

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO - CHILE



**“DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
MEDIANTE LA METODOLOGÍA SUPERPAVE CON LA
INCORPORACIÓN DE 25% DE PAVIMENTO ASFÁLTICO
RECICLADO (RAP), MÁS ENSAYOS DE RUEDA DE
HAMBURGO Y MÓDULO DE RIGIDEZ”**

Memoria de titulación presentada por:
MACARENA ANDREA RIVERO DROGUETT

Como requisito para optar al título de:
Constructor Civil

Profesor Guía:
Carlos Wahr Daniel

Agosto 2018

A mi Madre, Mi Marta.

Porque siempre me enseñaste a creer en mí.

“DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MEDIANTE LA METODOLOGÍA SUPERPAVE CON LA INCORPORACIÓN DE 25% DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP), MAS ENSAYOS DE RUEDA DE HAMBURGO Y MÓDULO DE RIGIDEZ”

RESUMEN EJECUTIVO

La Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Publicas ha decidido innovar por segundo año consecutivo con el método SUPERPAVE (SUPERior PERforming Asphalt PAVements), para el diseño de MAC (Mezcla Asfáltica en Caliente) en el Aeropuerto Internacional Comodoro Arturo Merino Benítez. Por esto, se ha encargado por medio del adjudicante del Proyecto el diseño de la MAC al Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras LEMCO. Dado lo anterior, la presente memoria se enfoca en el diseño volumétrico de MAC por la metodología SUPERPAVE, desarrollando un “Diseño Base” para el Proyecto mencionado, para luego homologar dicho “Diseño Base” pero con la incorporación de un 25% Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP).

El diseño SUPERPAVE busca estimar las propiedades volumétricas óptimas de la mezcla y simular lo que ocurre tanto en la construcción como el desempeño en el tiempo de la mezcla. Para esto se seleccionan los elementos constituyentes de la mezcla: agregado y ligante asfáltico; además de escoger la estructura del agregado de diseño y el contenido óptimo de asfalto. Se realizan los diseños de MAC en base a las especificaciones del Proyecto mencionado y criterios del método SUPERPAVE.

Además, en el presente estudio se selecciona el RAP como componente de la mezcla donde se utiliza como un material más dentro de los componentes de la MAC, pero en el proceso del diseño se distingue su composición, caracterizando su componente como agregado pétreo y determinando su contenido de ligante asfáltico. El enfoque del presente estudio es de carácter teórico-experimental.

Ambos diseños cuentan con un asfalto virgen modificado de clasificación PG 76-28 y un agregado mineral con Tamaño Máximo Nominal de 19[mm]. Se logra un porcentaje óptimo de asfalto total de 5,3% y 5,4%, para el Diseño Base y con RAP respectivamente. Asimismo, se realizan los ensayos de desempeño de Rueda de Hamburgo y Módulo de Rigidez, obteniendo resultados dentro de los límites de aceptación para ambos ensayos y diseños, aumentando para el diseño con RAP un 35% el Módulo de Rigidez y disminuyendo un 21,5% el ahuellamiento en la Rueda de Hamburgo.

ABSTRACT

The Airport Management of the Ministry of Public Works has decided to innovate for a second year straight with the SUPERPAVE method (SUPERior PERforming Asphalt PAVements) for the HMA design at the International Airport Comodoro Arturo Merino Benitez. For this, the design of the asphalt mix for the new project has been appointed to Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras LEMCO. According to this, the present thesis is focused on the volumetric design of an HMA by the SUPERPAVE method, developing a "Base Design" for this project, and then homologate the "Base Design" with the incorporation of 25% Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).

SUPERPAVE design aims to estimate the optimal volumetric properties of the mix and simulate what happens during construction of the asphalt pavement as well as the compaction occurred by vehicle usage, and its performance through time. To accomplish this the materials used in the mixture mineral aggregate and asphalt binder are selected by choosing the right structure for the mineral aggregate and the optimal content of asphalt. All of this based on the specifications and criteria of the SUPERPAVE method and the mentioned project.

Also, in the present study RAP is selected as part of the mixture where is used as a common material of the HMA, but in the design process the composition of the RAP is defined as mineral aggregate and the content of asphalt binder is established. The focus of the present study is theoretical-experimental.

Both designs have modified virgin asphalt binder classified as PG 76-28 and a mineral aggregate with a Nominal Maximum Aggregate Size of 19 [mm]. Accomplishing an optimum percentage of asphalt cement of 5,3% and 5,4% for the Base Design and RAP design respectively. Additionally, performance results for the Hamburg Wheel Tracking Test and Resilient Modulus with results within the limits of acceptance for both tests and designs. The results on the RAP design were 35% increase for the Resilient Modulus and an 21,5% decrease for the Hamburg Wheel Tracking Test.

GLOSARIO

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials.
ASTM	: American Society for Testing Materials.
BBR	: Bending Beam Rheometer (Reómetro de Viga en Flexión).
cm	: Centímetro.
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Reómetro de Corte Dinámico).
DTT	: Direct Tension Test (Ensayo de Tracción Directa).
DV	: Dirección de Vialidad
E	: Módulo de Rigidez
E*	: Módulo Complejo
ESAL's	: Equivalent Single Axles Loads (Ejes Simples Equivalentes Cargados)
F	: Ángulo de desfase.
G*	: Módulo de Corte Complejo.
G _b	: Gravedad Especifica del Asfalto.
G _{mb}	: Gravedad Especifica Bruta Compactada.
G _{mm}	: Gravedad Especifica Máxima.
gr	: Gramo.
gr/cm ³	: Gramo por Centímetro Cúbico.
G _{sa}	: Gravedad Especifica Aparente.
G _{se}	: Gravedad Especifica Efectiva.
G _{sb}	: Gravedad Especifica Bruta Seca.
kg	: Kilo.
kg/m ³	: Kilo por Metro Cúbico.
KPa	: Kilopascal.
LEMCO	: Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras.
m	: Pendiente de la curva log S vs log tiempo.
MAC	: Mezcla Asfáltica en Caliente.
MC	: Manual de Carreteras.
min	: Minutos.
mm	: Milímetros.
MOP	: Ministerio de Obras Públicas

N	: Newton.
PAV	: Pressure Aging Vassel (Envejecimiento en Cámara de Presión).
P _b	: Porcentaje de Asfalto.
P _{ba}	: Porcentaje Asfalto Absorbido.
P _{be}	: Porcentaje Asfalto Efectivo.
P _s	: Porcentaje de Agregado.
PG	: Performance Grade.
RAP	: Reclaimed Asphalt Pavement (Pavimento Asfáltico Reciclado).
RTFO	: Rollign Thin Film Oven (Horno de Película Delgada Rotatoria).
RV	: Viscosímetro Rotacional.
S	: Rigidez de fluencia.
seg	: Segundos.
SGC	: Superpave Gyrotory Compactor (Compatador Giratorio).
SSD	: Saturated surface-dry (Saturado Superficialmente Seco).
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavements.
T	: Temperatura.
TSR	: Susceptibilidad a la Humedad.
V _a	: Volumen de Vacíos de Aire.
VAM	: Vacíos de Agregados de Mineral.
V _{ba}	: Volumen absorbido Ligante Asfáltico.
V _{be}	: Volumen Ligante Asfáltico Efectivo.
VFA	: Vacíos Llenos de Asfalto.
°C	: Grados Celsius.
ε	: Deformación aplicada.
σ	: Tensión aplicada.

“DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MEDIANTE LA METODOLOGÍA SUPERPAVE CON LA INCORPORACIÓN DE 25% DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP), MÁS ENSAYOS DE RUEDA DE HAMBURGO Y MÓDULO DE RIGIDEZ”

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	8
1.1	ANTECEDENTES GENERALES	8
1.2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	9
1.2.1	Objetivos Generales	9
1.2.2	Objetivos Específicos	9
1.3	ALCANCES DEL ESTUDIO.....	11
1.4	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	13
1.5	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	15
2.	MARCO TEÓRICO	16
2.1	MEZCLA ASFÁLTICA.....	16
2.2	MÉTODOS DE DISEÑO	16
2.2.1	Marshall.....	16
2.2.2	SUPERPAVE.....	17
2.3	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA.....	19
2.3.1	Caracterización de la Mezcla.....	20
2.4	PAVIMENTO ASFÁLTICO RECLADO, RAP.....	22
2.4.1	Introducción	22
2.4.2	Revisión Bibliográfica	22
2.4.3	Metodología Aplicada	32
3.	TRABAJO EN LABORATORIO.....	39
3.1	DISEÑO BASE	39
3.1.1	Selección de la Estructura de Agregado de Diseño	39

3.1.2	Selección del Contenido Óptimo del Ligante Asfáltico	41
3.1.3	Evaluación de la Susceptibilidad a la Humedad, TSR.....	43
3.2	DISEÑO CON RAP.....	43
3.2.1	Selección de los Materiales	43
3.2.2	Selección de la Estructura del Agregado de Diseño	54
3.2.3	Selección del Contenido de Ligante Asfáltico de Diseño	75
3.2.4	Evaluación de la Susceptibilidad a la Humedad, TSR.....	82
4.	RESULTADOS	86
4.1	RESULTADO DEL DISEÑO	86
4.1.1	Comparación de los Diseños	89
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA.....	91
4.2.1	Ensayo de Módulo de Rigidez	91
4.2.2	Ensayo de Rueda de Hamburgo.....	95
5.	CONCLUSIONES	100
5.1	GENERALES.....	100
5.2	ESPECÍFICAS.....	101
6.	REFERENCIAS	104
A.	ANEXOS.....	107
B.	ANEXOS.....	112
C.	ANEXOS	117
D.	ANEXOS	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Proceso de mezclado de los dos ligantes.....	47
Figura 3-2: Extracción de los áridos desde la Planta Asfalcura.....	47
Figura 3-3: Cuarteo del material G'3/4.....	48
Figura 3-4: Árido tamizado.....	61
Figura 3-5: Proceso de mezclado manual.....	61
Figura 3-6: Incorporación del asfalto al recipiente.....	61
Figura 3-7: Con la ayuda de una “puruña”, se introduce la mezcla en el molde.....	64
Figura 3-8: Calibración por presión del Compactador.....	64
Figura 3-9: Proceso de extracción de los especímenes.....	64
Figura 3-10: Introduce el molde con la mezcla para la compactación.....	64
Figura 3-11: Masando el espécimen.....	65
Figura 3-12: Proceso de superficialmente seco.....	65
Figura 3-13: Matraz con la mezcla.....	66
Figura 3-14: Probetas después del ensayo TSR.....	85
Figura 3-15: Ensayo de tracción Indirecta.....	85
Figura 4-1: Forma del impulso de carga, mostrando el periodo ascendente y la carga máxima. ³	91
Figura 4-2: Corte de las probetas.....	93
Figura 4-3: Probeta en el dispositivo y dentro del equipo, Ensayo Rigidez.....	93
Figura 4-4: Probeta montada en el dispositivo del equipo, Ensayo Rigidez.....	93
Figura 4-5: Probetas hermanas después del corte.....	97
Figura 4-6: Probetas hermanas después del corte.....	97
Figura 4-7: Probetas hermanas después del Ensayo de Hamburgo.....	97
Figura 4-8: Probetas montadas y listas, Ensayo de Hamburgo.....	97

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 2-1: Módulo de Rigidez</i>	20
<i>Ecuación 2-2: Temperatura Crítica del grado PG del ligante asfáltico virgen de una MAC con RAP</i>	27
Ecuación 2-3: Gravedad Teórica Máxima del agregado RAP.....	35
Ecuación 2-4: Gravedad específica efectiva del RAP.....	35
Ecuación 2-5: Gravedad Específica Bruta del RAP.....	36
Ecuación 2-6: Porcentaje de agregado pétreo en el RAP.....	37
Ecuación 2-7: Porcentaje de Asfalto Virgen.....	38
<i>Ecuación 3-1: Temperatura intermedia de la Clasificación PG</i>	45
Ecuación 3-2: Estimación de Gravedad Específica Efectiva.....	57
Ecuación 3-3: Estimación de Volumen de Asfalto Absorbido.....	58
Ecuación 3-4: Estimación del Volumen de Asfalto Efectivo.....	58
Ecuación 3-5: Estimación del Contenido de Asfalto Inicial.....	58
Ecuación 3-6: Gravedad Específica Teórica Máxima medida.....	66
Ecuación 3-7: Gravedad Específica Bruta Estimada.....	67
Ecuación 3-8: Factor de corrección.....	67
Ecuación 3-9: Gravedad Específica Bruta corregida.....	67
Ecuación 3-10: Vacíos de Aire de las mezclas compactadas.....	69
Ecuación 3-11: Vacíos de Agregado Mineral de las mezclas compactadas.....	69
Ecuación 3-12: Estimación del Porcentaje de Asfalto para un 4% de Vacíos de Aire.....	70
Ecuación 3-13: Estimación del VAM para un 4% de Va.....	71
Ecuación 3-14: Estimación del VFA para un 4% de Va.....	71
Ecuación 3-15: Estimación del %Gmm @ N Giros para un 4% de Vacíos de Aire.....	72
Ecuación 3-16: Relación de Proporción de Polvo de una MAC.....	72
Ecuación 3-17: Porcentaje de Asfalto Efectivo Estimado de la Mezcla.....	73
Ecuación 3-18: Tensión Indirecta.....	83

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 3-1: Distribución Granulométrica, Diseño Base.</i>	40
Gráfico 3-2: Granulometría de los agregados.	49
Gráfico 3-3: Distribución Granulometría para las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP. .	56
Gráfico 3-4: Curva de densificación para las 4 mezclas con diferentes Pb, Diseño con RAP.	77
Gráfico 3-5: Vacíos de Aire versus el Contenido de Ligante Asfáltico, Diseño con RAP. .	80
Gráfico 3-6: Vacíos de Agregado Mineral versus Contenido de Ligante Asfáltico, Diseño con RAP.	81
Gráfico 3-7: Vacíos llenos de Asfalto versus el Contenido de Ligante Asfáltico, Diseño con RAP.	81
Gráfico 3-8: Proporción de Polvo versus Contenido de Ligante Asfáltico, Diseño con RAP.	82
Gráfico 4-1: Granulometría de los Diseños.	86
Gráfico 4-2: Vacíos de Aire versus el Contenido de Ligante.	87
Gráfico 4-3: Vacíos de Agregado Mineral versus el Contenido de Ligante Asfáltico.	88
Gráfico 4-4: Vacíos llenos de Asfalto versus el Contenido de Ligante Asfáltico.	88
Gráfico 4-5: Proporción de Polvo versus el Contenido de Ligante Asfáltico.	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Guía para selección del ligante asfáltico virgen según AASTHO M 323.....	26
Tabla 3-1: Combinación de los áridos, Diseño Base.....	40
<i>Tabla 3-2: Propiedades de Consenso de la mezcla, Diseño Base.</i>	41
<i>Tabla 3-3: Propiedades de Origen de la mezcla, Diseño Base.</i>	41
<i>Tabla 3-4: Otras características de la mezcla, Diseño Base.</i>	41
Tabla 3-5: Parámetros Volumétricos para mezclas con diferentes % de asfalto, Diseño Base.....	42
Tabla 3-6: Diseño Base final.....	42
Tabla 3-7: Resultado del ensayo de Susceptibilidad a la Humedad, Diseño Base.....	43
Tabla 3-8: Equipos para determinar las Propiedades físicas del Asfalto.....	44
<i>Tabla 3-9: Ensayo para Ligante Original.</i>	45
<i>Tabla 3-10: Ensayo para Ligante Envejecido - HPDR.</i>	45
<i>Tabla 3-11: Ensayo para Ligante Envejecido - PAV.</i>	45
Tabla 3-12: Porcentaje de ligante asfáltico del RAP.	46
Tabla 3-13: Granulometría de los distintos tamaños de agregados.....	49
Tabla 3-14: Resultados del ensayo Partículas Fracturadas.	50
Tabla 3-15: Resultado del ensayo Angularidad del Agregado Fino.....	50
Tabla 3-16: Resultado del ensayo Partículas Planas y Alargadas.....	51
Tabla 3-17: Resultado del ensayo Equivalente de Arena.....	51
Tabla 3-18: Resultado del ensayo Desgaste los Ángeles.	52
Tabla 3-19: Resultado del Ensayo de Durabilidad.	52
Tabla 3-20: Resultados del ensayo Materiales Deletéreos.....	53
Tabla 3-21: Resultado de ensayo Densidades, Sales Solubles y Limite de Atterberg.	53
Tabla 3-22: Gravedades del agregado RAP.	54
Tabla 3-23: Puntos de Control de la Graduación del Agregado. ²⁸	55
Tabla 3-24: Porcentajes para las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.	55
Tabla 3-25: Distribución Granulometría para las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP...	56
Tabla 3-26: Propiedades estimadas de las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.	57
Tabla 3-27: Gravedad Especifica Efectiva de las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP. .	59
Tabla 3-28: Esfuerzo de Compactación. ³⁴	62
Tabla 3-29: Densificación para las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.....	68
Tabla 3-30: Determinación de %Gmm para N Inicial, N Diseño y N Máximo para las Mezclas de Prueba del (Diseño con RAP).	69

Tabla 3-31: Vacíos de Aire y Vacíos de Agregado Mineral de las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.	70
Tabla 3-32: Porcentaje de Asfalto estimado, Diseño con RAP.....	71
Tabla 3-33: Estimaciones del VAM y VFA para 4% de Vacíos de Aire, Diseño con RAP.	71
Tabla 3-34: Estimación para %Gmm @N Giros, Diseño con RAP.	72
Tabla 3-35: Estimación del Pbe y determinación de la DP, Diseño con RAP.	73
Tabla 3-36: Propiedades Volumétricas estimadas de las Mezclas de Prueba para N Diseño, Diseño con RAP.	74
Tabla 3-37: Criterios Volumétricos y de Densificación para el diseño.	74
Tabla 3-38: Porcentajes de Asfalto para la mezcla definitiva, Diseño con RAP.....	75
Tabla 3-39: Datos de Densificación para la Mezcla con 5,1 [%] de Pb, Diseño con RAP.	76
Tabla 3-40: Datos de Densificación para la Mezcla con 4,6 [%] de Pb, Diseño con RAP.	76
Tabla 3-41: Datos de Densificación para la Mezcla con 5,6 [%] de Pb, Diseño con RAP.	76
Tabla 3-42: Datos de Densificación para la Mezcla con 6,1 [%] de Pb, Diseño con RAP.	77
Tabla 3-43: Resumen de los valores de compactación para la mezcla con diferentes Pb, Diseño RAP:	78
Tabla 3-44: Resumen de las Propiedades Volumétricas de las Mezclas con diferentes Pb, Diseño con RAP.	78
Tabla 3-45: Resumen de los requerimientos de las Propiedades Volumétricas para el diseño.....	79
Tabla 3-46: Parámetros Volumétricos estimados para un 5,4% de Pb, Diseño con RAP.	79
Tabla 3-47: Resultado del ensayo de Susceptibilidad a la Humedad, Diseño con RAP. ...	84
Tabla 4-1: Parámetros Volumétricos de los Diseños.....	87
Tabla 4-2: Resultados del ensayo Módulo de Rigidez, Diseño Base.....	94
Tabla 4-3: Resultados del ensayo Módulo de Rigidez. Diseño con RAP.....	95
Tabla 4-4: Resultados del ensayo Rueda de Hamburgo, Diseño Base.	98
Tabla 4-5: Resultado del ensayo de Rueda de Hamburgo, Diseño con RAP.	99
Tabla 5-1: Valores de los materiales de una MAC.	103
Tabla 5-2: Ahorro de una MAC con incorporación de RAP para 1[m ³].	103

“DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MEDIANTE LA METODOLOGÍA SUPERPAVE CON LA INCORPORACIÓN DE 25% DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP), MÁS ENSAYOS DE RUEDA DE HAMBURGO Y MÓDULO DE RIGIDEZ”

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

El pavimento asfáltico corresponde a unas de las opciones más frecuentes para la vialidad chilena como elemento estructural, motivo principal para este estudio, donde se hace necesario conocer innovaciones y avances en materia de mejoramiento de la calidad y disminución del costo tanto en el proceso de diseño y construcción de la mezcla asfáltica.

