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 5,9%									
$G_{mm}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,486								
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				Promedio $G_{mm}$ [%]
	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	
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%
$G_{mb}$ [g/cm <sup>3</sup> ] (Medido)		2,449				2,448			
$A_{mx}$	176,715				$A_{mx}$	176,715			
Peso Total	4677,5				Peso Total	4677,2	Va [%]	2,8	
Factor de Corrección	1,036				Factor de Corrección	1,030			

Tabla 7-14: Datos de densificación para Mezcla de prueba 2, con 6,4% de ligante asfáltico.

DATOS DE DENSIFICACIÓN PARA LA MEZCLA 2 / 6,4%									
$G_{mm}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,467								
N° de Giros	Especimen A				Especimen B				Promedio $G_{mm}$ [%]
	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	Ht [mm]	$G_{mb}$ [est]	$G_{mb}$ [corr]	$G_{mm}$ [%]	
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%
$G_{mb}$ [g/cm <sup>3</sup> ] (Medido)		2,450				2,451			
$A_{mx}$	176,715				$A_{mx}$	176,715			
Peso Total	4672,3				Peso Total	4676,4	Va [%]	1,9	
Factor de Corrección	1,028				Factor de Corrección	1,029			

## 7.2 ANEXO B: “ENSAYO DE MÓDULO DE RIGIDEZ”

Indirect tensile stiffness modulus test report.

(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - NU-14)

Serial No. of this test report: A1 Address of testing laboratory

Date of print-out: 16:07:2016

Test carried out by: Camila Corona

Specimen reference: A1

Test temperature: 15°C

Specimen diameter: 150 mm

Specimen thickness: 61,5 mm

Bulk density: 2402(kg/m<sup>3</sup>)

Poisson's ratio: 0,35

Target rise-time: 124 ms

Target horizontal deformation: 7 µm

Number of conditioning pulses: 10

Transducer scan rate: 1000 Hz

### Address of testing laboratory

Universidad Técnica Federico Santa María

Laboratorio LEMCO

Joel Salas

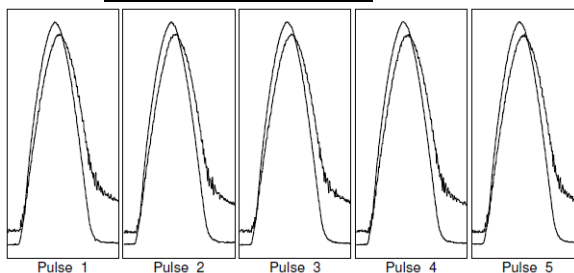
Avenida España 1680

Valparaíso

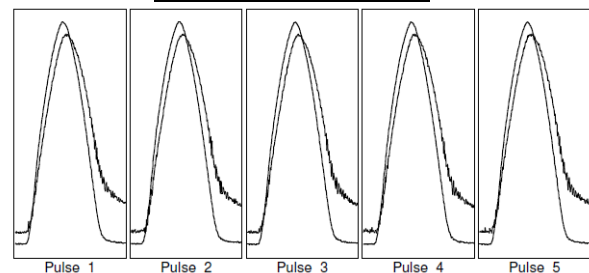
Valparaíso

Date & time of test :	16:jul:2016 14:53	Client name:	Diseño Superpave
Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave		
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE-EN 12697-26-2006		
Method of compaction	Patron		
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20°C		
Bulk density determination method	Densidad aparente		

### Test along 1st diameter



### Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		5,49	5,51	5,5
Horizontal stress (kPa)		378,9	380,0	379
Load-area factor	0,6	0,61	0,62	0,61
Horizontal deformation (µm)	7	6,9	7,0	6,9
Load (rise) time (ms):	124	123	127	125
Measured stiffness modulus (MPa)		7963	8079	8012
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8016	8200	8090

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		5,36	5,39	5,37
Horizontal stress (kPa)		369,7	371,7	371
Load-area factor	0,6	0,6	0,62	0,6
Horizontal deformation (µm)	7	6,9	7	7
Load (rise) time (ms):	124	123	127	124
Measured stiffness modulus (MPa)		7738	7836	7778
Adjusted stiffness modulus (MPa)		7725	7864	7800

### Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms):	<b>124,4</b>
Horizontal deformation (µm)	<b>6,9</b>
Horizontal deformation (%)	<b>0,0046</b>
Measured stiffness modulus (MPa)	<b>7895</b>
Adjusted stiffness modulus (MPa)	<b>7945</b>

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (4)

Person responsible for this test report	Signed
LEMCO	Date of issue of report 16:07:2016

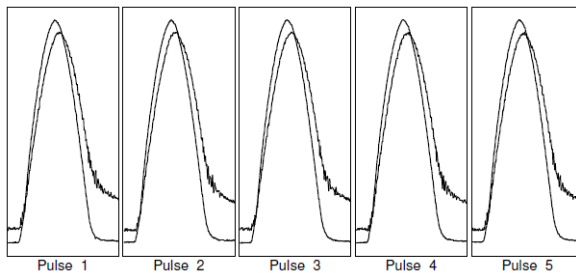
**Indirect tensile stiffness modulus test report.**  
**(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - NU-14)**  
**Serial No. of this test report: A1 Address of testing laboratory**

Date of print-out: 16:07:2016  
 Test carried out by: Camila Corona  
Specimen reference: A2  
 Test temperature: 15°C  
 Specimen diameter: 150 mm  
 Specimen thickness: 56 mm  
 Bulk density: 2402(kg/m<sup>3</sup>)  
 Poisson's ratio: 0,35  
 Target rise-time: 124 ms  
 Target horizontal deformation: 7 µm  
 Number of conditioning pulses: 10  
 Transducer scan rate: 1000 Hz

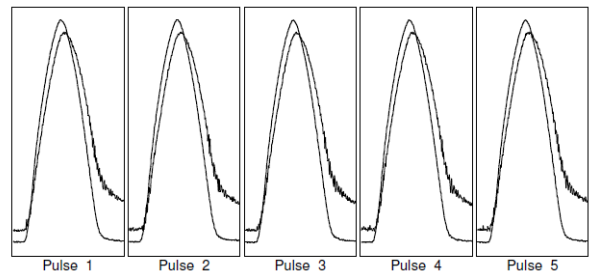
**Address of testing laboratory**  
 Universidad Técnica Federico Santa María  
 Laboratorio LEMCO  
 Joel Salas  
 Avenida España 1680  
 Valparaíso  
 Valparaíso

Date & time of test :	16:jul:2016 12:23	Client name:	Diseño Superpave
Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave		
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE-EN 12697-26-2006		
Method of compaction	Patron		
Specimen storage details	Sala de laboratorio20°C		
Bulk density determination method	Densidad aparente		

**Test along 1st diameter**



**Test along 2nd diameter**



Results	Target	Minimun	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		5,44	5,47	5,45
Horizontal stress (kPa)		412,1	414,4	412,9
Load-area factor	0,6	0,61	0,62	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,8	7,0	6,9
Load (rise) time (ms):	124	121,0	126,0	123,4
Measured stiffness modulus (MPa)		8671	8897	8742
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8715	8962	8807

Results	Target	Minimun	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		5,53	5,54	5,53
Horizontal stress (kPa)		418,8	419,9	419,2
Load-area factor	0,6	0,6	0,62	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	7,1	7,0
Load (rise) time (ms):	124	124	127	126,2
Measured stiffness modulus (MPa)		8639	8860	8743
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8727	8921	8808

**Mean results of the two tests**

Load (rise) time (ms):	<b>124,8</b>
Horizontal deformation (µm)	<b>7,0</b>
Horizontal deformation (%)	<b>0,0046</b>
Measured stiffness modulus (MPa)	<b>8743</b>
Adjusted stiffness modulus (MPa)	<b>8808</b>

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (-0,011)

Person responsible for this test report	Signed
LEMCO	Date of issue of report 16:07:2016