El método Marshall es el modo tradicional de diseñar una mezcla asfáltica caliente (MAC) en Chile, dispuesto por el Manual de Carreteras (MC). En Estados Unidos se ha desarrollado el método SUPERPAVE (SUPERior PERforming Asphalt PAVements), el cual se basa en el desempeño del pavimento y evalúa mejor las propiedades de los agregados y ligante asfáltico.

Un material que no se ha explotado en Chile es el recurso del pavimento asfáltico reciclado (RAP de sus iniciales en inglés). La reutilización de este es un beneficio tanto económico como ambiental, económico porque el RAP posee ligante asfáltico y agregados pétreos por ende al reutilizarlo en la MAC disminuye los porcentajes de materiales vírgenes, y ambiental debido a que disminuye la explotación de los recursos naturales no renovables (agregados pétreos y ligante asfáltico) y disminuye los escombros de construcción que van directo a los botaderos.

En la presente memoria de título, se desarrolla el método SUPERPAVE para el diseño volumétrico de una MAC homologando el Diseño Base realizado para el proyecto “Conservación mayor pista 17 R / 35 L Aeropuerto Arturo Merino Benítez 2017 – 2018”, pero con la incorporación de un 25% de RAP, entregando antecedentes de la metodología y resultados finales de la mezcla con ensayos de desempeño de Rueda de Hamburgo y Módulo de Rigidez.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Se presentan los objetivos generales y específicos de la presente memoria.

1.2.1 Objetivos Generales

- Realizar el diseño volumétrico de una MAC por la metodología SUPERPAVE según el manual MS-2, Asphalt Mix Design Methods¹ para el proyecto “Conservación mayor pista 17 R / 35 L Aeropuerto Arturo Merino Benítez 2017 – 2018”, cumpliendo con sus especificaciones técnicas. Este trabajo que se realiza en conjunto con los memoristas Sebastián Contreras y Rodrigo Fernández.
- Estudiar la incorporación de un 25% RAP en el diseño volumétrico de una MAC por la metodología SUPERPAVE según el manual MS-2, Asphalt Mix Design Methods¹, homologando el diseño del proyecto “Conservación mayor pista 17 R / 35 L Aeropuerto Arturo Merino Benítez 2017 – 2018”.
- Alcanzar las Propiedades Volumétricas de la MAC con 25% de RAP según la especificación SUPERPAVE y verificar que cumpla los requisitos del diseño especificado.
- Realizar a la mezcla con un 25% RAP los ensayos de desempeño de Rueda de Hamburgo y Módulo de Rigidez, llevados a cabo según la normativa UNE-EN 12697-22:2008+A1² y UNE-EN 12697-26:2012³.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar las propiedades del recurso RAP para su incorporación en el diseño de MAC.
- Determinar las proporciones de material pétreo para la combinación granulométrica de la mezcla, verificando el cumplimiento de los requerimientos del diseño especificado.
- Determinar el contenido óptimo teórico de asfalto virgen, verificando el cumplimiento de los requerimientos del diseño especificado.

- Confeccionar las mezclas de prueba en Laboratorio, mediante las proporciones de agregados pétreos, asfalto virgen y RAP según la metodología SUPERPAVE.
- Analizar los resultados obtenidos de las mezclas de prueba, los vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA) y proporción de polvo para determinar la estructura final del diseño, para satisfacer los requerimientos del diseño a homologar y los requisitos SUPERPAVE.
- Confeccionar las probetas con el diseño final para realizar los ensayos de Rueda de Hamburgo y Módulo de Rigidez

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO

Se presentan los alcances del estudio de la presente memoria de título:

- La presente memoria de título da a conocer el procedimiento para un diseño de MAC con la incorporación de un 25% de RAP, mediante la metodología SUPERPAVE cumpliendo los parámetros establecidos en el diseño a homologar que se desarrolló primero, “Conservación mayor pista 17 R / 35 L Aeropuerto Arturo Merino Benítez 2017 – 2018”. El diseño está en base a parámetros de propiedades volumétricas de la MAC, los cuales son: vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA), proporción de polvo y porcentaje de asfalto de la mezcla.
- El análisis del material RAP solo incorpora la clasificación de sus materiales pétreos. El ligante asfáltico recuperado del RAP no se clasificará según el desempeño PG de la metodología SUPERPAVE. El agregado pétreo se le determinara las propiedades de consenso según la norma ASTM que corresponda, más el análisis granulométrico. Ambos análisis de las propiedades de los agregados deberán cumplir con los requisitos especificados.
- El propósito de esta memoria de título requiere el Nivel 1 del método de diseño SUPERPAVE, referente a la determinación de las propiedades volumétricas de la mezcla de diseño y la posterior evaluación de la Susceptibilidad a la Humedad (TSR) según la norma ASTM D 4867⁴, con objeto de evaluar la resistencia a la tracción indirecta de la nueva mezcla de diseño. Todo lo mencionado anteriormente normado según el texto MS 2, Asphalt Mix Design Methods¹.
- Los ensayos concernientes a la determinación de la calidad de los materiales empleados en el diseño corresponderán nada más, a aquellos que permitan determinar la máxima capacidad de soporte ante sollicitaciones del nivel de tránsito (ESAL's).
- Los ensayos de Rueda de Hamburgo y Modulo de Rigidez son llevados a cabo según la normativa UNE-EN 12697-22:2008+A1² y UNE-EN 12697-26:2012³.

- La compactación de los especímenes se realizó mediante el Compactador Giratorio SUPERPAVE (SGC), marca Troxler, modelo 5850.
- El trabajo realizado para la presente memoria es llevado a cabo en las dependencias del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obra (LEMCO), de la Universidad Federico Santa María, Casa Central, Ciudad de Valparaíso.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La presente memoria tiene un enfoque teórico – práctico (experimental) desarrolladas básicamente en 3 etapas:

1. Marco Teórico Conceptual.
2. Desarrollo Experimental.
3. Análisis de Resultados.

En cada una de las etapas mencionadas, se desarrollarán las siguientes labores específicas:

1. Marco Teórico Conceptual:
 - Revisión bibliográfica y lectura de manual y normas MS-2¹, AASHTO y ASTM relacionadas con el método de diseño SUPERPAVE.
 - Breve descripción de cada prueba, características de los especímenes, procedimiento de trabajo y parámetros involucrados.
2. Desarrollo Experimental:
 - Selección de los materiales de ligante asfáltico y agregados pétreos que cumplan los criterios de diseño.
 - Desarrollar una combinación de agregados pétreos.
 - Preparación de especímenes de prueba en laboratorio.
 - Realización los ensayos a los especímenes de prueba y analizar las propiedades volumétricas.
 - Selección de la mejor combinación de los agregados pétreos del diseño.
 - Selección del contenido óptimo de ligante asfáltico de diseño.
 - Evaluación de la mezcla de diseño a la Susceptibilidad a la Humedad.
 - Preparación del material RAP.
 - Desarrollar una combinación de agregados pétreos más RAP.
 - Preparación de especímenes de prueba en laboratorio con 25 [%] de RAP.
 - Realización los ensayos a los especímenes de prueba y analizar las propiedades volumétricas.
 - Selección de la mejor combinación de los agregados pétreos más RAP del diseño.

- Selección del contenido óptimo de ligante asfáltico virgen de diseño.
- Evaluación de la mezcla de diseño a la Susceptibilidad a la Humedad.
- Preparación, elaboración y evaluación de especímenes para los ensayos de Rueda de Hamburgo y Modulo de Rigidez.

3. Análisis de Resultados

- Análisis de resultados de acuerdo con la secuencia de la metodología de diseño.
- Análisis general e interpretación de resultados, de ensayos de densidad, de densificación de las mezclas y de propiedades intrínsecas al método de diseño.
- Resultados de los ensayos de desempeño de Rueda de Hamburgo y Módulo Rigidez.
- Conclusiones generales.

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La presente memoria de título está compuesta por una sucesión de capítulos, en los que se da a conocer la metodología de diseño SUPERPAVE para MAC con incorporación de RAP, a continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los 4 capítulos que la componen:

- Capítulo 1: Se exponen los antecedentes generales del presente estudio, y una breve reseña de los puntos a abarcar.
- Capítulo 2: Se presentan generalidades de las mezclas asfálticas y se destaca sus componentes, ligante asfáltico y agregado mineral. Se plantea el RAP como agregado de la MAC y su metodología de diseño SUPERPAVE.
- Capítulo 3: Se presenta una explicación detallada y la selección, según el método de diseño SUPERPAVE, tanto de los componentes y propiedades volumétricas de la mezcla, así como, de la preparación de las probetas y realización de los ensayos de desempeño.
- Capítulo 4: Se presentan los resultados del estudio.
- Capítulo 5: Se presentan las conclusiones de la memoria de título.
- Referencias.
- Anexos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MEZCLA ASFÁLTICA

Una mezcla asfáltica consiste en una combinación uniforme de agregados pétreos y ligante asfáltico, de tal manera que los agregados quedan recubiertos por una lámina delgada y continua de asfalto.

El objetivo de un diseño de mezcla asfáltica es determinar la combinación más adecuada de los agregados pétreos y ligante asfáltico, de tal manera que garantice un rendimiento duradero como estructura del pavimento ante las condiciones ambientales y tránsito de carga¹. El diseño correcto de una mezcla asfáltica implica apegarse a un conjunto de procedimientos de Laboratorios establecidos, que serán vistos en el tercer capítulo de la presente memoria.

Existen diferentes tipos de mezclas asfálticas, pero para esta memoria de título se empleará el termino MAC, como se mencionó antes. Se llaman así, calientes, debido que para poder secar los agregados y obtener una fluidez adecuada del ligante asfáltico para el proceso de mezclado (viscosidad), estos deben calentarse a altas temperaturas.

2.2 MÉTODOS DE DISEÑO

Existen diferentes métodos de diseño. En Chile oficialmente se usa el Método Marshall mediante el Manual de Carreteras (MC), pero en la presente memoria se emplea el Método SUPERPAVE, ambos descritos en la sección 2.2.1 y 2.2.2 respectivamente.

2.2.1 Marshall

Método desarrollado durante la segunda guerra mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales. Este método no ha sufrido modificaciones desde los años 40's.

2.2.2 SUPERPAVE

Diseño volumétrico completo para la mezcla asfáltica, basado en el contenido de vacíos, creado en Estados Unidos iniciado en el año 1987. Tiene un funcionamiento enfocado en predicciones a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, para el desempeño del pavimento. Está siendo aplicado actualmente por un sin número de países, debido a que se logró encontrar una relación efectiva entre las propiedades volumétricas y su correcto funcionamiento en servicio.

Este método evalúa los componentes de la mezcla en forma individual, es decir este sistema consta de dos elementos, una especificación para el ligante asfáltico según clasificación PG y un sistema de diseño para la mezcla de agregados pétreos. Además, este sistema especifica propiedades volumétricas y criterios que deben cumplir la combinación de agregados pétreos. Estos tres puntos serán descritos brevemente en la sección 2.2.2.1 Ligante Asfáltico, 2.2.2.2 Agregados Pétreos y 2.2.2.3 Propiedades Volumétricas.

2.2.2.1 Ligante Asfáltico

El comportamiento de la MAC dependerá de las características del ligante asfáltico, las cuales son: temperatura, tiempo de carga y envejecimiento. El asfalto es susceptible a la temperatura y tiempo de carga, donde este se comporta como un material duro y elástico a bajas temperaturas y cargas rápidas, para pasar a ser blando y viscoso a altas temperaturas y cargas estáticas o lentas⁶.

El asfalto es orgánico y reacciona con el oxígeno cambiando su estructura, haciendo que este se rigidice o endurezca y aumente su viscosidad, a esto se le llama endurecimiento por envejecimiento. Donde existen dos tipos de envejecimiento, el Primario que ocurre en la producción y colocación de la MAC y el Secundario que se origina con el pavimento en servicio.

En la metodología SUPERPAVE se establece una especificación para los ligantes asfálticos por desempeño, llamada Clasificación PG (Performance Grade), donde el sistema de graduación se basa en las condiciones climáticas extremas de donde se construirá el pavimento. El grado PG fija criterios de desempeño constantes, entregando las temperaturas extremas e intermedias a las cuales el ligante asfáltico puede alcanzar un

desempeño favorable en el pavimento. La especificación se define según su grado de comportamiento PG XX-YY.

2.2.2.2 Agregado Mineral

Este material se refiere a los agregados pétreos o áridos, donde su importancia son sus características y su proporción en la combinación de ellos. La metodología SUPERPAVE divide sus propiedades en dos tipologías, las cuales son:

- **Propiedades de Origen:** son empleadas para calificar (en términos de calidad y aceptación) las fuentes locales de los agregados empleados en el diseño. Son propiedades importantes, pero no se consideraron valores críticos, puesto que dichos valores son específicos de cada fuente de origen. Las propiedades de origen del agregado son; Tenacidad, Durabilidad, y Materiales Deletéreos.
- **Propiedades de Consenso:** son fundamentales para el buen desempeño de la MAC, los valores de los criterios están en función del nivel de tránsito del diseño. Los valores de estas propiedades son para la combinación de los agregados y no para la evaluación individual de cada uno de ellos. Las propiedades son las siguientes; Angularidad del agregado grueso, Angularidad del agregado fino, Partículas planas y alargadas, y Contenido de Arcilla o Equivalente de Arena.

Adicionalmente se clasifica el agregado por graduación, donde se determina la granulometría de cada agregado pétreo del diseño bajo la norma ASTM C1361⁵. Esta especificación según SUPERPAVE emplea una carta granulométrica plasmada en un gráfico, donde las abscisas representan las aberturas de los tamices elevadas a la potencia 0,45 y las ordenadas corresponden a los porcentajes que pasan en cada tamiz:¹. Así mismo, este gráfico indica la línea de máxima densidad, que corresponde a la traza en línea recta desde el tamaño máximo del agregado hasta el origen.

2.2.2.3 Propiedades Volumétricas

Un elemento importante para el rendimiento del pavimento asfáltico son las propiedades volumétricas, tanto del asfalto, los agregados y la mezcla misma. En el procedimiento SUPERPAVE, estos parámetros son de suma importancia en el procedimiento del diseño, donde el diseño busca un porcentaje de asfalto óptimo de acuerdo con los parámetros medidos.

Las propiedades volumétricas se determinan usando mediadas de masa y/o volumen de la mezcla y/o sus componentes individuales, tanto asfalto y agregados. Se presenta el término **Gravedad Específica**, la cual es la relación entre la masa de una unidad volumen de material y la masa del mismo volumen de agua a 23[°C].

Los parámetros fundamentales de las Propiedades Volumétricas son las Gravedades Específica del asfalto, de los agregados y de la mezcla. Además, las Propiedades Volumétricas se determinan en función de los vacíos, como los Vacíos de Aire (Va), Vacíos de Agregado Mineral (VAM) y Vacíos llenos de Asfalto (VFA).

2.3 ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

La presente memoria se basa en el Proyecto anteriormente mencionado para la Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Públicas, donde se desarrolla un diseño de MAC según la metodología SUPERPAVE para el Aeropuerto Arturo Merino Benites, diseño que se nombra como "Diseño Base". En base a este diseño, se desarrolla el diseño de una segunda MAC con la incorporación de un 25% de RAP, donde su principal objetivo es homologar el Diseño Base.

Ambos diseños de MAC deben cumplir con las Especificaciones Técnicas (EETT) del Proyecto y los criterios de la metodología aplicada. Dichas EETT son el documento técnico oficial que establece las exigencias y procedimientos que deben ser empleados en el Proyecto, tanto en la calidad de los materiales empleados como los métodos de construcción y aceptación del producto final.

Asimismo, dichas especificaciones piden un listado de ensayos de caracterización de la mezcla asfáltica, de los cuales dos serán realizados en el presente estudio. Dichos ensayos se presentan en la siguiente sección 2.3.1.

2.3.1 Caracterización de la Mezcla

Corresponde a los ensayos de desempeño de la mezcla asfáltica, donde dichos ensayos complementan el proceso del diseño prediciendo el desempeño del pavimento asfáltico en servicio. Los ensayos desarrollados en la presente memoria corresponden al ensayo de Módulo de Rigidez y Ahuellamiento, los cuales serán descrito en la sección 2.3.1.1 y 2.3.1.2.

2.3.1.1 Módulo de Rigidez

El módulo de rigidez es una propiedad del material y corresponde a una curva esfuerzo-deformación de una MAC. Hay varias curvas de donde se pueden medir el módulo de rigidez como propiedad, donde los factores como geometría, modo de carga, velocidad de carga, temperatura, edad, tipo de asfalto, tipo de áridos, vacíos de aire y humedad pueden hacer variar el valor del módulo de rigidez.

El módulo de rigidez corresponde a la relación que existe entre la tensión y la deformación durante un determinado tiempo de carga, para un material sujeto a una carga con una deformación controlada. Lo define la Ecuación 2-1:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Ecuación 2-1: Módulo de Rigidez.

Donde:

- E = Módulo de Rigidez.
- σ = Tensión aplicada.
- ε = Deformación aplicada.

Para el presente estudio de memoria, el Módulo de Rigidez es determinado mediante la normativa UNE-EN 12697-26³ por medio de probetas cilíndricas hechas en laboratorio, donde este valor es entregado de forma automática por el software del equipo de ensayo de Tracción Indirecta, Máquina Servo Hidráulica Universal HYD25-II, Cooper Technology.

El principio del ensayo consiste en someter probetas de una MAC a deformaciones en su rango lineal, bajo cargas repetidas o cargas con deformación controlada. Se miden las amplitudes de la tensión y de la deformación, junto con la diferencia de fase entre tensión y deformación. El sistema de carga debe incorporar un aplicador que cargue la probeta a lo

largo vertical y deba ser capaz de aplicar impulsos de carga repetidos que alteren los periodos de descanso. La carga debe tener forma de una onda medio seno.

2.3.1.2 Ahuellamiento

El ahuellamiento es una depresión de la superficie del pavimento asfáltico, causada por deformaciones inelásticas en alguno o en todas las capas de la estructura del pavimento y subrasante. Estas deformaciones son causa de varios factores como la densificación vertical, movimientos laterales de los materiales (MAC, bases granulares y subrasante), cargas de tránsito pesado o lento, error del diseño, acumulación de la deformación permanente o ahuellamiento, entre otros. Las fallas prematuras o severas son relacionadas a flujo lateral y/o la inadecuada resistencia al corte de las capas del pavimento.

Para el presente estudio, el ahuellamiento es determinado mediante la normativa UNE-EN 12697-22² por medio del ensayo de Rueda de Hamburgo correspondiente a ensayos de rueda cargada, en el caso de dispositivo pequeño, procedimiento B en agua.

Este ensayo, evalúa la profundidad del ahuellamiento y la susceptibilidad a la humedad de las probetas de MAC elaboradas en laboratorio o testigos, para el presente estudio se emplearán probetas de laboratorio. Las probetas se acondicionan sumergiéndolas a un baño térmico controlado de 50[°C], para luego aplicarle una carga concentrada de movimiento oscilatorio por medio de un dispositivo de rueda. Se mide la profundidad del ahuellamiento y el número de pasadas de la rueda de carga.

2.4 PAVIMENTO ASFÁLTICO RECLADO, RAP

La presente sección se compone primeramente de una introducción sobre el RAP, donde se presentan el material a grandes rangos. Posterior se describe la revisión bibliográfica del presente estudio, presentando la situación actual de Chile y Estados Unidos para luego comparar sus diferencias. Además, se expone como afecta el RAP en el desempeño de la MAC. Y finalmente, se describe la metodología aplicada en el presente estudio para el diseño de MAC con RAP.

2.4.1 Introducción

Conocido como RAP por sus siglas en inglés, es el término dado al material extraído y/o procesado de nuevo de un pavimento asfáltico en servicio; que se conforma de ligante asfáltico y agregados pétreos. La mayor parte del RAP se produce del fresado de pavimentos antiguos, trozos de demolición o de excesos de producción en plantas.