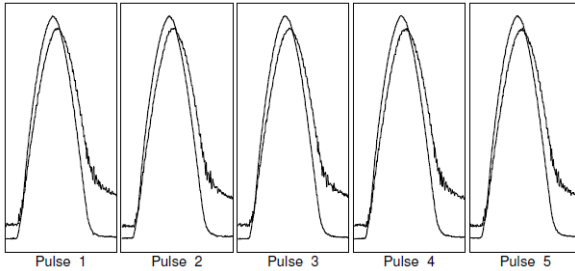
**Indirect tensile stiffness modulus test report.**  
**(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - NU-14)**  
**Serial No. of this test report: A1 Address of testing laboratory**

Date of print-out: 16:07:2016  
 Test carried out by: Camila Corona  
**Specimen reference: B1**  
 Test temperature: 15°C  
 Specimen diameter: 150 mm  
 Specimen thickness: 57,8 mm  
 Bulk density: 2402(kg/m<sup>3</sup>)  
 Poisson's ratio: 0,35  
 Target rise-time: 124 ms  
 Target horizontal deformation: 7 µm  
 Number of conditioning pulses: 10  
 Transducer scan rate: 1000 Hz

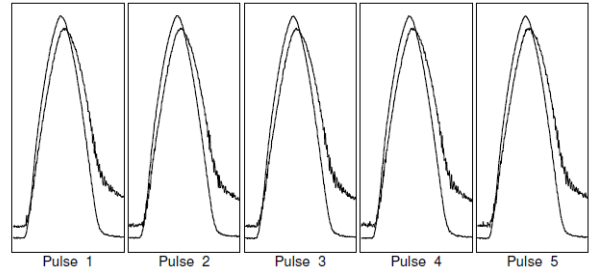
**Address of testing laboratory**  
 Universidad Técnica Federico Santa María  
 Laboratorio LEMCO  
 Joel Salas  
 Avenida España 1680  
 Valparaíso  
 Valparaíso

Date & time of test :	16:jul:2016 13:26	Client name:	Diseño Superpave
Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave		
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE-EN 12697-26-2006		
Method of compaction	Patron		
Specimen storage details	Sala de laboratorio20°C		
Bulk density determination method	Densidad aparente		

**Test along 1st diameter**



**Test along 2nd diameter**



Results	Target	Minimun	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		5,42	5,43	5,43
Horizontal stress (kPa)		398,1	398,9	398,5
Load-area factor	0,6	0,61	0,63	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,7	6,8	6,8
Load (rise) time (ms):	124	123	126	125
Measured stiffness modulus (MPa)		8512	8716	8567
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8580	8780	8650

Results	Target	Minimun	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		5,66	5,68	5,68
Horizontal stress (kPa)		415,9	417,4	416,7
Load-area factor	0,6	0,6	0,61	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	7,0	6,9
Load (rise) time (ms):	124	123	127	124,8
Measured stiffness modulus (MPa)		8718	8838	8799
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8757	8895	8842

**Mean results of the two tests**

Load (rise) time (ms):	<b>124,9</b>
Horizontal deformation (µm)	<b>6,9</b>
Horizontal deformation (%)	<b>0,0046</b>
Measured stiffness modulus (MPa)	<b>8683</b>
Adjusted stiffness modulus (MPa)	<b>8746</b>

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (-2,195)

Person responsible for this test report	Signed
LEMCO	Date of issue of report 16:07:2016

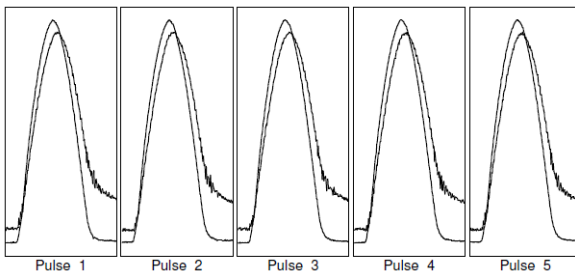
**Indirect tensile stiffness modulus test report.**  
**(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - NU-14)**  
**Serial No. of this test report: A1 Address of testing laboratory**