El RAP contiene los mismos componentes que una MAC, ligante asfáltico y agregados pétreos, por ende, puede ser incorporado en una MAC. Los beneficios de la utilización del RAP son múltiples, entre ellos la reducción de los costos en producción, reutilización de los materiales, disminución del volumen de los botaderos, ahorro en extracción de materia prima, entre otros. Se genera un beneficio ambiental, por la reducción del agotamiento de los recursos naturales no renovables, como el agregado virgen y el ligante asfáltico, también por la reducción de los escombros de construcción. Se requiere aproximadamente entre un 1% a un 5% de asfalto virgen para una MAC con RAP; dependiente del porcentaje de asfalto que contenga el RAP y el porcentaje que tenga el proyecto, en cambio una nueva MAC puede llegar a requerir hasta más de un 6% en algunos casos.

2.4.2 Revisión Bibliográfica

Se presenta el uso del RAP en Chile y Estados Unidos, para su posterior comparación entre ambos países. También se expone como afecta el RAP en la MAC.

2.4.2.1 Uso de Mezclas con Rap en Chile

En Chile se emplea como documento oficial el Manual de Carreteras (MC), documento que pertenece a la Dirección de Vialidad (DV) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). El MC es un documento de carácter normativo, que guía los diferentes tipos de proyectos técnicos en Chile guiados por el MOP. Recoge experiencia nacional e internacional, donde constituye la calidad mínima para el desarrollo de dichos proyectos. El MC presenta varios volúmenes, el empleado en este estudio es el Volumen 5, Edición 2017, sección 5.423 “Mezclas Asfálticas en Caliente con RAP”.²⁰

El alcance del Manual es definir los trabajos asociados a la MAC con RAP, incluyendo logística de los materiales de ella, diseño, producción, construcción y control de la mezcla como producto final. Por lo anterior, se definirá esta sección en tres; RAP como material, Diseño y Producción.

Además, en Chile se han realizado algunos proyectos con la incorporación de RAP como³⁵:

- Contrato “Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué, Tramo DM 17.578,35 a DM 29.497,99, Provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso”. Un tramo de prueba de MAC con 20% de RAP, noviembre 2012.
- Contrato “Conservación Global Mixta por Nivel de servicio y Precios Unitarios de Caminos de la Provincia de Melipilla, sector Norte, Etapa II, Región Metropolitana, Camino Cruce Ruta G-78- (Malloco)- Cruce G-78 (Puangue)”. Un tramo de prueba de MAC con 20% de RAP.
- Contrato “Construcción Habilitación Ruta G-30- Sector Cerrillos – Lonquén, Tramo 4 y 5, Comunas de Calera de Tango y Talagante, Provincia de Maipo y Talagante, Región Metropolitana”.

2.4.2.1.1 RAP como Material

La procedencia del material RAP puede ser del fresado de pavimentos asfálticos, trozos de demolición de pavimentos asfálticos o excesos de producción. El material no puede proceder de pavimentos con deformaciones plásticas (ahuellamiento).

El RAP deberá ser procesado en planta de áridos, para dividirlos en dos fracciones, una gruesa y otra fina, la primera bajo el tamiz 3/4 (19[mm]) y la segunda bajo el tamiz 3/8 (9 [mm]). Estos acopios de las fracciones del RAP deben ser homogéneos.

Cada fracción deberá caracterizarse mediante los ensayos de granulometría, densidad aparente, real y neta, porcentaje de absorción, porcentaje de asfalto y caracterización del ligante recuperado (si el porcentaje de asfalto en el RAP es mayor a 3%), y contenido de humedad.

Si el porcentaje de ligante asfáltico que posee el RAP es menos a un 3%, el RAP deberá considerarse sólo como un árido más dentro de la mezcla asfáltica. Si el porcentaje de ligante asfáltico en el RAP es mayor que 3%, el porcentaje a agregar será el óptimo teórico menos el porcentaje de asfalto del RAP.

2.4.2.1.2 Diseño

Solo permite la incorporación de una cantidad máxima de 20% de RAP, en relación con la masa total de los áridos. Asimismo, solo permite que el tamaño máximo del RAP deba ser igual al tamaño máximo del árido definido para la mezcla.

En el diseño de la mezcla se emplea el Método Marshall, donde primero se debe realizar una dosificación de mezcla asfáltica sin RAP, es decir, crear una mezcla patrón. Se busca la combinación granulométrica entre los áridos y las fracciones del RAP, de tal forma que cumpla con la banda de trabajo de la mezcla patrón. Con la combinación obtenida, se prepara la mezcla con el porcentaje optimo determinado en la mezcla patrón.

Realizada la mezcla asfáltica con RAP, se procese a seguir con el método Marshall y su caracterización como la Estabilidad, Fluencia, Densidad, Huecos en la Mezcla y VAM, donde se aprobará la mezcla con RAP según los criterios de aceptación de la metodología mencionada.

Como acotación, al utilizar el Método Marshall como metodóloga del diseño de la mezcla, el ligante virgen se clasifica según viscosidad absoluta: Cemento Asfáltico (CA) 24 o 14.

2.4.2.1.3 Producción

En el proceso de producción de la mezcla, se debe tener en cuenta que el RAP debe incorporarse posterior al calentamiento de los áridos, sin que afecte negativamente al asfalto del RAP. Además, la temperatura a la cual se debe calentar el RAP corresponde al mismo rango considerado para los áridos.

2.4.2.2 Uso de Mezclas con RAP en Estados Unidos

Para el caso de Estados Unidos se emplea la información contenida en el Manual MS-2¹, donde dicho manual corresponde a tomo que describe los Métodos de Diseños de Mezclas Asfálticas, realizado por el Instituto de Asfalto. Este Instituto corresponde a una asociación internacional del rubro del asfalto, productores, fabricantes y negocios asociados.

El manual, corresponde a un estándar para la industria de diseño de mezclas, donde es una guía práctica basada en tecnologías probadas, que incorpora la información más reciente de la materia, además de poseer todos los métodos en relación con los manuales de mezclas anteriores a este. Además, se basa en normas AASHTO, ASTM y entre otras.

El Capítulo dedicado al RAP corresponde al 11. Proporciona la información para poder guiar un diseño de una mezcla asfáltica que utilice como material el RAP, donde este pueda preservar las propiedades originales establecidas en SUPERPAVE.

Se definirá esta sección en tres; RAP como material, Diseño y Producción.

2.4.2.2.1 RAP como Material

La procedencia del material RAP puede ser del fresado de pavimentos asfálticos, trozos de demolición de pavimentos asfálticos o excesos de producción. Para maximizar efectivamente el uso de RAP en una MAC, se debe conocer la fuente y mantener acumulaciones separadas de RAP de proyectos específicos o, al menos, mantener RAP de un tipo de proyecto (por ejemplo, carreteras) separadas del RAP de otro tipo (por ejemplo, estacionamientos), estos dos pueden tener propiedades y contenido de asfalto diferentes, además de las propiedades y gradación de los agregados.

Se puede fraccionar el RAP produciendo dos acopios, uno grueso y otro fino teniendo así una gradación más controlada, además reduciendo la variabilidad general de

la mezcla final que poseen mayores porcentajes de RAP. No obstante, el fraccionamiento del RAP genera que en la fracción más fina se concentre el ligante asfáltico, reduciendo el contenido del ligante en la fracción gruesa.

En cuanto a la caracterización del RAP este dependerá del porcentaje a incorporar a la mezcla, pero independiente del porcentaje que se utilice, se determina el contenido de asfalto del RAP y el análisis granulométrico y graduación a los agregados pétreos para todos los porcentajes de RAP. Para los porcentajes más altos de RAP, se debe determinar las propiedades físicas del ligante asfáltico recuperado del RAP, para así poder seleccionar un ligante asfáltico virgen adecuado.

El RAP se manipula de igual manera que los demás áridos, salvo por la temperatura que debe ser calentado para el mezclado, esto se describe en la sección 2.4.2.2.3 Producción.

2.4.2.2.2 Diseño

El diseño de la mezcla es en base a la metodología SUPERPAVE, donde este proceso depende del porcentaje de RAP a incorporar para poder seleccionar un ligante asfáltico virgen adecuado. Al emplear el método SUPERPAVE, se utiliza la clasificación PG al referirse el ligante asfáltico.

Para seleccionar el ligante virgen el método se segmenta en tres rangos en función del porcentaje de RAP, esto según la recomendación de la norma AASHTO M323 "Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design"²⁸ que además el manual MS-2¹ respalda, la información se muestra en la Tabla 2-1:

Tabla 2-1: Guía para selección del ligante asfáltico virgen según AASTHO M 323.

Grado de ligante asfáltico virgen recomendado	Porcentaje de RAP
No hay cambio en la selección del ligante.	<15
Seleccionar un ligante virgen un grado más bajo del normal (por ej. Seleccionar un PG 58-28 si sería utilizado normalmente un PG 64-22).	15 a 25
Seguir las recomendaciones de los gráficos de mezcla.	>25

Los datos de la Tabla 2-1 se crearon de forma empírica, donde los datos fueron establecidos debido a que cuando se agregó 10% de RAP, no hubo cambios en el grado del ligante mezclado. Cuando se agregó 20% de RAP, el grado del ligante mezclado era

aproximadamente un grado más rígido. Por último, cuando se agregó 40% de RAP el grado del ligante mezclado a veces era solo un grado más rígido, en otras dos grados más rígido.

Igualmente, para establecer un adecuado PG del ligante virgen se puede determinar las temperaturas críticas del ligante virgen, esto conociendo el porcentaje y las propiedades del ligante recuperado del RAP, o cuando se conoce el grado del ligante mezclado final deseado (grado PG del proyecto). Esto mediante la siguiente Ecuación 2-2:

$$T_{virgen} = \frac{T_{mezcla} - (P_{RAP} \times T_{RAP})}{(1 - P_{RAP})}$$

Ecuación 2-2: Temperatura Crítica del grado PG del ligante asfáltico virgen de una MAC con RAP.

Donde:

- T_{virgen} = Temperatura crítica del ligante asfáltico virgen.
- T_{mezcla} = Temperatura crítica del ligante asfáltico mezclado (final deseado).
- P_{RAP} = Porcentaje de RAP a incorporar a la MAC, en razón.
- T_{RAP} = Temperatura crítica del ligante asfáltico del RAP.

Con la Ecuación 2-2, se puede determinar las temperaturas críticas alta, intermedia y baja del ligante asfáltico virgen. No obstante, el manual MS-2¹ ofrece recomendaciones según los gráficos de mezclas cuando se incorpora más de un 25% de RAP a la MAC, pero se hace necesario determinar las propiedades del ligante recuperado del RAP, es decir su grado PG.

Posterior a la selección del ligante virgen adecuado y el porcentaje de RAP a incorporar, el diseño de la MAC se debe realizar a través del proceso normal de la metodología SUPERPAVE.

2.4.2.2.3 Producción

Para el proceso de mezclado y compactación de la MAC con RAP, solo se debe tener en cuenta que el RAP no debe ser precalentado a una temperatura mayor de 110[°C] para el proceso de mezclado, ya que este posee ligante asfáltico. Entonces, para poder compensar la introducción de un material de temperatura inferior, el agregado virgen debe calentarse en una cierta cantidad por encima de la temperatura de mezclado.

Aunque las temperaturas reales de la mezcla varían, la regla general es aumentar la temperatura de los agregados vírgenes en $0.5[^\circ\text{C}]$ por cada porcentaje de RAP usado en la mezcla. La temperatura de mezclado del asfalto virgen no debe ajustarse.

2.4.2.3 Diferencias entre Chile y Estados Unidos

En relación con las secciones anteriores 2.4.2.1 y 2.4.2.2, se presenta en esta sección las diferencias entre Chile y Estados Unidos en uso de mezclas asfálticas con RAP.

En primer lugar, la gran diferencia entre ambos países es la metodología del diseño de la MAC. En Chile se emplea el método Marshall y en cambio Estados Unidos se emplea el método SUPERPAVE. Comparando, en Estados Unidos el método Marshall va en decadencia desde hace un tiempo, por el contrario, en Chile el método oficial es el Marshall y solo hace un par de años se ha introducido el método SUPERPVE, en donde las obras que se ha implementado son mínimas.

Con respecto al porcentaje de RAP en la mezcla, en Chile el MC limita el porcentaje máximo con un 20% de RAP en la mezcla y en cambio el método SUPERPAVE no hace referencia a la limitación del porcentaje a incorporar. Asimismo, el método SUPERPAVE divide en tres rangos los porcentajes de RAP en la MAC en función para la selección del ligante virgen.

Además, el porcentaje de RAP se expresa en forma diferente en función de la metodología del diseño. El método Marshall expresa el porcentaje de RAP en relación con la masa total de los áridos. Por el contrario, el método SUPERPAVE expresa el porcentaje de RAP en relación con la masa total de la mezcla. Dicho en otras palabras, el mismo porcentaje de RAP en mezclas SUPERPAVE y Marshall no son los mismos, aunque la diferencia porcentual no es mayor, para el mismo porcentaje de RAP la mezcla SUPERPAVE contiene más RAP que la mezcla Marshall.

Asimismo, ambos métodos clasifican de distintas maneras el ligante asfáltico. El método Marshall clasifica el ligante por viscosidad absoluta, encasillando en CA 24 o 14. En cambio SUPERPAVE clasifica el ligante por Grado PG, donde este se basa en condiciones climáticas extremas en las cuales el ligante puede tener un desempeño favorable.

Ambos métodos hablan de un fraccionamiento del material por acopio, grueso y fino. No obstante, el MS-2¹ lo deja a criterio del diseñador mencionando sus ventajas y desventajas, no así el MC donde se debe realizar si o si dicho procedimiento.

También, el método SUPERPAVE realiza un estudio más profundo del RAP como agregado mineral, determinando además de las propiedades principales como granulometría y densidades, la angularidad el agregado grueso y fino, donde esta propiedad establece la fricción interna de la mezcla, logrando tener altas resistencia a las deformaciones permanente. El MC solo especifica los ensayos de granulometría, densidad Aparente, Real, Absorción de áridos gruesos y finos y porcentaje de humedad.

Por último, en lo que corresponde a temperatura hay diferencias importantes. El MC considera que la temperatura que se debe calentar el RAP corresponde a la misma que los demás áridos, para realizar el mezclado de la MAC. En cambio, el MS-2¹ considera que al poseer ligante el RAP este se debe calentar a no más de 110[°C], esto porque el ligante ya se encuentra envejecido y al calentarlo a una temperatura más alta (temperatura de los áridos) se estaría endureciendo el ligante aún más. Además, el MS-2¹ recomienda subir la temperatura de los áridos para compensar la introducción de un material a una temperatura inferior en el proceso de mezclado, así para lograr alcanzar la temperatura de mezclado indicada en el diseño.

2.4.2.4 Desempeño de Mezclas Asfálticas con RAP

El RAP posee un porcentaje de ligante que varía según el origen del material. Este ligante es más rígido que uno virgen, debido al envejecimiento causado por la exposición del pavimento al oxígeno durante su uso como pavimento en servicio. Por lo tanto, es de importancia evaluar la mezcla asfáltica final para poder determinar, como la porción de ligante envejecido puede afectar al desempeño de dicha mezcla.

Para poder analizar o concluir como afecta el RAP en la MAC primero se debe caracterizar este material. La caracterización básica es el contenido de asfalto y la granulometría del RAP, para lo cual se deben hacer pruebas de laboratorio para determinar dichas propiedades, las cuales se describen en la sección “332.4.3.1.1 Contenido de Asfalto y Agregados Pétreos” del presente Capítulo.

En cuanto a cómo afecta el RAP en el desempeño de la mezcla, la investigación “Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method

- NCHRP 9-12³⁶, plantea tres puntos para abordar la investigación del RAP; “Estudio de la Black Rock”, “Estudio del Efecto en el Asfalto” y “Estudio del Efecto en la Mezcla”. Esta investigación es conducida por National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), que corresponde a un programa que realiza investigaciones sobre problemáticas en la industria de carreteras en Estados Unidos, esto es dirigido por la Transportation Research Board (TRB).

En efecto, la investigación NCHRP 9-12³⁶ planea en los tres estudios lo siguiente; cómo se cohesionan el RAP en la mezcla asfáltica (si actúa como Black Rock/Roca Negra o no), como afecta la rigidez del ligante del RAP en las propiedades del ligante mezclado (Virgen y Recuperado del RAP) y como son los efectos del RAP en las propiedades de la mezcla final (Desempeño). A continuación, se describen los tres estudios y sus conclusiones de la investigación, en donde el estudio de más interés corresponde al tercero.

a) Black Rock

El concepto de Black Rock o Roca Negra es español, proviene de la siguiente interrogante ¿El ligante del RAP se mezcla total o parcialmente con el ligante virgen? Es decir, la incertidumbre es si el RAP actúa como una roca más o si ocurre una mezcla entre su ligante y el virgen en la mezcla asfáltica. El estudio investiga el comportamiento del RAP en el proceso de mezclado con los demás componentes.

Los sistemas de diseños de mezcla consideran que se genera una cohesión total en la mezcla con RAP y que para las mezclas con grandes porcentajes de RAP se debe tener en cuenta el efecto de la rigidez del ligante del RAP. Sin embargo, este estudio pretende determinar si lo anterior es cierto o no. Si se considera la rigidez del ligante del RAP y el material se comporta como una “Black Rock”, la mezcla asfáltica total no sería tan rígida como se espera. Por el otro lado, si se asume que el RAP actúa como “Black Rock” cuando realmente se genera una mezcla total de los ligantes, entonces se obtendrá una mezcla más rígida de lo previsto.

El estudio considera tres niveles de RAP (0%, 10% y 40%) y tres casos de mezcla los cuales son los siguientes:

- Black Rock: la mezcla contiene agregado virgen y agregado recuperado del RAP, con asfalto virgen (no contiene asfalto recuperado del RAP).

- Practica Actual: la mezcla contiene agregado y asfalto virgen, con el porcentaje de RAP correspondiente.
- Mezcla Total: la mezcla contiene agregado virgen y agregado recuperado del RAP, con la mezcla en proporción del asfalto virgen y el recuperado del RAP.

Los resultados del estudio muestran que si se produce una combinación entre el ligante del RAP y el virgen. A un bajo contenido de RAP, igual o menos de un 10%, los resultados muestran que no hay suficiente RAP para cambiar significativamente las propiedades de la mezcla. Sin embargo, con un 40% de RAP los efectos si fueron significativos, donde los resultados de la Practica Real se asemejan más a los de Mezcla Total que a las de Back Rock.

En fin, los resultados sugieren que la Practica Real logra una situación mucha más cercana a la Mezcla Total que a la Black Rock. También se confirma el concepto de gráficos de mezclas para altos contenidos de RAP y que para bajos contenidos de RAP no se necesitan grandes cambios, pero a medida que aumenta el contenido del RAP, se hace necesario emplear los gráficos de mezclas.

b) Efectos en el Asfalto

En este estudio se investiga los efectos de la rigidez del ligante del RAP sobre las propiedades del ligante mezclado (virgen y recuperado), conduciendo a la recomendación de emplear gráficos de mezcla.

Los resultados del estudio en base a la clasificación por desempeño PG, indico que el grado del ligante mezclado cambia a medida que aumenta el porcentaje de RAP, pero el grado de temperatura alta cambia más rápido que el grado de baja temperatura.

c) Efectos en la Mezcla

Este estudio investiga los efectos de la rigidez del ligante del RAP en la mezcla asfáltica final. Se emplean cuatro porcentajes de RAP (0%, 10%, 20% y 40%) y dos ligantes vírgenes (PG 52-34 y PG 64-22). Se realizan pruebas de desempeño de corte, tracción indirecta y fatiga.

Los resultados del estudio arroja en las pruebas de corte, que el Módulo Complejo de las mezclas aumenta exponencialmente con el contenido de RAP (mayoría de los casos). También, la deformación y la tensión de corte disminuyen a medida que el contenido de RAP aumenta. Estos resultados corroboran el efecto de la rigidez del RAP sobre las

propiedades de la mezcla, donde los efectos se vuelven más significativos entre 20% y 40% de RAP.

Asimismo, la prueba de tracción indirecta también respalda lo mencionado anteriormente. Al aumentar el contenido de RAP en la mezcla, la rigidez también aumenta. La mezcla con 10% de RAP arroja resultados similares a la mezcla de control con 0% de RAP. Igualmente que con las pruebas de corte, a más altos niveles de RAP los efectos se vuelven más significativos.

La prueba de fatiga también revela conclusiones similares, a medida que aumenta el contenido de RAP disminuye la vida de la fatiga (ciclos hasta la falla). Además, no hubo efecto significativo con la mezcla de 10% de RAP, pero sí con los porcentajes más altos de RAP. En relación con el ligante virgen, las vigas hechas con el ligante más suave (PG 64-22) presentaron una mayor vida a la fatiga, como se esperaba. Lo anterior respalda la recomendación de usar un ligante virgen más suave para altos porcentajes de RAP.

Por otra parte, combinando los resultados de los tres tipos de prueba, se evidencia que las mezclas con altos porcentajes de RAP se esperan que sean más rígidas, por lo tanto, más resistentes a la deformación permanente. Sin embargo, esta rigidez puede conducir a una disminución en la resistencia a bajas temperaturas y al agrietamiento por fatiga, a menos que se compense estas propiedades con la selección del ligante virgen.

Por último, los tres estudios se correlacionan en sus resultados de que existe un enfoque por rangos del contenido de RAP. Todos sugieren que existe un umbral para el contenido de RAP que, por debajo de él, los efectos son insignificantes (10%). En la escala del 20% de RAP, los efectos a veces eran significativos, pero no siempre. Y con el nivel del 40% de RAP, los efectos fueron bastante evidentes en la mayoría de los casos.

2.4.3 Metodología Aplicada

Para la presente investigación se usa como base el Manual MS-2¹ y la metodología SUPERPAVE.

En esta sección se desarrolla la metodología SUPERPAVE para diseño de la MAC con RAP, seleccionando el porcentaje de 25% de RAP en mención a la Tabla 2-1 anteriormente expuesta, esta proveniente de la norma AASHTO M323, donde dicho porcentaje es el máximo para poder usar el RAP como componente de la MAC, sin la necesidad de determinar las propiedades del asfalto recuperado del RAP.

La composición de esta sección se basa en describir las propiedades del RAP y como poder determinarlas. Además, se explica las consideraciones que se debe tener al emplear RAP en una MAC durante proceso del diseño SUPERPAVE.

2.4.3.1 Propiedades del RAP

En esta sesión se definen las propiedades o características del RAP y como se determinan. Dichas propiedades son necesarias para llevar a cabo el proceso del diseño de la mezcla asfáltica.

2.4.3.1.1 Contenido de Asfalto y Agregados Pétreos

Independiente del porcentaje que se utilice de RAP en la mezcla, se necesita conocer el contenido de asfalto del RAP ($P_{b(RAP)}$), para determinar el contenido de asfalto total de la MAC. Para determinar el contenido de asfalto del RAP, se extraer el asfalto de la mezcla por medio del ensayo según la norma ASTM D2172²¹ o AASHTO T 164²², y luego el ensayo de recuperación por medio de la norma ASTM D5404²³. Luego, se debe realizar un análisis granulométrico y graduación a los agregados pétreos mediante la AASHTO T 30²⁴.

2.4.3.1.2 Propiedades del Ligante Asfáltico del RAP

Paras las MAC con altos niveles de RAP, se hace necesario conocer las propiedades del ligante asfáltico del RAP, de tal manera que se pueda seleccionar un grado de ligante asfáltico virgen adecuado. Si es necesario determinar las propiedades del asfalto del RAP, se debe realizar un procedimiento de extracción/recuperación con disolvente a una muestra de RAP.

Se encuentran varios procedimientos con disolventes para la extracción/recuperación del ligante asfáltico de una mezcla asfáltica, pero el más usado para una extracción con disolvente es el método de la norma AASHTO T 164²², que corresponde al método estándar para la extracción cuantitativa del ligante asfáltico de una MAC. Esto seguido por la recuperación del ligante asfáltico por medio de los siguientes métodos; ASTM D5404/ D5404M²³, que corresponde al método estándar de recuperación del asfalto con solución por evaporador rotatorio; ASTM D 7906 ²⁵, para el método estándar

de recuperación de asfalto con solución de tolueno y evaporador rotatorio; AASHTO T 170²⁶ para el método estándar para la recuperación del asfalto mediante el método Abson.

Otro procedimiento posible de emplear combinado de la extracción/recuperación es la AASHTO T 319²⁷, que corresponde al método estándar para la extracción cuantitativa y recuperación del asfalto de mezclas asfálticas. Este procedimiento tendría menos efecto sobre las propiedades químicas y físicas del ligante asfáltico recuperado del RAP.

2.4.3.1.3 Gravedad Específica del Agregado RAP

La Gravedad Específica del RAP, además de ser necesaria para poder caracterizar el material, se emplea para poder realizar el análisis volumétrico de la mezcla, específicamente el cálculo del VAM. Además, se hace necesario conocer el G_{sb} del RAP para determinar el G_{sb} de la combinación (agregados pétreos más RAP).

Hay dos formas principales de determinar la gravedad específica del RAP según el Manual MS-2¹, donde el escogido para este estudio es el Método 2a (recomendado por el autor), el cual es siguiente:

- Se determina la G_{mm} del RAP.
- Se determina o se conoce P_b del RAP.
- Se determina la G_{se} del RAP.
- Se asume el asfalto absorbido (P_{ba}) del RAP.
- Se calcula el G_{sb} del RAP.

Además, al material RAP no se puede determinar la Gravedad Específica Aparente (G_{sa}) debido a que el agregado ya ha sido recubierto con ligante asfáltico, por lo tanto, se han afectado sus poros superficiales.

Se procede a describir las Gravedades Específicas del RAP.

a) Gravedad Específica Teórica Máxima del RAP, G_{mm} (RAP)

Se determina esta gravedad mediante el ensayo ASTM D2041¹⁸ igualmente que, con una MAC estándar, pero se debe tener una de consideración especial en base a la especificación de la normativa del ensayo:

- Si el RAP contiene partículas con caras no cubiertas con asfalto, resultado de la trituración y/o fresado, estas pueden absorber agua durante el procedimiento del ensayo. Para evitar esta situación, se añade una cantidad de asfalto virgen entre 1 – 3% del peso total de la muestra o según sea necesario para recubrir completamente las partículas.

Para determinar el G_{mm} del RAP, solamente se retira la masa y volumen del asfalto virgen añadido en el procedimiento, usando la siguiente Ecuación 2-3:

$$G_{mm(RAP)} = \frac{A - J}{(A + D) - (E + K)}$$

Ecuación 2-3: Gravedad Teórica Máxima del agregado RAP.

Donde:

- A = Masa del RAP secada al horno.
- D = Masa del recipiente lleno de agua a 25°C.
- E = Masa del recipiente lleno con RAP y agua a 25°C.
- J = Masa del Asfalto añadido.
- K = Volumen del asfalto añadido.

b) Gravedad Específica Efectiva del Rap, G_{se} (RAP)

Con el valor del G_{mm} (RAP) y conociendo el P_b (RAP), se puede calcular el G_{se} (RAP) con la siguiente Ecuación 2-4:

$$G_{se(RAP)} = \frac{100 - P_{b(RAP)}}{\frac{100}{G_{mm(RAP)}} - \frac{P_{b(RAP)}}{G_b(RAP)}}$$

Ecuación 2-4: Gravedad específica efectiva del RAP.

Donde:

- $G_{se(RAP)}$ = Gravedad Específica Efectiva del RAP.
- $G_{mm(RAP)}$ = Gravedad Específica Teórica Máxima del RAP.
- $P_b(RAP)$ = Contenido de asfalto del RAP.
- $G_b(RAP)$ = Gravedad Específica del Asfalto del RAP.

Se utiliza un valor de 1,04 para la Gravedad Específica del Asfalto del RAP ($G_b(RAP)$), debido a que generalmente el G_b de un asfalto virgen varía entre 1,01 a 1,03 dependiendo del tipo de asfalto y su grado, pero cuando un asfalto envejece, las fracciones más ligeras se disipan dando lugar a un aumento de asfaltenos. Este proceso aumenta la gravedad

específica del aglutinante asfáltico, siendo superior al rango mencionado y al utilizar el valor de 1,04 indica que el asfalto del RAP esta envejecido.

c) Gravedad Especifica Bruta Seca de RAP, G_{sb} (RAP)

Con los valores determinados de los parámetros anteriores, se puede determinar el G_{sb} (RAP), con la siguiente Ecuación 2-5:

$$G_{sb(RAP)} = \frac{G_{se(RAP)}}{\frac{P_{ba(RAP)} \times G_{se(RAP)}}{100 \times G_b(RAP)}}$$

Ecuación 2-5: Gravedad Especifica Bruta del RAP.

Donde:

- G_{sb} (RAP) = Gravedad Especifica Bruta del RAP.
- G_{se} (RAP) = Gravedad Especifica Efectiva del RAP.
- P_{ba} (RAP) = Porcentaje de Absorción del asfalto del RAP.
- G_b (RAP) = Gravedad Especifica del Asfalto del RAP.

Se utiliza un valor 1,00 para el porcentaje de absorción del asfalto del RAP (P_{ba}), determinado sobre la base de experiencia del Laboratorio LEMCO.

2.4.3.1.4 Propiedades de Consenso

El agregado pétreo del RAP al igual que el agregado pétreo virgen, debe cumplir con los requisitos de las propiedades de consenso de las especificaciones técnicas (EETT) del proyecto. Es importante recordar que los requisitos de propiedad de consenso se aplican a la combinación de agregados pétreos virgen y RAP, no específicamente a los agregados individuales

Para poder realizar los ensayos al RAP primeramente se debe separar la fracción gruesa con la fina, donde el material retenido en el tamiz #4 (4,75 [mm]) pasaría a ser la fracción gruesa, y el material fino sería lo que pasa de dicho tamiz. Al material grueso se le determina la angularidad del agregado fino y partículas planas y/o alargadas. Al material fino, solo se le realiza la angularidad del agregado fino. El ensayo de equivalencia de arena no se realiza, debido a que el material ha sido recubierto con asfalto y el contenido de arcilla, si lo hubiera, habrá sido eliminado mediante el ensayo para determinar el contenido de asfalto del RAP.

2.4.3.2 Consideraciones del Diseño

Posterior a la selección del ligante virgen adecuado y el porcentaje de RAP a incorporar, el diseño de la MAC se debe realizar a través del proceso normal de la metodología SUPERPAVE, salvo por las siguientes aclaraciones.

2.4.3.2.1 Combinación de los Agregados

A diferencia del porcentaje de los agregados pétreos vírgenes, el porcentaje de agregados pétreos del RAP es siempre menor al valor del porcentaje de RAP a incorporar a la mezcla, debido al porcentaje de ligante que contiene.

Para poder determinar la graduación combinada de agregados pétreos, se debe determinar el contenido de agregado pétreo del RAP mediante la siguiente Ecuación 2-6:

$$P_{s,RAP} = P_{RAP} \times \left(1 - \frac{P_{b,RAP}}{100}\right)$$

Ecuación 2-6: Porcentaje de agregado pétreo en el RAP.

Donde:

- $P_{s(RAP)}$ = Porcentaje de agregado pétreo en el RAP.
- P_{RAP} = Porcentaje de RAP a utilizar.
- $P_{b(RAP)}$ = Porcentaje de ligante en el RAP.

2.4.3.2.2 Nuevo Porcentaje de Ligante Asfáltico Virgen

Debido a que el material RAP contiene ligante asfáltico además del agregado pétreo, el cual se debe tener en cuenta para el cálculo del contenido total de ligante asfáltico. Para determinar el contenido a agregar de ligante asfáltico virgen, solamente se debe restar el porcentaje de ligante que contiene el RAP, dicho cálculo se puede determinar mediante la siguiente Ecuación 2-7:

$$P_{b(VIRGEN)} = P_{b(TOTAL)} - P_{RAP} \times P_{b(RAP)}$$

Ecuación 2-7: Porcentaje de Asfalto Virgen.

Donde:

- $P_{b(VIRGEN)}$ = Porcentaje de ligante asfáltico virgen a utilizar.
- $P_{b(TOTAL)}$ = Porcentaje de ligante asfáltico total (del proyecto).
- P_{RAP} = Porcentaje de RAP a utilizar.
- $P_{b(RAP)}$ = Porcentaje de ligante asfáltico del RAP.

2.4.3.2.3 Proceso de Producción

Para el proceso de mezclado de la MAC con RAP, la temperatura de mezclado de los agregados vírgenes debe aumentarse en 12.5[°C] debido a la incorporación del RAP a una temperatura inferior. La temperatura de mezclado del asfalto virgen no debe ajustarse.

3. TRABAJO EN LABORATORIO

En el presente capítulo se presenta el proceso lógico de los ensayos y análisis, para desarrollar la metodología de diseño de mezclas SUPERPAVE en su Primer Nivel.

Como se menciona en los objetivos de la presente memoria, primero se desarrolla el diseño de MAC para el proyecto “Conservación mayor pista 17 R / 35 L Aeropuerto Arturo Merino Benítez 2017 – 2018”, para luego homologar dicho diseño llamado “Diseño Base” pero con la incorporación de un 25% RAP a la MAC. Por ende, los materiales empleados y el diseño en sí mismo deben cumplir con los requerimientos del proyecto.

La estructura del presente capítulo se basará en la metodología SUPERPAVE (que consta de 4 pasos), pero primero se expone el resultado del “Diseño Base” para el proyecto mencionado. La estructura será la siguiente:

1. Diseño Base.
2. Diseño con RAP.
 - 2.1. Selección de los Materiales (Agregados pétreos, Ligante y RAP).
 - 2.2. Selección de la Estructura del Agregado de Diseño.
 - 2.3. Selección del Contenido de Ligante Asfáltico de Diseño.
 - 2.4. Evaluación de la susceptibilidad a la humedad de la mezcla diseñada.

3.1 DISEÑO BASE

Se presenta el diseño volumétrico de la MAC realizado para el proyecto “Conservación mayor pista 17 R / 35 L Aeropuerto Arturo Merino Benítez 2017 – 2018”. La estructura de la presente sección es en base a la metodología SUPERPAVE. A modo de sintetizar la información, el punto “Selección de los Materiales” de la metodología descrita es expuesto dentro del segundo diseño con RAP, debido a que se emplean los mismos materiales (áridos y ligante virgen).

3.1.1 Selección de la Estructura de Agregado de Diseño

Se presenta los porcentajes de combinación de los áridos y su distribución granulométrica del diseño, en la Tabla 3-1 y Gráfico 3-2:

Tabla 3-1: Combinación de los áridos, Diseño Base.

Mezcla de los áridos						
Agregado	Gravilla 3/4	Gravilla 1/2	P. Roca	Mezcla	Puntos de Control	
% Usado	15[%]	35[%]	50[%]	100[%]	19,0 [mm]	
Tamiz [ASTM]	[%] Que Pasa				Mín.	Máx.
3/4	100	100	100	100	-	-
1/2	38	100	100	91	-	-
3/8	2	70	100	75	100	-
4	1	5	88	46	90	100
8	1	2	62	32	-	90
16	1	2	45	23	-	-
30	1	2	32	17	-	-
50	1	2	23	12	23	49
100	1	2	17	9	-	-
200	0,8	1,6	12,6	7	2	8

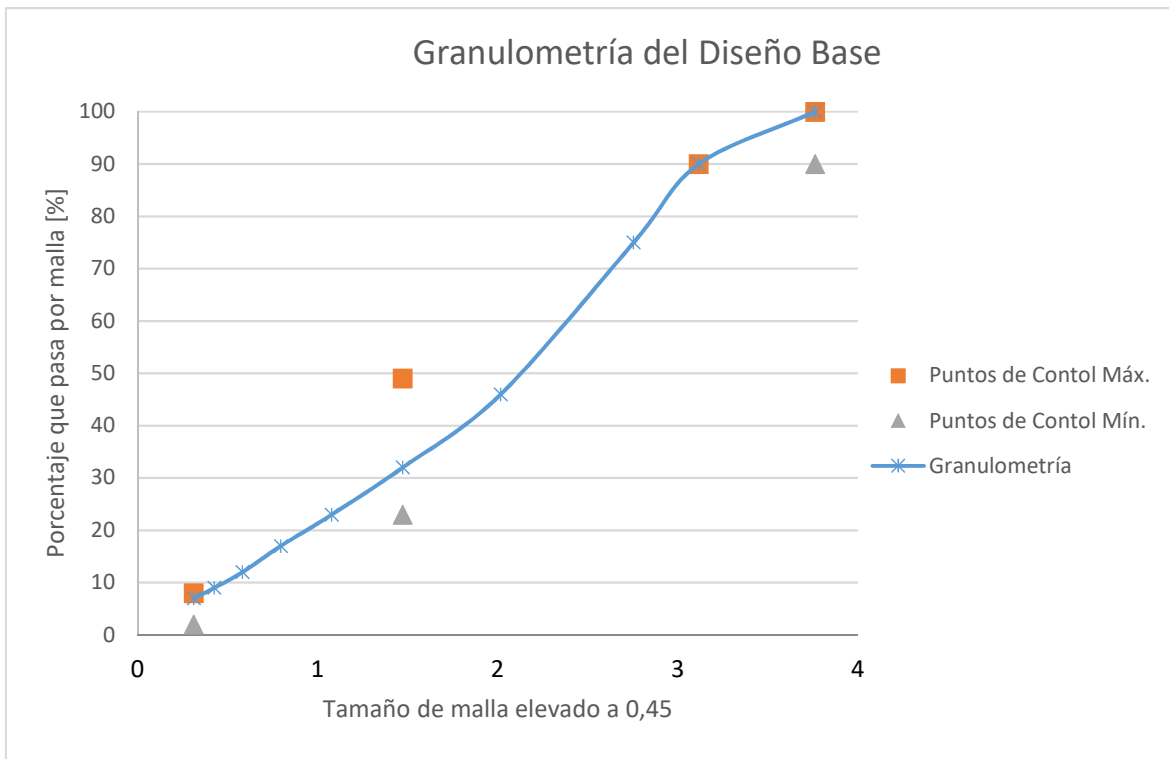


Gráfico 3-1: Distribución Granulométrica, Diseño Base.

Asimismo, se presentan las características de la mezcla de áridos. En las Tabla 3-2, Tabla 3-3 y Tabla 3-4 se presentan las Propiedades de Consenso, de Origen y otras características de la mezcla en el orden correspondiente:

Tabla 3-2: Propiedades de Consenso de la mezcla, Diseño Base.

Propiedad	Valor	Req. EETT
Angularidad Ag. Grueso (+1) [%]	100	Mín. 100
Angularidad Ag. Grueso (+2) [%]	98,75	Mín. 90
Angularidad Ag. Fino [%]	51	Mín. 47
Partículas Planas y Alargadas [%]	0,25	8
Equivalente Arena [%]	57	min 45

Tabla 3-3: Propiedades de Origen de la mezcla, Diseño Base.

Propiedad	Valor	Req. EETT
Tenacidad [%]	14,11	Máx. 25
Durabilidad (Sulfato de Sodio) [%]	2,07	Máx. 10
Durabilidad (Sulfato de Magnesio) [%]	2,09	Máx. 13
Materiales de Deletéreos [%]	0,4	Máx. 2

Tabla 3-4: Otras características de la mezcla, Diseño Base.

Propiedad	Valor	Req. EETT
Densidad Real Seca [Kg/m ³]	2.640	-
Densidad Real Neta [Kg/m ³]	2.781	-
Absorción de Agua [%]	1,59	-
Salas Solubles [%]	0,001	Informar
Límite Líquido	16	Máx. 25
Índice de Plasticidad	N.P.	Máx. 6

3.1.2 Selección del Contenido Óptimo del Ligante Asfáltico

Se presentan los Parámetros Volumétricos de las mezclas con diferentes porcentajes de ligante asfáltico, en la siguiente Tabla 3-5:

Tabla 3-5: Parámetros Volumétricos para mezclas con diferentes % de asfalto, Diseño Base.