Date of print-out: 16:07:2016  
 Test carried out by: Camila Corona  
Specimen reference: B2  
 Test temperature: 15°C  
 Specimen diameter: 150 mm  
 Specimen thickness: 61,1 mm  
 Bulk density: 2402(kg/m<sup>3</sup>)  
 Poisson's ratio: 0,35  
 Target rise-time: 124 ms  
 Target horizontal deformation: 7 µm  
 Number of conditioning pulses: 10  
 Transducer scan rate: 1000 Hz

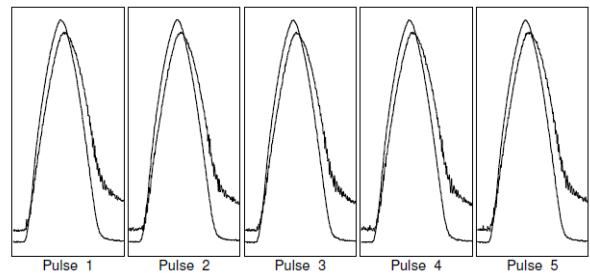
**Address of testing laboratory**  
 Universidad Técnica Federico Santa María  
 Laboratorio LEMCO  
 Joel Salas  
 Avenida España 1680  
 Valparaíso  
 Valparaíso

Date & time of test :	16:jul:2016 14:10	Client name:	Diseño Superpave
Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave		
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE-EN 12697-26-2006		
Method of compaction	Patron		
Specimen storage details	Sala de laboratorio20°C		
Bulk density determination method	Densidad aparente		

**Test along 1st diameter**



**Test along 2nd diameter**



	Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)			6,81	6,83	6,82
Horizontal stress (kPa)			473,1	474,3	473,7
Load-area factor	0,6		0,61	0,61	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0		6,8	6,9	6,8
Load (rise) time (ms):	124		121	126	124,2
Measured stiffness modulus (MPa)			10062	10216	10135
Adjusted stiffness modulus (MPa)			10120	10287	10201

	Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)			6,76	6,78	6,77
Horizontal stress (kPa)			469,7	471,1	470,3
Load-area factor	0,6		0,61	0,62	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0		7,0	7,1	7,0
Load (rise) time (ms):	124		123	126	124,6
Measured stiffness modulus (MPa)			9673	9828	9767
Adjusted stiffness modulus (MPa)			9735	9942	9873

**Mean results of the two tests**

Load (rise) time (ms):	<b>124,4</b>
Horizontal deformation (µm)	<b>6,9</b>
Horizontal deformation (%)	<b>0,0046</b>
Measured stiffness modulus (MPa)	<b>9951</b>
Adjusted stiffness modulus (MPa)	<b>10037</b>

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (3)

Person responsible for this test report	Signed
LEMCO	Date of issue of report 16:07:2016

## 7.3 ANEXO C: “ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO”

### 7.3.1.1 DATOS DE MEZCLA Y PROBETA A ENSAYAR EN MÓDULO DINÁMICO

Mezclas utilizadas para posterior fabricación de probetas.

Tabla 7-15: Masa de mezcla a compactar.

Muestra	Cantidad de Asfalto [%]	$G_{mm}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Vacíos de aire [%]	Masa a utilizar [g]
Mezcla M5	5,4	2503	9	7045
Mezcla M8				

Datos de compactación de probetas

Tabla 7-16: Datos de compactación de probetas.

Muestra	Fecha de compactación	Número de giros	Altura inicial [mm]	Altura final [mm]
Probeta M5	01 septiembre 2016	29	204,9	179,8
Probeta M8	08 septiembre 2016	41	207,5	179,9

Gravedad Específica Bruta  $G_{mb}$  y % Vacíos de aire en probetas compactadas

Tabla 7-17: Datos de  $G_{mb}$  y datos necesarios para su obtención.

Muestra	A [g]	B [g]	C [g]	$A_{ab}$ [%]	$G_{mb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$V_a$ [%]
Probeta M5	2836,2	2839,5	1617,4	0,27	2321	7,3
Probeta M8	2831,6	2834,2	1615,3	0,21	2323	7,2

A: Masa probeta al aire.

B: Masa probeta saturada y superficialmente seca.

C: Masa probeta sumergida en agua.