% de Ligante Asfáltico	4,75 [%]	5,25 [%]	5,75 [%]	6,25 [%]
% Gmm @N Inicial	86,6	85,2	87,7	88,2
% Gmm @N Diseño	96,0	94,3	97,1	97,9
% Gmm @N Máximo	97,4	95,6	98,6	99,3
Vacios de Aire [%]	5,7	4,0	2,9	2,1
VAM [%]	13,79	14,18	14,16	14,64
VFA [%]	58,35	71,50	79,83	85,49
Proporción de Polvo	2,0	1,6	1,5	1,3
Gravedad Máxima Teórica de la Mezcla [Kg/m ³]	2.535	2.492	2.475	2.456
Gravedad Específica Bruta de la Mezcla [Kg/m ³]	2.389	2.391	2.404	2.404

Además, la Temperatura Óptima de Mezclado es de 175 - 184[°C] y la Temperatura Óptima de Compactación es de 155 - 161[°C].

Se presentan las características del diseño final de la MAC. Se acota que la metodología SUPERPAVE se basa en cumplir con el supuesto de lograr un 4% de Vacíos de Aire. Pese a lo anterior, según las especificaciones del Proyecto se requiere un 3,5% de Vacíos de Aire, por ende, lo que se realiza el recalcu de las propiedades con la premisa de un 3,5% de Vacíos de Aire. Se presenta el resultado en la siguiente Tabla 3-6:

Tabla 3-6: Diseño Base final.

	Contenido Óptimo SUPERPAVE	Contenido Óptimo EETT	Req. SUPERPAVE	Req. EETT
Gravedad Específica Bruta (Gmb) [Kg/m ³]	2.392	2.405	-	-
Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm) [Kg/m ³]	2.492	2.492	-	-
Va [%]	4,69	3,5	4,0	3,5
VAM [%]	14,20		Mín. 13	Mín. 15
VFA [%]	66,98		65 – 78	-
PD	1,56		0,8 – 1,6	-
N° de Giro Inicial	7		7	-
N° de Giro de Diseño	75		75	75
N° de Giro Máximo	115		115	-
% Gmm @N Inicial	86,6		≤90,5	-
% Gmm @N Diseño	96,0		96,0	-
% Gmm @N Máximo	97,4		≤98,0	-
Ligante Asfáltico Optimo [%]	5,3 ± 0,3	5,5 ± 0,3		

3.1.3 Evaluación de la Susceptibilidad a la Humedad, TSR

Se presenta los resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad del Diseño Base, en la siguiente Tabla 3-7:

Tabla 3-7: Resultado del ensayo de Susceptibilidad a la Humedad, Diseño Base.

	Promedio de grupo		Req. SUPERPAVE	Req. EETT
	Grupo Seco	Grupo Húmedo		
Tensión Indirecta [kPa]	520,4	602,1		
TSR [%]	86,4		> 80 [%]	>75 [%]

3.2 DISEÑO CON RAP

Se presenta el diseño volumétrico de la MAC realizado con un 25% de RAP homologando el “Diseño Base”. La estructura de la presente sección es en base a la metodología SUPERPAVE.

1. Selección de los Materiales (Agregados pétreos, Ligante y RAP).
2. Selección de la Estructura del Agregado de Diseño.
3. Selección del Contenido de Ligante Asfáltico de Diseño.
4. Evaluación de la susceptibilidad a la humedad de la mezcla diseñada.

3.2.1 Selección de los Materiales

Es esta sección se describen los requerimientos y ensayos de los materiales de la MAC a diseñar. Se procede a describir primero el ligante asfáltico, para luego referirse al agregado pétreo virgen en conjunto con el material RAP.

3.2.1.1 Selección del Ligante Asfáltico

En cuanto a la selección del ligante, en el diseño SUPERPAVE se establece la clasificación PG. Esta clasificación es por desempeño, donde el sistema de graduación se basa en las condiciones climáticas extremas de donde se construirá el pavimento.

Para poder clasificar los ligantes, las especificaciones SUPERPAVE se enfocan en simular por medio de ensayos de laboratorio, los tres estados críticos de la vida útil de los

ligantes. Los dos envejecimientos del ligante le dan fundamento a los tres estados de la vida de un ligante, los cuales son:

- **Primer Estado:** Asfalto Original, estado que se da durante el transporte, almacenamiento y manejo del ligante asfáltico.
- **Segundo Estado:** Envejecimiento Primario producido luego de la fabricación y colocación de la MAC.
- **Tercer Estado:** Envejecimiento Secundario producido por los años de servicio del pavimento asfáltico.

Para simular el envejecimiento primario, se utiliza el Horno de Película Delgada Rotatoria (RTFO), y para simular el envejecimiento secundario se utiliza el equipo de Envejecimiento en Cámara de Presión (PAV).

En resumen, las propiedades físicas de los asfaltos son medidos en laboratorio simulando las condiciones reales del pavimento en servicio. A modo de resumen, Tabla 3-8 la indica los equipos para determinar dichas propiedades:

Tabla 3-8: Equipos para determinar las Propiedades físicas del Asfalto.

Equipo	Parámetro	Temperatura
Viscosímetro Rotacional (RV)	- Viscosidad a 135 °C	Alta
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	- Módulo de Corte Complejo (G^*) - Angulo de Fase (δ).	Alta e Intermedia
Reómetro de Viga en Flexión (BBR)	-Rigidez de fluencia (S) - Pendiente de log S vs log tiempo (m).	Baja
Ensayo de Tracción Directa (DTT)	- Deformación de tracción de falla.	Baja

Para determinar el grado PG de un ligante, se debe conocer los resultados de los ensayos de Reómetro de Corte Dinámico (DSR) y Reómetro de Viga en Flexión (BBR). Los criterios de falla de los ensayos mencionados son los siguientes:

- Propiedades reológicas con DSR:
 - Ligante original: Falla con $\frac{G^*}{\text{sen } \delta} < 1 \text{ [kPa]}$
 - Ligante HPDR: Falla con $\frac{G^*}{\text{sen } \delta} < 2,2 \text{ [kPa]}$
 - Ligante PAV: Falla con $G^* \times \text{sen } \delta > 5000 \text{ [kPa]}$

- Rigidez de fluencia por flexión con BBR:

Falla cualquiera con:

- $S > 300$
- $M < 0,3$

Se escoge la clasificación PG mediante lo siguiente:

- **Temperatura XX:** será la última temperatura para la cual cumple el DSR con ligante original y con HPDR (si son temperaturas diferentes, será la más desfavorable o sea la menor).
- **Temperatura YY:** será la última temperatura para la cual cumple el BBR, sumándole -10°C debido a la simulación del ensayo.
- **Temperatura intermedia:** deberá ser mayor que la temperatura de falla del DRS de ligante PAV. Se determina mediante la siguiente Ecuación 3-1:

$$T^{\circ} \text{ int} = \frac{XX - YY}{2} + 4$$

Ecuación 3-1: Temperatura intermedia de la Clasificación PG.

3.2.1.1.1 Ligante Virgen

En las *Tabla 3-9*, *Tabla 3-10* y *Tabla 3-11* se detalla los resultados de los ensayos para determinar la clasificación PG del ligante a emplear en el presente diseño:

Tabla 3-9: Ensayo para Ligante Original.

Ensayo	Resultado	Req. SUPERPAVE
Punto de Inflamación [$^{\circ}\text{C}$]	318	Mín. 230
VR a 135 [$^{\circ}\text{C}$], [Pa s]	1,782	Máx. 3

Tabla 3-10: Ensayo para Ligante Envejecido - HPDR.

Ensayo	Resultado	Req. SUPERPAVE
Cambio de Masa [%]	-0,230	Máx. +/- 1,00
DSR $G^*/\text{sen } \delta$ @76[$^{\circ}\text{C}$], [kPa]	2,49	Mín. 2,20

Tabla 3-11: Ensayo para Ligante Envejecido - PAV.

Ensayo	Resultado	Req. SUPERPAVE
DSR $G^* \cdot \text{sen } \delta$ @19[$^{\circ}\text{C}$], [kPa]	3.510	Máx. 5.000
BBR Stiffness @ -18[$^{\circ}\text{C}$] [MPa]	127,4857	Máx. 300
BBR Valor m @ -18[$^{\circ}\text{C}$]	0,3203	Mín. 0,300

Por lo tanto, tenemos un ligante asfáltico con un Grado PG 76-28 para el diseño, cumpliendo el requerimiento de las EETT, siendo este de PG 76-22.

3.2.1.1.2 Ligante RAP

Se determina el contenido de ligante asfáltico del RAP ($P_{b(RAP)}$), para establecer su aporte en el diseño de la MAC. Para determinar el contenido de asfalto del RAP, se extrae el asfalto de la mezcla por medio del ensayo según la norma ASTM D2172²¹. Luego, se debe realizar un análisis granulométrico y graduación a los agregados pétreos mediante la norma AASHTO T 30²⁴, resultados que se presentan en la sección siguiente de “Selección de los Agregados”.

El resultado del ensayo de recuperación se presenta en la siguiente Tabla 3-12:

Tabla 3-12: Porcentaje de ligante asfáltico del RAP.

Material	Porcentaje [%]
Agregado Pétreos	95,7
Ligante Asfáltico	4,3

Además, como se plantea en la Tabla 2-1 para una MAC con un 25% de RAP lo recomendado por la AASHTO M323²⁸ y el manual MS-2¹, es seleccionar un ligante virgen un grado más bajo del normal.

Entonces, lo requerido en el Proyecto es un PG 76-22. A modo de verificación del Grado PG, se realiza en laboratorio una mezcla equivalente a la combinación del asfalto virgen y al asfalto recuperado. La extracción para esta combinación se realiza bajo la misma norma especificada anteriormente, pero la recuperación se ejecuta con evaporador rotatorio y Tolueno como disolvente siguiendo lo especificado en la norma ASTM D7906²⁵, recomendado por el MS-2¹ debido que con este tipo de recuperación quedan menos restos de disolvente en el ligante recuperado.

El ensayo para determinar el Grado PG, solo se realiza el Reómetro de Viga en Flexión (BBR), para encontrar la temperatura YY (mínima) siendo esta la más crítica. Para este ensayo el asfalto virgen se envejece en HPDR y PAV. Para realizar la combinación de los ligantes, estos se calientan a no más de 168 ± 5 [°C], según lo especificado en el ensayo BBR, para luego dar pie al ensayo.

El resultado de la temperatura YY fue de -22, temperatura aceptada para lo requerido.



Figura 3-1: Proceso de mezclado de los dos ligantes.

3.2.1.2 Selección de los Agregados

Los agregados vírgenes corresponden a árido chancado dividido en agregado grueso y fino. Se trabaja con cuatro pilas de acopio, agregado grueso (Gravilla $\frac{3}{4}$ y Gravilla $\frac{1}{2}$), agregado fino filler (Polvo Roca) y RAP. Los áridos provienen de la Planta Asfalcura, ubicada en la Comuna de Peñalolén – Santiago.



Figura 3-2: Extracción de los áridos desde la Planta Asfalcura.

Asimismo, se considera el RAP como cuarto agregado de pila de acopio manipulándose como un agregado pétreo más. El RAP es proveniente de la Planta de Bitumix, ubicada en la Comuna Maipú – Santiago.

Para el muestreo de los materiales se utiliza la norma ASTM D75²⁹ para el agregado grueso y fino, y ASTM C183³⁰ para el agregado filler. Luego de su extracción, los áridos se trasladan a las dependencias del Laboratorio LEMCO para su posterior ensayo y análisis. Todos los ensayos piden una cantidad representativa de muestra según lo requiera el ensayo, por eso el primer paso para poder realizar algún ensayo es cuartear el material, así se podrá reducir su tamaño sin alterar su composición, esto según la norma ASTM C702³¹ - Método B, ver Figura 3-3:



Figura 3-3: Cuarteo del material G'3/4.

Para los agregados pétreos, los requerimientos que mandan en el presente diseño de MAC son las EETT, del proyecto anteriormente mencionado. Pese a lo anterior, a modo comparativo o si dicha especificación no especifica algún requerimiento, se añade los valores de los requerimientos de la metodología SUPERPAVE.

Se prosigue a describir primero el análisis granulométrico, para luego seguir con las Propiedades de Conceso y de Origen. Por último, se describen otras caracterizaciones del material, como sus gravedades, Límite Líquido e Índice de Plasticidad y Sales Solubles.

3.2.1.2.1 Análisis Granulométrico del Agregado

El análisis Granulométrico del agregado grueso y fino se realiza según la norma ASTM C136¹⁵. El ensayo del material RAP, se realiza según AASHTO T 30²⁴ para agregados provenientes de una extracción. El resultado de los cuatro materiales se presenta en la siguiente Tabla 3-13 y Gráfico 3-2:

Tabla 3-13: Granulometría de los distintos tamaños de agregados.

Agregado			G' 3/4"	G'1/2"	Polvo Roca	RAP
Tamices			Porcentaje que pasa [%]			
ASTM	[mm]	[mm] a 0,45				
3"	80	7,18	-	-	-	-
2 1/2"	63	6,45	-	-	-	-
2"	50	5,81	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	5,11	-	-	-	-
1"	25	4,26	-	-	-	-
3/4"	19	3,76	100	100	100	100
1/2"	12,5	3,12	35	100	100	92
3/8"	9,5	2,75	2	70	100	85
Nº 4	4,75	2,02	1	5	88	66
Nº 8	2,36	1,47	1	2	62	49
Nº 16	1,18	1,08	1	2	45	36
Nº 30	0,63	0,81	1	2	32	26
Nº 50	0,315	0,59	1	2	24	18
Nº 100	0,15	0,43	1	2	17	13
Nº 200	0,075	0,31	0,8	1,6	12,6	9,2

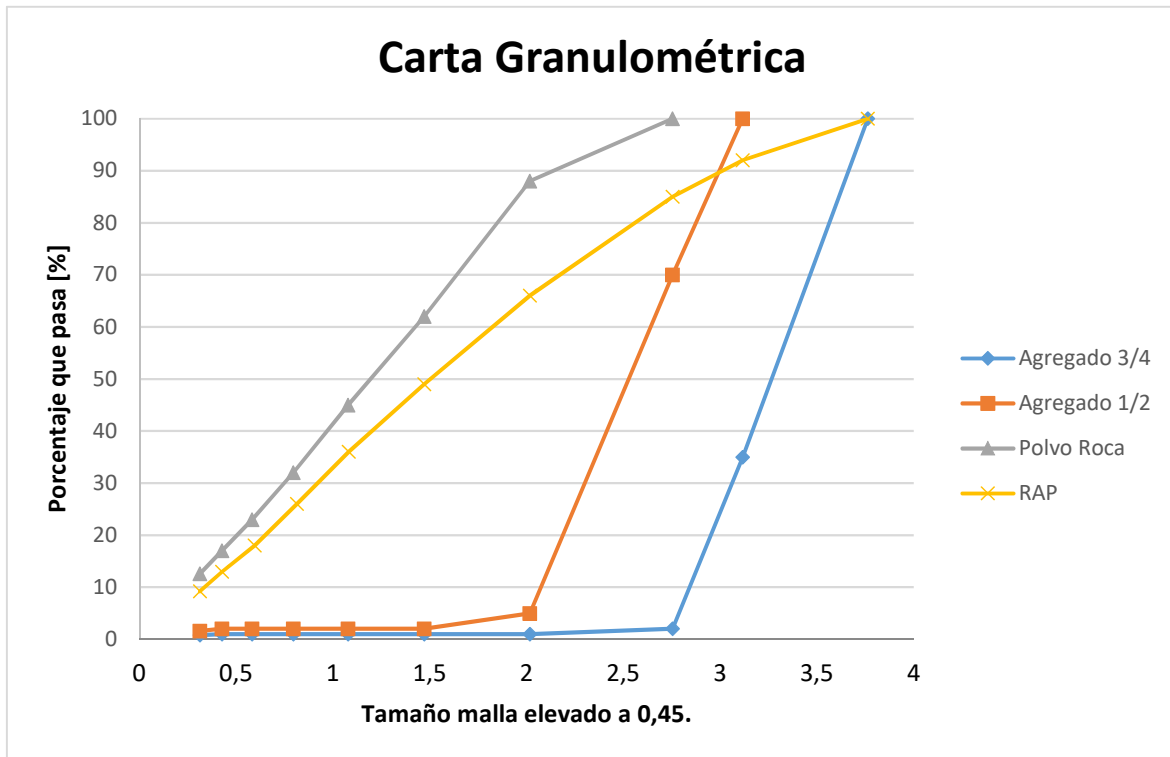


Gráfico 3-2: Granulometría de los agregados.

3.2.1.2.2 Propiedades de Consenso

Las Propiedades de Consenso son claves para el comportamiento de la mezcla y se asocia a la calidad del agregado. Se presenta los resultados de los ensayos para determinar dichas propiedades para los cuatro materiales, en el siguiente orden:

- a) Angularidad del Agregado Grueso.
- b) Angularidad del Agregado Fino.
- c) Particular Planas y Alargadas.
- d) Contenido de Arcilla o Equivalente de Arena.

a) Angularidad del Agregado Grueso

Este ensayo se realiza según la norma ASTM D5821⁸ y se define como, el porcentaje en peso del agregado grueso (mayor a 4,75 [mm]), con una o más caras fracturadas. En la Tabla 3-14, se presenta los requerimientos y resultados del ensayo:

Tabla 3-14: Resultados del ensayo Partículas Fracturadas.

Agregado	1 o más Caras Fracturadas [%]	2 o más Caras Fracturadas [%]
G' ¾	100	94
G' ½	100	99
Polvo Roca	100	100
RAP	98	95
Req. EETT	Mín. 100	Mín. 90
Req. SUPERPAVE	Mín. 80	Mín. 75

b) Angularidad del Agregado Fino

Este ensayo se realiza según la norma ASTM C1252⁹, método B y se define como, el porcentaje de vacíos presente en el agregado fino (menor a 2,36 [mm]), levemente compactados. Un contenido mayor de vacíos de aire, implican un mayor número de caras fracturadas. En la Tabla 3-15, se presenta los requerimientos y resultados del ensayo:

Tabla 3-15: Resultado del ensayo Angularidad del Agregado Fino.

Agregado	Vacios de Aire [%]
Polvo Roca	51
RAP	47
Req. SUPERPAVE	Mín. 40

c) Partículas Planas y Alargadas

Este ensayo se realiza según la norma ASTM D4791¹⁰, y se define como el porcentaje en peso del agregado grueso, cuya relación entre la dimensión máxima y mínima es mayor a 5:1. Este ensayo solo se realiza al agregado grueso. En la Tabla 3-16, se presenta los requerimientos y resultados del ensayo:

Tabla 3-16: Resultado del ensayo Partículas Planas y Alargadas.

Agregado	Partículas Lajeadas [%]
G' ¾	0
G' ½	0,7
RAP	0,7
Req. EETT	Máx. 8
Req. SUPERPAVE	Máx. 10

d) Contenido de Arcilla o Equivalente de Arena

Este ensayo se realiza según la norma ASTM D2419¹¹, y se define como el porcentaje en peso del material arcilloso presente en la fracción de agregado menor a 4,75 [mm]. En la Tabla 3-17, se presenta los requerimientos y resultados del ensayo:

Tabla 3-17: Resultado del ensayo Equivalente de Arena.

Agregado	Equivalente de Arena [%]
Polvo Roca	57
Req. EETT	Mín. 45
Req. SUPERPAVE	Mín. 45

3.2.1.2.3 Propiedades de Origen

Corresponden a la calidad de la fuente del agregado. Se presenta los resultados de los ensayos para determinar dichas propiedades para los cuatro materiales, en el siguiente orden:

- a) Tenacidad o Dureza.
- b) Durabilidad.
- c) Materiales Deletéreos.