## DATOS DE COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE PARA PROBETAS

### Probeta M5

Troxler 5850 Gyratory Compactor											
Sample ID: _____			Time: 24:19				Date: 01/09/16				
Serial No: 64611											
Pressure: 600 KPa											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	204.9	200.9	198.0	195.8	194.0	192.4	191.2	190.1	189.2	188.3	mm
	1.161	1.161	1.160	1.160	1.161	1.160	1.160	1.159	1.159	1.160	deg
	599	600	600	600	600	600	600	600	600	600	kPa
1	187.5	186.8	186.1	185.5	185.0	184.4	184.0	183.5	183.1	182.7	mm
	1.159	1.160	1.160	1.160	1.159	1.159	1.160	1.160	1.159	1.159	deg
	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	kPa
2	182.3	181.9	181.6	181.3	181.0	180.7	180.4	180.1	179.8		mm
	1.160	1.159	1.159	1.160	1.160	1.159	1.159	1.159	1.158		deg
	600	600	600	600	600	600	600	600	599		kPa

*Figura 7-4: Datos de SGC para probeta M5.*

### Probeta M8

Troxler 5850 Gyratory Compactor											
Sample ID: _____			Time: 13:49				Date: 08/09/16				
Serial No: 64611											
Pressure: 600 KPa											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	207.5	203.4	200.5	198.2	196.4	194.9	193.7	192.5	191.6	190.7	mm
	1.162	1.161	1.160	1.161	1.160	1.159	1.159	1.160	1.159	1.159	deg
	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	kPa
1	189.9	189.2	188.5	188.0	187.4	186.9	186.4	186.0	185.5	185.1	mm
	1.160	1.160	1.159	1.159	1.160	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	deg
	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	kPa
2	184.7	184.4	184.0	183.7	183.4	183.1	182.9	182.6	182.3	182.1	mm
	1.159	1.159	1.159	1.159	1.160	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	deg
	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	kPa
3	181.9	181.7	181.4	181.2	181.0	180.8	180.6	180.5	180.3	180.1	mm
	1.159	1.159	1.160	1.159	1.159	1.160	1.158	1.158	1.159	1.160	deg
	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	kPa
4	179.9										mm
	1.159										deg
	600										kPa

*Figura 7-5: Datos de SGC para probeta M8.*

## DATOS OBTENIDOS EN LABORATORIO

Tabla 7-18: Datos de Módulo Dinámico obtenido en ensayo.

Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	E*  [Mpa]	Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	E*  [Mpa]
<b>-10</b>	25,0	12039,3	<b>38</b>	25,0	1198,7
	10,0	12057,9		10,0	1056,0
	5,0	11831,6		5,0	891,1
	1,0	10733,8		1,0	574,5
	0,5	10279,4		0,5	465,7
	0,1	9175,7		0,1	321,2
<b>4</b>	25,0	8037,5	<b>54</b>	25,0	552,5
	10,0	7663,4		10,0	449,3
	5,0	7265,8		5,0	381,3
	1,0	6106,2		1,0	260,0
	0,5	5633,2		0,5	226,6
	0,1	4538,3		0,1	160,7
<b>21</b>	25,0	3572,0			
	10,0	3246,3			
	5,0	2876,6			
	1,0	2094,5			
	0,5	1821,7			
	0,1	1261,7			

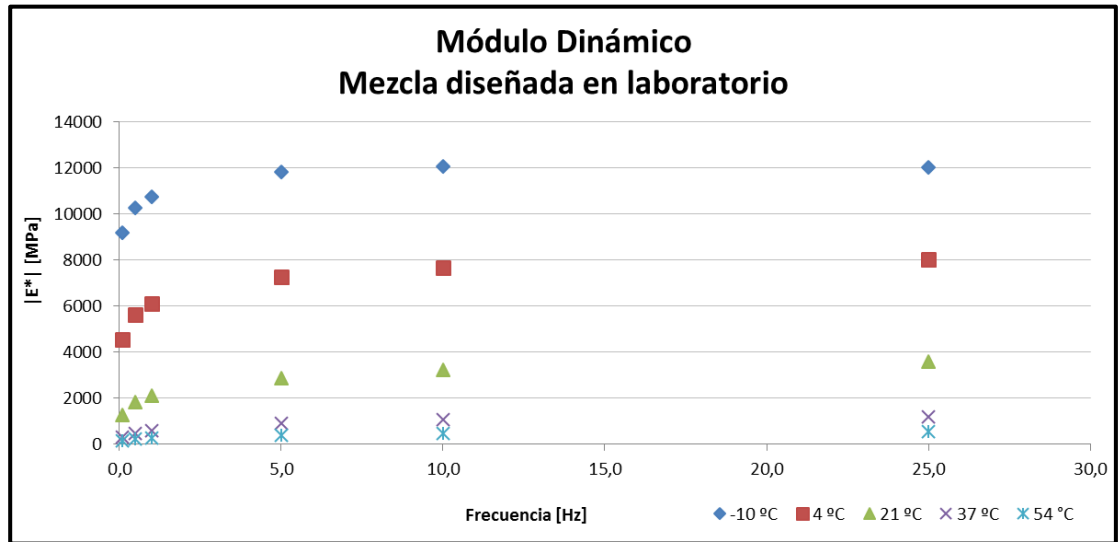


Figura 7-6: Gráfica de Módulo Dinámico versus frecuencia.

## AJUSTE DE ECUACIÓN SIGMOIDAL

Para realizar el ajuste horizontal en la curva maestra, se utiliza la Ecuación 7-1.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma[\log(f_r) + \log(aT)]}}$$

*Ecuación 7-1: Ecuación sigmooidal utilizada en cálculos.*

Los parámetros utilizados son los presentados en Tabla 7-19.

*Tabla 7-19: Parámetros utilizados en ecuación sigmooidal.*

<b>a[-10]</b>	68659,1774	<b>Log ( a[-10] )</b>	4,837
<b>a[4]</b>	286,65538	<b>Log ( a[4] )</b>	2,457
<b>a[21]</b>	1	<b>Log ( a[21] )</b>	0,000
<b>a[37]</b>	0,01327548	<b>Log ( a[37] )</b>	-1,877
<b>a[54]</b>	0,001	<b>Log ( a[54] )</b>	-3,000

*Tabla 7-20: Datos utilizados en Curva Maestra.*

<b>Log (Fr) [Hz]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>					<b>IE*1 [MPa]</b>
	<b>-10</b>	<b>4</b>	<b>21</b>	<b>37</b>	<b>54</b>	
	<b>Log(   E*   )</b>	<b>Log(   E*   )</b>	<b>Log(   E*   )</b>	<b>Log(   E*   )</b>	<b>Log(   E*   )</b>	
-4,0000	3,4866	2,8386	2,1956	1,8928	1,7855	<b>156,9</b>
-3,0000	3,6888	3,1300	2,4297	2,0323	1,8787	<b>269,0</b>
-2,0000	3,8401	3,3966	2,7049	2,2217	2,0125	<b>506,9</b>
-0,3010	4,0010	3,7425	3,1976	2,6538	2,3542	<b>1576,3</b>
0,0000	4,0199	3,7884	3,2793	2,7406	2,4297	<b>1902,4</b>
0,1761	4,0299	3,8132	3,3255	2,7921	2,4757	<b>2116,0</b>
0,3010	4,0366	3,8299	3,3575	2,8288	2,5091	<b>2277,8</b>
0,3979	4,0415	3,8424	3,3819	2,8573	2,5353	<b>2409,1</b>
0,4771	4,0454	3,8523	3,4014	2,8806	2,5571	<b>2520,3</b>
0,5441	4,0486	3,8605	3,4178	2,9004	2,5756	<b>2616,8</b>
0,6021	4,0513	3,8674	3,4317	2,9174	2,5917	<b>2702,4</b>
0,6532	4,0536	3,8734	3,4439	2,9325	2,6060	<b>2779,3</b>
0,6990	4,0556	3,8786	3,4547	2,9459	2,6189	<b>2849,3</b>
0,7404	4,0574	3,8833	3,4644	2,9581	2,6306	<b>2913,5</b>
0,7782	4,0591	3,8875	3,4732	2,9692	2,6413	<b>2972,9</b>
0,8129	4,0605	3,8913	3,4812	2,9794	2,6512	<b>3028,2</b>
0,8451	4,0619	3,8948	3,4885	2,9888	2,6604	<b>3079,9</b>
0,8751	4,0631	3,8980	3,4953	2,9976	2,6690	<b>3128,5</b>
0,9031	4,0642	3,9010	3,5017	3,0057	2,6770	<b>3174,3</b>
0,9294	4,0653	3,9038	3,5075	3,0134	2,6846	<b>3217,7</b>
0,9542	4,0663	3,9064	3,5131	3,0207	2,6917	<b>3259,0</b>
0,9777	4,0672	3,9088	3,5183	3,0275	2,6985	<b>3298,2</b>
1,0000	4,0681	3,9111	3,5232	3,0340	2,7049	<b>3335,7</b>
1,5000	4,0854	3,9575	3,6266	3,1766	2,8511	<b>4232,3</b>
2,0000	4,0994	3,9956	3,7169	3,3117	2,9981	<b>5210,8</b>
2,5000	4,1106	4,0268	3,7945	3,4368	3,1420	<b>6230,7</b>
3,0000	4,1195	4,0521	3,8603	3,5498	3,2793	<b>7249,6</b>
3,5000	4,1267	4,0726	3,9154	3,6500	3,4070	<b>8229,7</b>
4,0000	4,1324	4,0891	3,9610	3,7372	3,5232	<b>9141,8</b>