Se observa que no se le realiza estos ensayos al material RAP, ya que se desconoce la fuente de origen.

a) Tenacidad o Dureza

Este ensayo se realiza según la norma ASTM C131¹², y corresponde al ensayo de desgaste por el método de la máquina de los Ángeles. En este ensayo se somete el material a impacto por medio de esferas metálicas, para luego medir la diferencia entre la masa que pasa el tamiz #12 (1,7 [mm]), antes y después del ensayo. En la Tabla 3-18, se presenta los requerimientos y resultados del ensayo:

Tabla 3-18: Resultado del ensayo Desgaste los Ángeles.

Agregado	Tenacidad [%]
G' ¾	11,1
G' ½	13,4
Polvo Roca	15,5
Req. EETT	Máx. 25

b) Durabilidad

Este ensayo se realiza según la norma ASTM C88¹³, y estima la resistencia del agregado al deterioro por la acción del clima por los ciclos de hielo/deshielo. El ensayo somete el material a varios ciclos de saturación y secado con dos tipos de soluciones, Sulfato de Sodio y de Magnesio, donde se mide la diferencia de masa antes y después del ensayo. En la Tabla 3-19, se presenta los requerimientos y resultados del ensayo:

Tabla 3-19: Resultado del Ensayo de Durabilidad.

Agregado	Desintegración por Sulfato de Sodio [%]	Desintegración por Sulfato de Magnesio [%]
G' ¾	3,5	3,4
G' ½	4,4	4,5
Req. EETT	Máx. 10	Máx. 13

c) Materiales Deletéreos

Este ensayo se realiza según la norma ASTM C142¹⁴ y se define como el porcentaje en masa de arcilla y partículas desmenuzables del agregado. En la Tabla 3-20, se presenta los requerimientos y resultados del ensayo:

Tabla 3-20: Resultados del ensayo Materiales Deletéreos.

Agregado	Materiales de Deletéreos [%]
G' ¾	0,0
G' ½	0,0
Polvo Roca	0,8
Req. SUPERPAVE	Máx. 2

3.2.1.2.4 Otras Características

Además, se debe caracterizar los materiales obteniendo los valores de Gravedad Específica Bruta (G_{sb}), que equivale a la Densidad Real Seca dividida por la Densidad del Agua y la Gravedad Específica Aparente (G_{sa}), que equivale a la Densidad Neta dividida por la densidad del Agua. Se realiza cada ensayo a los tres agregados pétreos, según la norma ASTM C127¹⁶ para el agregado grueso y ASTM C128¹⁷ para el agregado fino.

También se agrega los resultados del ensayo de Sales Solubles que se define como, el porcentaje en masa del contenido de cloruros y sulfatos solubles en agua del agregado, el cual se realiza según la normativa del Manual de Carreteras, Sección 8.202.14.³²

Por último, para complementar las características se suma los ensayos de Límite Líquido y Índice de Plasticidad, los cuales solo se realizan al material Polvo roca y se ejecuta según la norma ASTM D4318³³.

En la Tabla 3-21, se presenta los requerimientos y resultados de los ensayos:

Tabla 3-21: Resultado de ensayo Densidades, Sales Solubles y Limite de Atterberg.

Agregado	Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca	Req. EETT
Densidad Real Seca [Kg/m ³]	2692	2680	2597	-
Densidad Real Neta [Kg/m ³]	2795	2792	2770	-
Absorción de Agua [%]	1,37	1,51	1,70	-
Sales Solubles [%]	0,02	0,02	0,01	Informar
Límite Líquido	-	-	16	Máx. 25
Índice de Plasticidad	-	-	No Plástico	Máx. 6

No obstante, para el agregado RAP, se debe realizar primero el ensayo de Gravedad Máxima Teórica ($G_{mm(RAP)}$). Para luego calcular su Gravedad Específica Efectiva ($G_{se(RAP)}$) y finalmente poder determinar su Gravedad Específica Bruta ($G_{sb(RAP)}$), todo esto según las siguientes ecuaciones: Ecuación 2-3, Ecuación 2-4 y Ecuación 2-5 descritas en la sección

“2.4.3.1.3 Gravedad Específica del Agregado RAP” de la presente memoria. Además, se realiza el ensayo de extracción del ligante asfáltico del material RAP para poder determinar el contenido de este, mediante la norma ASTM D2172²¹ por el método de Evaporatorio Rotatorio, descrito también en la sección “3.2.1.1.2 Ligante RAP” del presente Capítulo. Este porcentaje es referido al peso total del RAP. Se presentan los valores en la Tabla 3-22:

Tabla 3-22: Gravedades del agregado RAP.

Propiedad	RAP
Gmm(RAP)	2,451
Gse(RAP)	2,610
Gsb(RAP)	2,546
Pb(RAP) [%]	4,3

3.2.2 Selección de la Estructura del Agregado de Diseño

Luego de la selección de los materiales se da paso a la selección de la estructura del agregado, determinando las granulometrías de mezclas de prueba por medio de diferentes combinaciones de las granulometrías individuales de cada material. Esta etapa es de prueba y error, debido a que consiste en encontrar una dosificación que satisfaga los requerimientos SUPERPAVE, tanto para los tamices correspondientes, como las propiedades de los materiales y los parámetros volumétricos de la mezcla.

Este proceso parte con la elección de tres mezclas de prueba, con un determinado contenido de ligante asfáltico inicial. Estas mezclas son aceptadas si cumplen los requerimientos del diseño, para finalizar se selecciona la mezcla de prueba que cumpla mejor cada uno de los requerimientos. Esta mezcla, pasa a ser la estructura del agregado de diseño.

La granulometría de control se basa en 4 tamices de control (control sieves): el máximo, el máximo nominal, el de 2,36 [mm] y el de 75 [micrones]. El Tamiz Máximo Nominal (Nominal Maximum Sieve), es un tamaño mayor que el primer tamiz que retiene más del 10% del agregado combinado. El Tamiz Máximo (Maximum Sieve Size), es un tamaño mayor que el Tamiz Máximo Nominal. La Tabla 3-23 detalla todos los Puntos de Control de la metodología SUPERPAVE:

Tabla 3-23: Puntos de Control de la Graduación del Agregado.²⁸

Tamiz	Tamaño Máximo Nominal del Agregado – Puntos de Control (Porcentaje que pasa)											
	37,5 [mm]		25,0 [mm]		19,0 [mm]		12,5 [mm]		9,5 [mm]		4,75 [mm]	
Tamaño	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
50,0 [mm]	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37,5 [mm]	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25,0 [mm]	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-
19,0 [mm]	-	-	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-
12,5 [mm]	-	-	-	-	-	90	90	100	100	-	100	-
9,5 [mm]	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100	95	100
4,75 [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100
2,36 [mm]	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67	-	-
1,18 [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	60
0,075[mm]	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10	6	12

Al variar el tamaño nominal de la mezcla, los valores mínimos y máximos requeridos para los tamices de control, cambian. Estos puntos de control aseguran una buena graduación del agregado evitando problemas de segregación y de mezcla, con el ligante. En el presente diseño, se emplea una mezcla con Tamaño Máximo Nominal de 19[mm].

3.2.2.1 Selección Granulometría de las Mezclas de Prueba

Las Mezclas de Prueba deben cumplir todos los requerimientos del diseño. Se seleccionan tres Mezclas de Prueba, con un porcentaje de ligante asfáltico inicial y distintos porcentajes de cada agregado, dichos porcentajes se presentan en la Tabla 3-24:

Tabla 3-24: Porcentajes para las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.

Agregado	G' ¾ [%]	G' ½ [%]	P. Roca [%]	RAP [%]
Mezcla de Prueba 1	24	23	23	25
Mezcla de Prueba 2	26	27	22	25
Mezcla de Prueba 3	26	24	24	25

La Tabla 3-25 y el Gráfico 3-3 se adjuntan la granulometría de las tres mezclas para el Diseño con RAP: Además, como se puede apreciar en la Tabla 3-25 las tres mezclas de prueba con RAP cumplen con los requerimientos especificados del diseño.

Tabla 3-25: Distribución Granulometría para las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.

Tamiz [ASTM]	Porcentaje que Pasa [%]				
	MEZCLA 1	MEZCAL 2	MEZCLA 3	Puntos de Control	
3/4	100	100	100	90	100
1/2	82	81	81	-	
3/8	66	63	64	-	
4	43	37	40	-	
8	30	27	28	23	49
16	22	20	21	-	-
30	16	14	15	-	-
50	12	10	11	-	-
100	9	8	8	-	-
200	6,4	5,7	6,0	2	8

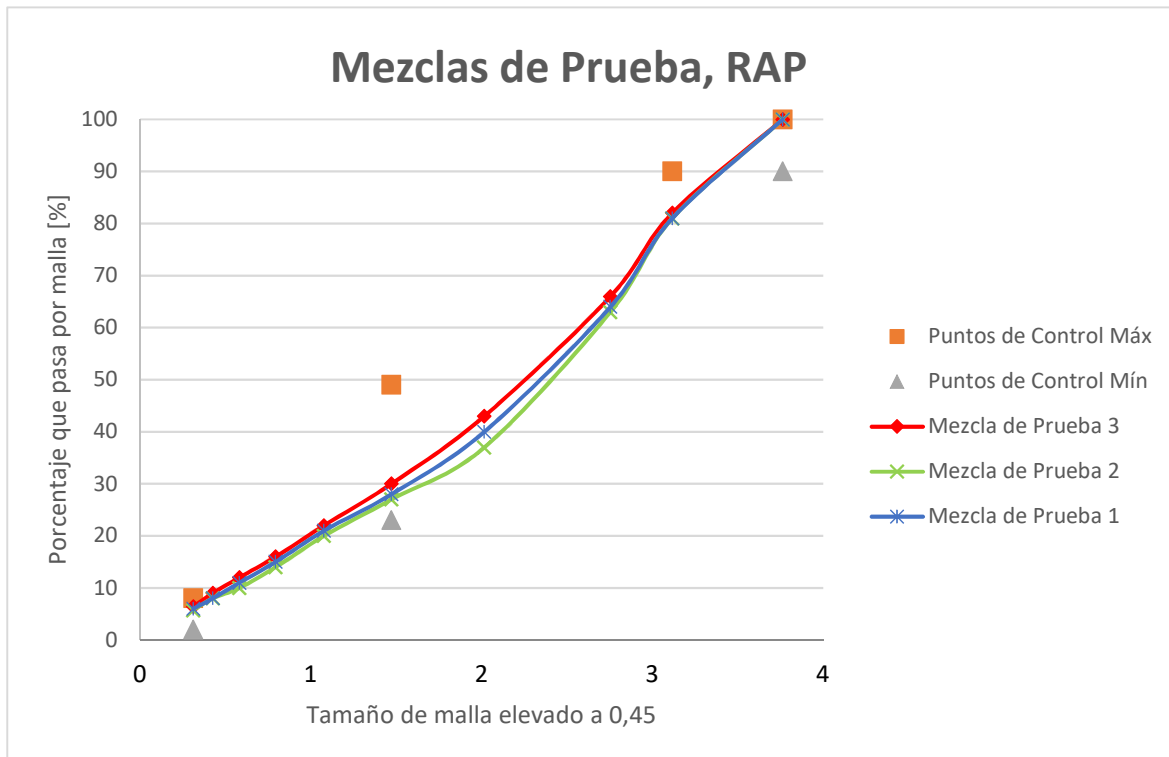


Gráfico 3-3: Distribución Granulometría para las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.

3.2.2.2 Verificación de las propiedades de las Mezclas de Prueba

Seleccionadas las mezclas, es necesario una determinación preliminar de las propiedades de los agregados mezclados, para garantizar que la mezcla de los agregados cumpla con los requerimientos exigidos. Estas propiedades pueden estimarse en forma

matemática a partir de las propiedades de los agregados individuales. Los valores estimados se indican en la Tabla 3-26:

Tabla 3-26: Propiedades estimadas de las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.

Gravedades Especificas				
Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Criterio
Gsb	2,626	2,631	2,629	-
Propiedades de Consenso				
Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Criterio
Angularidad Ag. Grueso (+1) [%]	100	100	100	Mín. 100
Angularidad Ag. Grueso (+2) [%]	97	97	97	Mín. 90
Angularidad Ag. Fino [%]	51	51	51	Mín. 47
Partículas Planas y Alargadas [%]	0,34	0,36	0,34	8
Equivalente Arena [%]	57	57	57	min 45
Propiedades de Origen				
Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Criterio
Tenacidad [%]	10,09	9,91	9,98	Máx. 25
Durabilidad (Sulfato de Sodio) [%]	2,10	2,10	1,97	Máx. 10
Durabilidad (Sulfato de Magnesio) [%]	1,85	2,10	1,96	Máx. 13
Materiales de Deletéreos [%]	0,22	0,18	0,20	Máx. 2

En base a la estimación anteriormente realizada, las tres mezclas de prueba del diseño son aceptables dentro de su cumplimiento de los requerimientos exigidos.

Para determinar el contenido inicial de ligante de cada mezcla, se estima el peso específico efectivo de la mezcla, mediante una estimación de la Gravedad Específica Efectiva (G_{se}), por medio de la siguiente Ecuación 3-2:

$$G_{se(est)} = G_{sb} + 0,8 \times (G_{sa} - G_{sb})$$

Ecuación 3-2: Estimación de Gravedad Especifica Efectiva.

Donde:

- $G_{se(est)}$ = Gravedad Especifica Efectiva Estimada de la mezcla.
- G_{sb} = Gravedad Especifica Bruta de la mezcla.
- G_{sa} = Gravedad Especifica Aparente de la mezcla.

Posterior, se estima el Volumen de Ligante Asfáltico Absorbido ($V_{ba(est)}$). El siguiente paso es estimar el Volumen de Asfalto Efectivo ($V_{be(est)}$). Y finalmente se puede estimar el

Contenido de inicial de asfalto (P_{bi}), todo esto mediante las siguientes ecuaciones; Ecuación 3-3, Ecuación 3-4 y Ecuación 3-5:

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

Ecuación 3-3: Estimación de Volumen de Asfalto Absorbido.

Donde:

- $V_{ba(est)}$ [%] = Volumen de Asfalto Absorbido Estimado de la mezcla.
- P_b [%] = Porcentaje de Asfalto con respecto al total de peso de la mezcla (se supone 0,05).
- P_s [%] = Porcentaje de Agregado con respecto al total de peso de la mezcla (se supone 0,95).
- G_b [g/cm³] = Gravedad Especifica del Ligante (se supone 1,02).
- V_a [%] = Volumen de Vacíos de Aire (se supone 0,04).

$$V_{be(est)} = 0,081 - 0,02931 \times \ln(S_n)$$

Ecuación 3-4: Estimación del Volumen de Asfalto Efectivo.

Donde:

- $V_{be(est)}$ [%] = Volumen de Asfalto Efectivo Estimado de la mezcla.
- S_n ["] = Tamaño del Tamaño Tamiz Máximo Nominal de la mezcla de agregados.

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

Ecuación 3-5: Estimación del Contenido de Asfalto Inicial.

Donde:

- $P_{bi(est)}$ [%] = Porcentaje de Asfalto Inicial Estimado de la mezcla.
- W_s [g/cm³] = Peso del Agregado.

No obstante, para las Mezclas de Prueba con RAP se supone un porcentaje de 5,2% de asfalto (con respecto al total de peso de la mezcla). No se realiza la estimación descrita anteriormente, debido a que no se puede determinar el G_{sa} del material RAP, ya que este ya ha sido adulterado. Por lo anterior, como el diseño con RAP se está homologando el Diseño Base, se supone el mismo porcentaje de asfalto inicial recurriendo a que esta fase es de prueba y error.

Se recalca que del 5,2% de ligante total, corresponde solo un 4,1% del ligante virgen y el otro 1,1% al ligante que aporta el RAP, porcentajes determinados por la Ecuación 2-7.

Igualmente, se determina la Gravedad Especifica Efectiva de las Mezclas de Prueba con RAP para cálculos posteriores, determinando G_{se} por cada agregado y luego determinando el de la combinación por la ponderación de cada uno en la mezcla. Los valores se presentan en la Tabla 3-27:

Tabla 3-27: Gravedad Especifica Efectiva de las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.

Parámetro	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
$G_{se(est)} [g/cm^3]$	2,721	2,723	2,722

Posteriormente se evalúan las mezclas de prueba mediante la compactación de especímenes y la determinación de las propiedades volumétricas de cada una de ellas. Una vez realizada la separación del material por tamiz, se procede a la conformación de las mezclas de prueba en base a las granulometrías anteriormente propuestas. Para cada mezcla de prueba, se realiza un mínimo de 2 especímenes que se compactan con el SGC.

Además, otros 2 especímenes por mezcla son preparados para la determinación de la Gravedad Especifica Teórica Máxima de la Mezcla, G_{mm} . Usualmente son suficientes 4500[gr] de agregado para los especímenes a ser compactados. Mientras que, para la determinación de la G_{mm} , basta con 2000 [gr].

3.2.2.3 Procedimiento de Preparación de la Mezcla de Prueba

Para poder crear los especímenes en Laboratorio, se debe seguir una serie de pasos normados. Uno de los pasos del método SUPERPAVE, es el acondicionamiento de la mezcla, el cual consiste en dejar la mezcla asfáltica después del mezclado durante 4 horas dentro de un horno una temperatura de $135 \pm 10 [^{\circ}C]$, para luego subir la temperatura a la de compactación, así permitiendo simular el envejecimiento a corto plazo de la mezcla asfáltica, además de darle tiempo al agregado para que absorba el asfalto.

La temperatura de mezclado y compactación para el diseño sería la siguiente:

- **Temperatura de Mezclado:** Diseño Proyecto 175 – 184 [$^{\circ}C$]
- **Temperatura de Compactación:** Diseño Proyecto 155 – 161 [$^{\circ}C$]

No obstante, como se menciona anteriormente se debe compensar la introducción de un material de temperatura inferior al mezclado, por ende, el agregado virgen debe calentarse a 12.5[°C] más, siendo dicha temperatura de 187,5 - 196,5[°C]. La temperatura de mezclado del asfalto virgen no debe ajustarse.

El procedimiento para la preparación de la mezcla es el siguiente:

1. Colocar un recipiente sobre una balanza e incorporar los agregados según la granulometría del diseño, colocando uno a uno los retenidos en cada tamiz, de cada material. Verificando siempre el calibrado en cero en cada incorporación.
2. Colocar en un recipiente los agregados y llevar al horno a unos 15[°C] mayor que la temperatura de mezclado (175 - 184[°C]). Se necesita al menos un par de horas para que los agregados tomen temperatura especificada.
3. El material RAP, debe ser calentado a 110 °[C] y no por más de dos horas.
4. El ligante asfáltico también se debe calentar a la temperatura de mezclado, teniendo siempre en cuenta de no sobrepasar más de dos horas en el horno.
5. Colocar el recipiente con los agregados a la temperatura de mezclado sobre una balanza y calibrarlo a cero. Se debe incorporar el RAP al recipiente con los agregados previo a la balanza.
6. Formar un espacio en el agregado e incorporar el asfalto hasta alcanzar el peso deseado.
7. Mezclar de forma manual el asfalto con el agregado. 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.
8. Llevar el recipiente con la muestra al horno por 4 horas a temperatura de 135[°C].
9. Repetir este procedimiento hasta completar el número de especímenes que serán ensayados. El espaciamiento entre preparación de cada espécimen es aproximadamente de 20 minutos.
10. Al final del envejecimiento, realizar el ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima y la compactación de especímenes.

Se presentan las figuras que son parte del procedimiento para la preparación de los especímenes, las cuales son; Figura 3-4, Figura 3-6 y Figura 3-5:



Figura 3-4: Árido tamizado.



Figura 3-6: Incorporación del asfalto al recipiente.



Figura 3-5: Proceso de mezclado manual.

3.2.2.4 Compactación de los especímenes

La compactación de las mezclas según el método SUPERPAVE, se realiza por medio del Compactador Giratorio (SGC) el cual acomoda mejor las partículas de la mezcla, así simulando mejor las densidades de las mezclas.