## CURVAS ISÓCRONAS SEGÚN VELOCIDAD

*Tabla 7-21: Datos utilizados en Curvas Isócronas según velocidad.*

	Curva 1	Curva 2	Curva 3
Velocidad [km/h]	24	48	72
Frecuencia [Hz]	14	25	40

Temperatura [°C]	Velocidad [km/h]	Log(a[T])	Log(   Fr   ) [Hz]	Log(   E*   ) [MPa]	E*   [MPa]
-10	24	4,8771	1,146	4,0750	11884,41
-5		3,9446	1,146	4,0341	10816,66
0		3,0671	1,146	3,9780	9505,00
5		2,2446	1,146	3,9042	8020,44
10		1,4771	1,146	3,8118	6483,44
15		0,7646	1,146	3,7017	5031,85
20		0,1071	1,146	3,5772	3777,31
25		-0,4954	1,146	3,4434	2775,56
30		-1,0429	1,146	3,3065	2025,55
35		-1,5354	1,146	3,1731	1489,75
40		-1,9729	1,146	3,0485	1118,17
45		-2,3554	1,146	2,9367	864,46
50		-2,6829	1,146	2,8403	692,31
-10		48	4,8771	1,398	4,0835
-5	3,9446		1,398	4,0468	11137,25
0	3,0671		1,398	3,9962	9912,12
5	2,2446		1,398	3,9293	8497,67
10	1,4771		1,398	3,8449	6997,20
15	0,7646		1,398	3,7435	5539,89
20	0,1071		1,398	3,6276	4241,84
25	-0,4954		1,398	3,5015	3173,42
30	-1,0429		1,398	3,3711	2350,36
35	-1,5354		1,398	3,2424	1747,46
40	-1,9729		1,398	3,1208	1320,66
45	-2,3554		1,398	3,0105	1024,54
50	-2,6829		1,398	2,9145	821,24
-10	72		4,8771	1,602	4,0897
-5		3,9446	1,602	4,0561	11379,24
0		3,0671	1,602	4,0096	10224,17
5		2,2446	1,602	3,9480	8870,64
10		1,4771	1,602	3,8697	7408,19
15		0,7646	1,602	3,7750	5957,07
20		0,1071	1,602	3,6659	4633,90
25		-0,4954	1,602	3,5463	3518,33
30		-1,0429	1,602	3,4214	2638,92
35		-1,5354	1,602	3,2969	1981,27
40		-1,9729	1,602	3,1783	1507,49
45		-2,3554	1,602	3,0697	1174,15
50		-2,6829	1,602	2,9745	942,87