EL SGC se basa en el esfuerzo de compactación, el cual tiene base en el nivel de tránsito (ESAL's). Los ESAL's de diseño es el nivel de tránsito esperado para el carril de diseño en un periodo de 20 años. Se deben determinar los ESAL's de diseño a los 20 años para seleccionar un valor correcto de N diseño. En la Tabla 3-28 se presentan los diferentes rangos de esfuerzo de compactación:

Tabla 3-28: Esfuerzo de Compactación.³⁴

ESAL's de diseño (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

Se pueden observar que para un ESAL's de diseño existen tres valores de compactación:

- N Inicial = número de giros que produce la mínima compactación que se debe presentar en terreno.
- N Diseño = número de giros que se necesitan para producir la compactación de diseño en terreno.
- N Máximo = número de giros

Por lo tanto, de acuerdo con el nivel de tránsito y según lo especificado en las EETT del Proyecto, se determina los parámetros de compactación; N Inicial= 7, N Diseño = 75 y N Máximo = 115. Cada espécimen se compactará con el máximo número de giros.

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

1. Preparar el compactador giratorio mientras la muestra se envejece, en este punto, se debe calibrar la presión y la altura del compactador. Por ultima, configurar la compactación por números de giros de diseño, N Diseño, que para estos efectos es de 115 giros.
2. Colocar los moldes de compactación y discos en el horno a la temperatura de compactación, con un mínimo de una hora antes para poder lograr dicha temperatura. Esto se realiza con el fin de reducir las pérdidas de temperatura durante la compactación.
3. Luego del envejecimiento de cuatro horas de las mezclas, se debe subir la temperatura en media hora a la de compactación.
4. Cuando se llega a la temperatura de compactación, retirar los moldes y discos del horno. Colocar desmoldante al interior de los moldes.
5. Colocar el primer disco dentro del molde y un disco de papel con desmoldante.
6. Colocar la mezcla envejecida en el molde (con la ayuda de una “puruña”), nivelarla y colocar un disco de papel con desmoldante en la superficie. Seguidamente, colocar el segundo disco de papel y disco y depositar el molde conteniendo la muestra dentro del compactador. Centrar el molde sobre el pisón de carga que aplicará la presión.
7. Iniciar la compactación. Compactar hasta que alcance el N diseño. La altura del espécimen es constantemente monitoreada y registrada luego de cada giro.
8. El compactador cesará la compactación luego que alcance el N diseño. Retirar el molde con la muestra compactada.
9. Dejar enfriar el molde, a modo de evitar que el espécimen se distorsione. Luego retirar el espécimen y eliminar el disco de papel.
10. Repetir el proceso de compactación para todos los especímenes a ser ensayados.

Se presentan las siguientes figuras que son parte del proceso de compactación de los especímenes; Figura 3-7 Figura 3-8, , Figura 3-9 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Figura 3-10:



Figura 3-8: Calibración por presión del Compactador



Figura 3-7: Con la ayuda de una "puruña", se introduce la mezcla en el molde.



Figura 3-10: Introduce el molde con la mezcla para la compactación.



Figura 3-9: Proceso de extracción de los especímenes.

3.2.2.5 Pruebas Fundamentales a la MAC

Con el objeto de terminar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica se realizan los ensayos correspondientes para determinar la Gravedad Específica Bruta (G_{mb}) y la Gravedad Específica Teórica Máxima (G_{mm}).

3.2.2.5.1 Gravedad Específica Bruta, G_{mb}

Una vez que los especímenes se encuentran a temperatura ambiente, se procede a determinar la Gravedad Específica Bruta (G_{mb} (medida)), según la Norma ASTM D2726 / D2726M¹⁹. El procedimiento a seguir para las probetas con un porcentaje de absorción menor al 2% se encuentra descrito en la norma mencionada. Se presentan las siguientes figuras parte del ensayo, Figura 3-12 y Figura 3-11:



Figura 3-12: Proceso de superficialmente seco.



Figura 3-11: Masando el espécimen.

3.2.2.5.2 Gravedad Específica Teórica Máxima (G_{mm})

Se determina la Gravedad Específica Teórica Máxima (G_{mm} (medida)) de cada una de las mezclas de prueba en su estado suelto, este ensayo se realiza mediante la Norma ASTM D2041¹⁸ por tipo de recipiente A (Matraz, ver Figura 3-13). Básicamente consiste en saturar la mezcla aplicando vacío, con el fin de extraer todo el aire que contiene la mezcla.

La expresión para determinar la Gravedad Específica Teórica Máxima a partir del procedimiento descrito en la norma antes mencionada se presenta en la siguiente Ecuación 3-6:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B + C} \times \rho_t$$

Ecuación 3-6: Gravedad Específica Teórica Máxima medida.

Donde:

- G_{mm} [Kg/m³] = Gravedad Específica Teórica Máxima medida.
- A [g] = Masa de la muestra a temperatura ambiente.
- B [g] = Masa del Matraz lleno con agua.
- C [g] = Masa del Matraz con agua y la muestra.
- ρ_t [Kg/m³] = Densidad del agua a T° de ensayo.



Figura 3-13: Matraz con la mezcla.

3.2.2.6 Densificación de las Mezclas de Prueba

Durante el proceso de compactación, se mide y registra la altura del espécimen para cada revolución. Se calcula la Gravedad Específica Bruta (estimada) de la mezcla, considerando el diámetro del molde y la altura medida del espécimen mediante la siguiente Ecuación 3-7:

$$G_{mb(est)} = \frac{W_m}{V_m}$$

Ecuación 3-7: Gravedad Especifica Bruta Estimada.

Donde:

- $G_{mb(est)}$ = Gravedad Especifica Bruta Estimada del espécimen.
- W_m [grs] = Masa del espécimen.
- V_m [cm³] = Volumen del molde compactado, calculado usando:
 - D [mm] = Diámetro del molde, 150.
 - H_x [mm] = Altura del espécimen en el molde durante la compactación.
 - π = 3,1416.

Es necesario obtener un factor de corrección de la relación entre ambas gravedades específicas brutas. Se determina mediante la siguiente Ecuación 3-8:

$$C = \frac{G_{mb(med)}}{G_{mb(est)}}$$

Ecuación 3-8: Factor de corrección.

Donde:

- C = Factor de Corrección.
- $G_{mb(med)}$ = Gravedad Especifica Bruta medida.
- $G_{mb(est)}$ = Gravedad Especifica Bruta Estimada del espécimen al N Máximo.

El G_{mb} estimado a algún otro nivel de compactación se determina usando la siguiente Ecuación 3-9:

$$G_{mb(corregido)} = C \times G_{mb(est)}$$

Ecuación 3-9: Gravedad Especifica Bruta corregida.

Donde:

- $G_{mb(corregida)}$ = Gravedad Especifica Bruta corregida del espécimen a algún nivel de revolución.
- C = Factor de Corrección.
- $G_{mb(est)}$ = Gravedad Especifica Bruta estimada a alguna revolución.

El último paso es calcular el % G_{mm} para cada uno de los especímenes de prueba. Para ello, se divide la Gravedad Especifica Bruta del espécimen (corregido) por el valor medido de G_{mm} . El promedio de los % G_{mm} para los especímenes duplicados también es

informado. El promedio de %G_{mm} se usa como base para la comparación entre las mezclas de prueba.

Los datos del SGC para las 3 Mezclas de Prueba del diseño con RAP se exponen en la Tabla 3-29. Los puntos más importantes de comparación son %G_{mm} para N Inicial, N Diseño y N Máximo, los cuales se han resaltado para cada una de las densificaciones.

Tabla 3-29: Densificación para las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.

Parámetro	Mezcla de Prueba 1		Mezcla de Prueba 2		Mezcla de Prueba 3	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Altura @ N Inicial	131,9	131,6	136,1	131,6	132,2	131,3
Altura @ N Diseño	117,5	116,6	120,9	117,1	117,5	117
Altura @ N Máximo	115,7	114,8	119,2	115,3	115,8	115,3
Masa de la Probeta	4657,8	4675,5	4674,1	4565,4	4677,5	4668,7
Gmb est @ N Inicial	1,998	2,010	1,943	1,963	2,002	2,012
Gmb est @ N Diseño	2,243	2,269	2,188	2,206	2,253	2,258
Gmb est @ N Máx.	2,278	2,305	2,219	2,241	2,286	2,291
Gmb med @ N Máx.	2,384	2,393	2,337	2,345	2,389	2,389
C (Factor de corrección)	1,046	1,038	1,053	1,047	1,045	1,043
Gmb corr @ N Inicial	2,091	2,087	2,047	2,055	2,093	2,098
Gmb corr @ N Diseño	2,347	2,356	2,304	2,309	2,354	2,354
Gmb corr @ N Máx.	2,384	2,393	2,337	2,345	2,389	2,389
Gmm medido	2,479		2,477		2,494	
%Gmm @ N Inicial	84,3	84,2	82,6	83,0	83,9	84,1
%Gmm prom @ N Inicial	84,3		82,8		84,0	
%Gmm @ N Diseño	94,7	95,0	93,0	93,2	94,4	94,4
%Gmm prom @ N Diseño	94,9		93,1		94,4	
%Gmm @ N Máx.	96,2	96,5	94,3	94,7	95,8	95,8
%Gmm prom @ N Máx.	96,3		94,5		95,8	

3.2.2.7 Parámetros Volumétricos de las Mezclas de Prueba Compactadas

Se analizan los parámetros volumétricos de los especímenes de prueba, donde primero se analiza los Vacíos de Aire (V_a) y los Vacíos de Agregado Mineral (VAM). Posterior se busca estimar un contenido de asfalto para alcanzar los vacíos del proyecto, según los parámetros obtenidos con las mezclas de prueba. Finalmente, se analizan los Vacíos de Aire (V_a), Vacíos de Agregado Mineral (VAM), Vacíos Llenos de Asfalto (VFA), Gravedad Máxima Teórica (G_{mm}), Porcentaje de Asfalto Absorbido (P_{be}) y Proporción de Polvo (DP) para poder seleccionar una de las Mezclas de Prueba.

Para los siguientes cálculos, a modo resumen se presentan los valores de los promedios de %G_{mm} para los N Inicial (7 giros), N Diseño (75 giros) y N Máximo (115 giros) en la siguiente Tabla 3-30:

Tabla 3-30: Determinación de %G_{mm} para N Inicial, N Diseño y N Máximo para las Mezclas de Prueba del (Diseño con RAP).

	Mezcla Prueba 1	Mezcla Prueba 2	Mezcla Prueba 3
%G _{mm} prom @ N Inicial	84,3	82,8	84,0
%G _{mm} prom @ N Diseño	94,9	93,1	94,4
%G _{mm} prom @ N Máximo	96,3	94,5	95,8

3.2.2.7.1 Vacíos de Aire (V_a) y Vacíos de Agregado Mineral (VAM)

Para determinar el porcentaje de V_a y VAM, se utiliza el N Diseño. La Ecuación 3-10 es para V_a y la Ecuación 3-11 es para VAM:

$$\% V_a = 100 - \%G_{mm}@N_{Diseño}$$

Ecuación 3-10: Vacíos de Aire de las mezclas compactadas.

Donde:

- V_a [%] = Vacíos de Aire de la mezcla compactada.

$$\%VAM = 100 - \frac{(\%G_{mm}@N_{Diseño} \times G_{mm(medida)} \times P_s)}{G_{sb}}$$

Ecuación 3-11: Vacíos de Agregado Mineral de las mezclas compactadas.

Donde:

- VAM [%] = Vacíos de Agregado Mineral.
- G_{mm} (med) = Gravedad Especifica Teórica Máxima de la mezcla medida.
- P_s [%] = Porcentaje de los agregados con respecto al peso total de la mezcla.
- G_{sb} = Gravedad Especifica Bruta de la mezcla de agregados.

Se presentan los valores para los V_a y el VAM en la Tabla 3-31:

Tabla 3-31: Vacíos de Aire y Vacíos de Agregado Mineral de las Mezclas de Prueba, Diseño con RAP.

Parámetro	Mezcla Prueba 1	Mezcla Prueba 2	Mezcla Prueba 3
%Gmm prom @ N des	94,9	93,1	94,4
Gmm medido	2,479	2,477	2,494
Ps [%]	94,8	94,8	94,8
Gsb	2,626	2,631	2,629
Va [%]	5,15	6,88	5,59
VAM [%]	15,11	16,89	15,10

3.2.2.7.2 Porcentaje de Asfalto Estimado

Un objetivo principal del diseño de mezclas según la metodología SUPERPAVE es emplear en cada una de las muestras de prueba, la cantidad de ligante asfáltico que permita alcanzar, para N Diseño, exactamente el 96% de la G_{mm} (4% de vacíos de aire). Evidentemente esto no sucede para ninguna de las 3 Mezclas de Pruebas. 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 lo tanto, habría que determinar qué porcentaje de asfalto es el necesario para cada una de las mezclas, para que estas alcancen el 4% de vacíos.

A continuación, se calcula para cada una de las mezclas de prueba, el contenido de ligante asfáltico estimado para alcanzar un 4% de vacíos de aire, en la siguiente Ecuación 3-12:

$$P_{b(est)} = P_{bi} \times [0,4 \times (4 - V_a)]$$

Ecuación 3-12: Estimación del Porcentaje de Asfalto para un 4% de Vacíos de Aire.

Donde:

- $P_{b(est)}$ [%] = Porcentaje de ligante asfáltico estimado.
- P_{bi} [%] = Porcentaje inicial de prueba del ligante asfáltico.
- V_a [%] = Porcentaje de Vacíos de Aire para N Diseño.

Se presenta los valores para el Porcentaje de Asfalto estimado en la siguiente Tabla 3-32:

Tabla 3-32: Porcentaje de Asfalto estimado, Diseño con RAP.

Parámetro	Mezcla Prueba 1	Mezcla Prueba 2	Mezcla Prueba 3
Pbi [%]	5,2	5,2	5,2
Va [%]	5,15	6,88	5,59
Pb(est) [%]	5,14	6,35	5,84

3.2.2.7.3 Vacíos de Agregado Mineral estimado, Vacíos llenos de Asfalto estimado y %G_{mm}

Las propiedades volumétricas VAM y VFA y de compactación de la mezcla, se estiman luego para el contenido de ligante asfáltico estimado, usando las siguientes ecuaciones; Ecuación 3-13 y Ecuación 3-14:

$$\%VAM_{(est)} = \%VAM_{inicial} + C \times (4 - V_a)$$

Ecuación 3-13: Estimación del VAM para un 4% de V_a.

Donde:

- VAM_(est) [%] = VAM para un 4% de Vacíos de Aire.
- VAM_{inicial} = VAM para el Contenido de Asfalto inicial.
- C = Constante (0,1 si V_a < 4%; 0,2 si V_a > 4%).

$$\%VFA_{(est)} = 100\% \times \frac{\%VAM_{(est)} - 4}{\%VAM_{(est)}}$$

Ecuación 3-14: Estimación del VFA para un 4% de V_a.

Donde:

- VFA_(est) [%] = VFA para un 4% de Vacíos de Aire.

Se presenta los valores para las estimaciones del VAM y VFA en la Tabla 3-33:

Tabla 3-33: Estimaciones del VAM y VFA para 4% de Vacíos de Aire, Diseño con RAP.

Parámetro	Mezcla Prueba 1	Mezcla Prueba 2	Mezcla Prueba 3
VAM inicial [%]	15,11	16,89	15,10
Va [%]	5,15	6,88	5,59
C	0,2	0,2	0,2
VAM (est)[%]	14,88	16,31	14,78
VFA (est) [%]	73,12	75,48	72,94

Para analizar el nivel de compactación con el 4% de Vacíos de Aire, se estima el %G_{mm} solo para N Inicial o N Máximo porque para N Diseño es 96%, por medio de la siguiente Ecuación 3-15:

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

Ecuación 3-15: Estimación del %G_{mm} @ N Giros para un 4% de Vacíos de Aire.

Donde:

- %G_{mm (est)}@N Giros = %G_{mm} estimada para un determinado N Giros (Inicial o Máximo), a 4% de V_a.

Los valores para él %G_{mm} estimado se presentan en la siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Tabla 3-34:

Tabla 3-34: Estimación para %G_{mm} @N Giros, Diseño con RAP.

Parámetro	Mezcla Prueba 1	Mezcla Prueba 2	Mezcla Prueba 3
%G _{mm} @ N Inicial	84,3	82,8	84,0
%G _{mm} @ N Máximo	96,3	94,5	95,8
V _a [%]	5,15	6,88	5,59
%G _{mm} (est) @ N Inicial	85,42	85,67	85,61
%G _{mm} (est) @ N Máximo	97,48	97,39	97,39

3.2.2.7.4 Proporción de Polvo, DP

La Proporción de Polvo o la relación de polvo y asfalto de una mezcla, es la relación del porcentaje del agregado que pasa por el tamiz N° 200 (0,075 [mm]) (P_{0,075}) y el Porcentaje de Asfalto Efectivo (P_{be}) de una mezcla. Esta relación tiene un rango permitido, el cual debe cumplirse para cualquier nivel de transito ESAL'S, corresponde a la siguiente Ecuación 3-16:

$$0,8 < \frac{P_{0,075}}{P_{be(est)}} < 1,6$$

Ecuación 3-16: Relación de Proporción de Polvo de una MAC.

Donde:

- P_{0,075} [%] = Porcentaje del agregado que pasa el tamiz N°200.
- P_{be(est)} [%] = Porcentaje de Asfalto Efectivo estimado de la mezcla.

Donde el Porcentaje de Asfalto Efectivo estimado se determina mediante la siguiente Ecuación 3-17:

$$P_{be(est)} = P_{b(est)} - (P_s \times G_b) \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}}$$

Ecuación 3-17: Porcentaje de Asfalto Efectivo Estimado de la Mezcla.

Donde:

- $P_{be(est)}$ [%] =Porcentaje de Asfalto Efectivo estimado de la mezcla.
- $P_{b(est)}$ [%] =Porcentaje de Asfalto estimado de la mezcla.
- P_s [%] =Porcentaje de los agregados con respecto al total de peso de la mezcla
- G_b =Gravedad Especifica del Asfalto.
- G_{sb} =Gravedad Especifica Bruta Seca de los agregados.
- G_{se} =Gravedad Especifica Efectiva de los agregados.

Se presentan los valores para el Porcentaje de Asfalto Efectivo estimado, el porcentaje que pasa bajo la malla N°200 y la Proporción de Polvo, en la siguiente Tabla 3-35:

Tabla 3-35: Estimación del Pbe y determinación de la DP, Diseño con RAP.

Parámetro	Mezcla Prueba 1	Mezcla Prueba 2	Mezcla Prueba 3
Gse	2,721	2,723	2,722
Gsb	2,626	2,631	2,629
Gb	1,02	1,02	1,02
Ps [%]	94,8	94,8	94,8
Pb(est) [%]	5,14	6,35	5,84
P0,075 [%]	6,4	5,7	6,0
Pbe(est) [%]	4,37	5,11	4,57
DP [%]	1,19	1,12	1,31

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.

3.2.2.8 Selección de la Mezcla de Prueba definitiva

Las siguiente Tabla 3-36 indica los valores estimados de las propiedades volumétricas y de compactación de las mezclas de prueba, para un contenido de ligante asfáltico que resultaría en un 4% de Vacíos de Aire para N Diseño:

Tabla 3-36: Propiedades Volumétricas estimadas de las Mezclas de Prueba para N Diseño, Diseño con RAP.

Parámetro	Mezcla Prueba 1	Mezcla Prueba 2	Mezcla Prueba 3
Pbi [%]	5,2	5,2	5,2
Pb(est) [%]	5,14	6,35	5,84
Va(est) [%]	4	4	4
VAM(est) [%]	14,88	16,31	14,78
VFA(est) [%]	73,12	75,48	72,94
PD [%]	1,19	1,12	1,31
%Gmm (est) @ N Inicial	85,42	85,67	85,61
%Gmm (est) @ N Máximo	97,48	97,39	97,39

Las propiedades estimadas se compararán con los criterios para las mezclas establecidos en la metodología SUPERPAVE y las EETT del Proyecto. Para el nivel de tránsito y el tamaño máximo nominal del diseño, los criterios volumétricos y de densificación son los expuesto en la siguiente Tabla 3-37:

Tabla 3-37: Criterios Volumétricos y de Densificación para el diseño.

Parámetro	EETT	SUPERPAVE
Vacios de Aire [%]	3,5	4,0
VAM mínimo [%]	13,0	13,0
VFA [%]	-	65 - 78
PD [%]	-	0,8 – 1,6
%Gmm @ N Inicial	-	<90,5
%Gmm @ N Máximo	-	<98,0

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.

Finalmente, las tres mezclas de prueba cumplen con los parámetros, pero se selecciona la **Mezcla 1** debido a que dicha mezcla, es la equivalente a la Mezcla del Diseño Base y debido a que unos de los objetivos específicos de la presente memoria es homologar el diseño del proyecto.

3.2.3 Selección del Contenido de Ligante Asfáltico de Diseño

Una vez seleccionada la estructura del agregado de diseño, se da paso a compactar especímenes con diferentes contenidos de ligante asfalto, los cuales serán evaluados para determinar el contenido de ligante asfáltico definitivo de diseño.

Igualmente que en la etapa anterior, se confeccionan un mínimo de 2 especímenes para cada uno de los contenidos de asfalto. Dichos contenidos corresponden al porcentaje estimado de asfalto de la Mezcla de Prueba seleccionada, más $\pm 0,5\%$ y $+ 1\%$. La siguiente Tabla 3-38 indica los porcentajes de ligante del diseño:

Tabla 3-38: Porcentajes de Asfalto para la mezcla definitiva, Diseño con RAP.

Porcentaje de Asfalto	Diseño con RAP
Pb(est) [%]	5,1
-0,5 [%]	4,6
+0,5 [%]	5,6
+1 [%]	6,1

Se describen los pasos para seleccionar el contenido óptimo de ligante asfáltico del diseño. Primero se indica los valores de densificación de las mezclas, para luego proseguir con los parámetros volumétricos de las mezclas.

3.2.3.1 Densificación de las Mezclas con diferentes P_b

Para comenzar con esta etapa, se debe preparar un mínimo de 2 especímenes para determinar G_{mm} medido para cada contenido estimado de ligante asfáltico. Además, es necesario realizar los ensayos de G_{mb} para cada espécimen. Cada uno de los especímenes es preparado y ensayado de la misma forma que los especímenes de la sección “3.2.2 Selección de la estructura del agregado de diseño”, del presente capítulo.

Los datos del SGC para los 4 contenidos de ligante asfáltico se presentan en las siguientes tablas, con sus correspondientes curvas de densificación en el gráfico adjunto. El gráfico de densificación muestra los tres puntos importantes de compactación a partir de las tablas, con el $\%G_{mm}$ (N Inicial, N Diseño y N Máximo) en las ordenadas y el logaritmo del número de giros en las abscisas.

Se presentan los datos de densificación del diseño con RAP, en las siguientes tablas y gráfico: Tabla 3-39, Tabla 3-40, Tabla 3-41, Tabla 3-42 y Gráfico 3-4:

Tabla 3-39: Datos de Densificación para la Mezcla con 5,1 [%] de Pb, Diseño con RAP.

Mezcla con 5,1 [%] de Pb									
N° de Giros	Especimen 1				Especimen 2				% Gmm \bar{X}
	Ht [mm]	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm [%]	
N Inicial	130,9	2,018	2,100	84,3	128,2	2,062	2,137	85,8	85,0
N Diseño	116,7	2,263	2,355	94,6	114,5	2,309	2,393	96,1	95,3
N Máximo	114,9	2,298	2,392	96,0	112,9	2,342	2,427	97,4	96,7
Masa Especimen	4666,9				4672,2				
C (Factor corr)	1,041				1,036				
Gmb (medido)	2,392				2,427				
Gmm (medido)	2,491								

Tabla 3-40: Datos de Densificación para la Mezcla con 4,6 [%] de Pb, Diseño con RAP.

Mezcla con 4,6 [%] de Pb									
N° de Giros	Especimen 1				Especimen 2				% Gmm \bar{X}
	Ht [mm]	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm [%]	
N Inicial	129,6	2,039	2,124	84,9	130,5	2,025	2,117	84,6	84,8
N Diseño	115,8	2,282	2,378	95,0	116,4	2,270	2,373	94,9	94,9
N Máximo	114,1	2,316	2,413	96,4	114,7	2,303	2,409	96,3	96,4
Masa Especimen	4669,1				4668,9				
C (Factor corr)	1,042				1,046				
Gmb (medido)	2,413				2,409				
Gmm (medido)	2,502								

Tabla 3-41: Datos de Densificación para la Mezcla con 5,6 [%] de Pb, Diseño con RAP.

Mezcla con 5,6 [%] de Pb									
N° de Giros	Especimen 1				Especimen 2				% Gmm \bar{X}
	Ht [mm]	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm [%]	
N Inicial	136,5	1,936	1,985	80,4	129,9	2,037	2,108	85,4	82,9
N Diseño	112,7	2,345	2,404	97,3	115,7	2,287	2,367	95,9	96,6
N Máximo	111,1	2,379	2,439	98,7	114	2,321	2,403	97,3	98,0
Masa Especimen	4670,6				4675,8				
C (Factor corr)	1,025				1,035				
Gmb (medido)	2,439				2,403				
Gmm (medido)	2,47								

Tabla 3-42: Datos de Densificación para la Mezcla con 6,1 [%] de Pb, Diseño con RAP.

Mezcla con 6,1 [%] de Pb									
N° de Giros	Especimen 1				Especimen 2				% Gmm [x̄]
	Ht [mm]	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm [%]	Ht [mm]	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm [%]	
N Inicial	133,5	1,980	2,118	86,5	113,1	2,043	2,108	86,5	86,5
N Diseño	119,1	2,219	2,374	97,0	115	2,302	2,375	97,5	97,2
N Máximo	117,3	2,253	2,411	98,5		2,341	2,415	99,1	98,8
Masa Especimen	4670,2				4678,3				
C (Factor corr)	1,070				1,032				
Gmb (medido)	2,411				2,415				
Gmm (medido)	2,448								

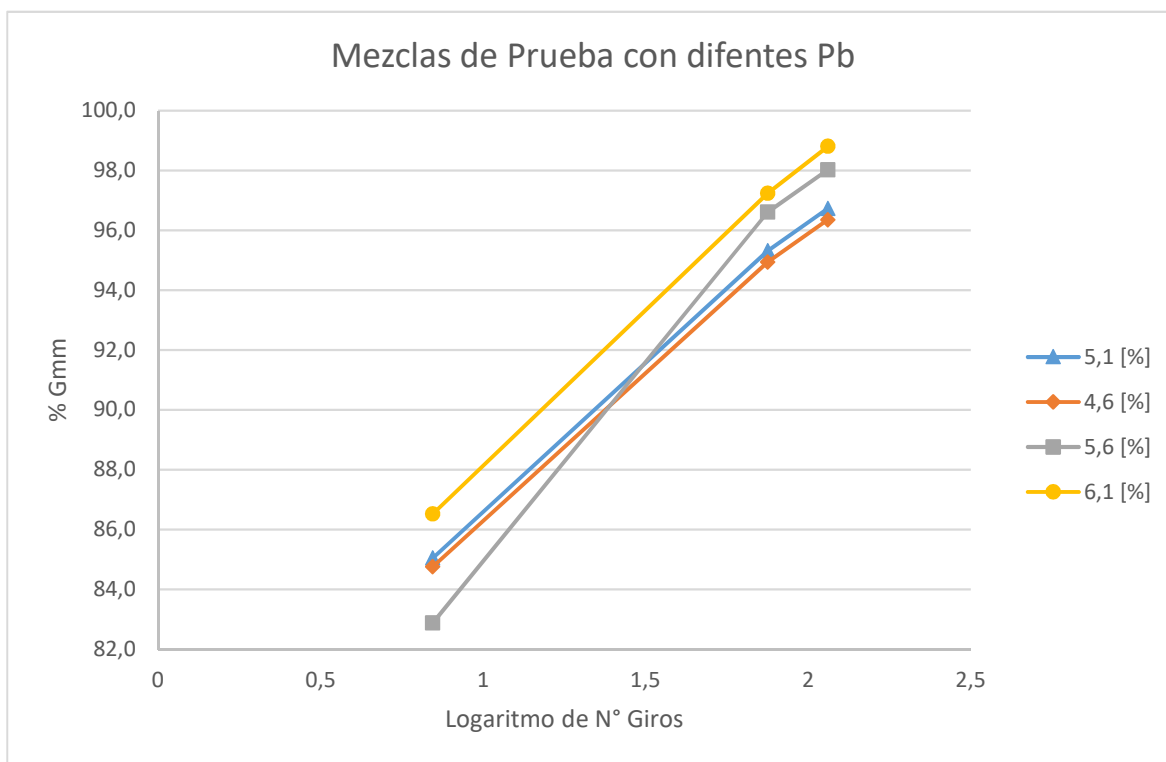


Gráfico 3-4: Curva de densificación para las 4 mezclas con diferentes Pb, Diseño con RAP.

3.2.3.2 Parámetros Volumétricos de las Mezclas con diferentes P_b

Las propiedades de la mezcla son evaluadas para los diferentes contenidos de ligante asfáltico, utilizando los valores de densificación más representativos para este diseño, que son N inicial (7 giros), N diseño (75 giros) y N máximo (115 giros). En la siguiente Tabla 3-43, se presentan el resumen de los valores de compactación:

Tabla 3-43: Resumen de los valores de compactación para la mezcla con diferentes P_b, Diseño RAP:

% de P _b	4,6 [%]	5,1 [%]	5,6 [%]	6,1 [%]
% Gmm @N Inicial	85,0	84,8	82,9	86,5
% Gmm @N Diseño	95,3	94,9	96,6	97,2
% Gmm @N Máximo	96,7	96,4	98,0	98,8

Se determinan las demás Propiedades Volumétricas a las mezclas con diferentes porcentajes de ligante asfáltico, para N Diseño. El procedimiento para estos cálculos, son idénticos a los realizados en la sección “3.2.2.7 Parámetros Volumétricos de las Mezclas de Prueba Compactadas” del presente capítulo. 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 expuestas en la siguiente Tabla 3-44:

Tabla 3-44: Resumen de las Propiedades Volumétricas de las Mezclas con diferentes P_b, Diseño con RAP.

Parámetro	4,6 [%]	5,1 [%]	5,6 [%]	6,1 [%]
Va [%]	5,06	4,69	3,39	2,75
VAM [%]	13,70	14,20	14,22	14,88
VFA [%]	63,10	66,98	76,15	81,48
DP	1,72	1,56	1,38	1,23

3.2.3.3 Selección del Porcentaje Óptimo de Asfalto

Para determinar el contenido de ligante asfáltico óptico de un diseño, se debe verificar que todas las propiedades volumétricas cumplan con los criterios establecidos. Los requisitos del presente diseño se basan en la metodología SUPERPAVE y las EETT del proyecto, que a modo de resumen y recordatorio se muestran en la siguiente Tabla 3-45:

Tabla 3-45: Resumen de los requerimientos de las Propiedades Volumétricas para el diseño.

	Requerimiento SUPERPAVE	Requerimiento EETT
Va [%]	4,0	3,5
VAM mínimo [%]	13	15
VFA [%]	65 – 78	-
PD	0,8 – 1,6	-
Numero de Giro Inicial	7	-
Numero de Giro de Diseño	75	75
Numero de Giro Máximo	115	-
% Gmm @N Inicial	≤90,5	-
% Gmm @N Diseño	96,0	-
% Gmm @N Máximo	≤98,0	-

En base a los valores presentados, se debe seleccionar la mezcla con el porcentaje de ligante asfáltico más apropiado. Por lo tanto, para el Diseño con RAP ninguno de los cuatro porcentajes de ligante asfáltico cumple con el porcentaje de Vacíos de Aire, donde los más cercanos son los valores de 4,7% de V_a para el 5,1% de P_b , y 3.4% V_a para el 5,6% de P_b . Además, para esos dos porcentajes de ligante las demás Propiedades Volumétricas están dentro de los parámetros correspondientes.

Los resultados anteriores indican que el porcentaje optimo del ligante debería estar en el rango de 5,1 – 5,6%. Con el fin de obtener un valor de V_a más cercano a 4%, se vuelve a estimar el porcentaje de ligante igualmente como se realiza con las mezclas de prueba, según la Ecuación 3-12 descrita en el presente Capítulo.

En la Tabla 3-46 a continuación, se ven los valores de ligante asfáltico estimado para las dos mezclas anteriormente mencionadas. Además, se agregan el resto de los parámetros volumétricos estimados de la mezcla compactada.

Tabla 3-46: Parámetros Volumétricos estimados para un 5,4% de P_b , Diseño con RAP.

Parámetro	Mezcla con 5,1 [%] de P_b	Mezcla con 5,6 [%] de P_b
Pb (est) [%]	5,4	5,4
VAM (est) [%]	14,1	14,3
VFA (est) [%]	71,6	72,1
Pbe (est)	4,37	4,39
PD (est)	1,47	1,46

En definitiva, la Tabla 3-46 entrega porcentaje de ligante de 5,4% para ambas estimaciones. Además, los otros parámetros estimados son relativamente similares entre sí, igualmente dichos parámetros están dentro de los requerimientos del diseño, propuestos en la Tabla 3-45. A partir de lo anterior, y para realizar un diseño más exhaustivo, se selecciona el porcentaje de 5,4% de ligante asfáltico para el Diseño con RAP.

Además, luego de seleccionar el porcentaje óptimo de ligante para el diseño con RAP, se procede a realizar el ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima según ASTM D2041¹⁸, mediante el mismo procedimiento descrito en la sección de “3.2.2 Selección de la Estructura del Agregado de Diseño” del presente Capítulo. El resultado fue de 2477 [Kg/m³], valor que será necesitado para determinar el contenido de Vacíos de las probetas de los ensayos de Susceptibilidad a la Humedad, Rueda de Hamburgo y Módulo de Rigidez.

A partir de los valores obtenidos, se generan los gráficos comparativos de V_a , VAM y VFA, en función del contenido de ligante asfáltico. Los gráficos son los siguientes; Gráfico 3-5, Gráfico 3-6, Gráfico 3-7, Gráfico 3-8:

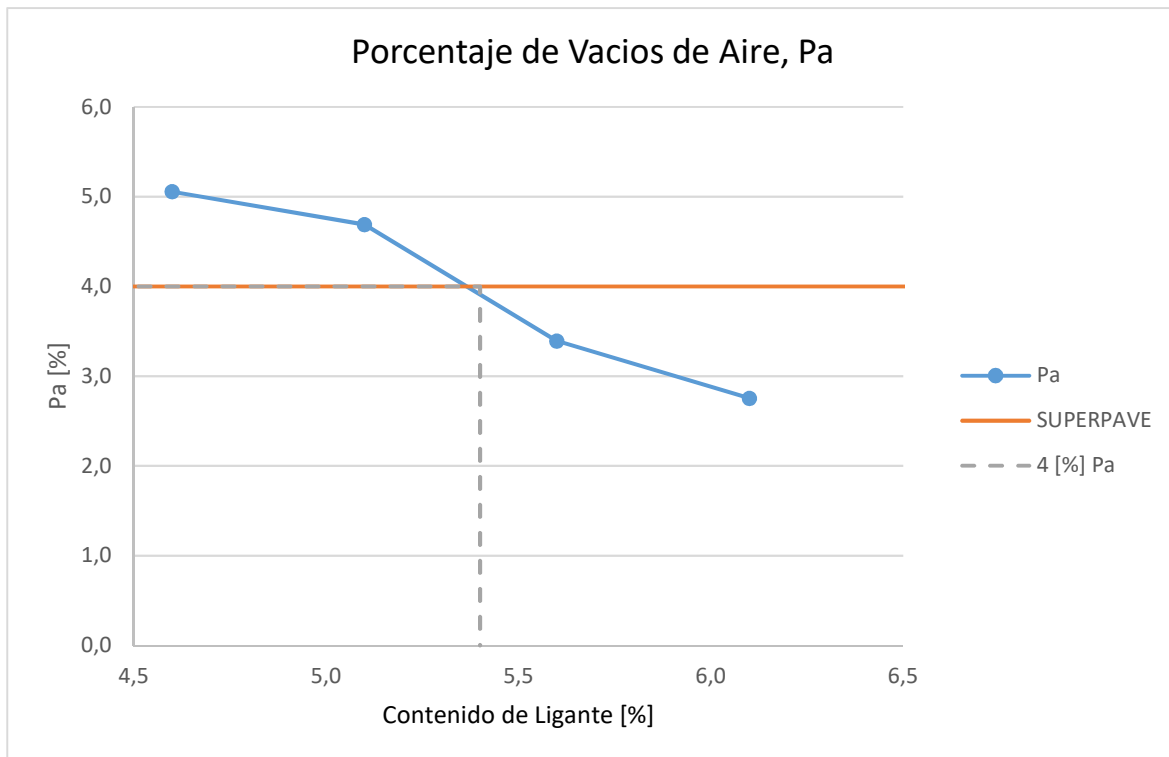


Gráfico 3-5: Vacíos de Aire versus el Contenido de Ligante Asfáltico, Diseño con RAP.

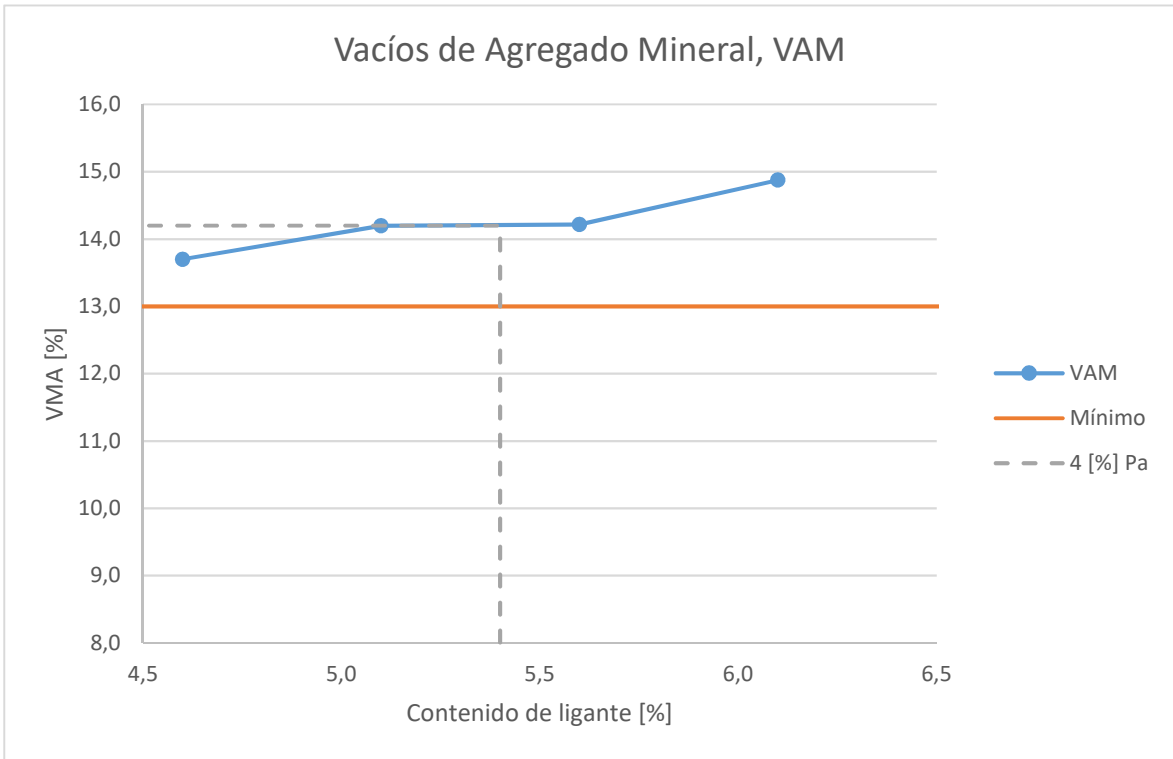


Gráfico 3-6: Vacíos de Agregado Mineral versus Contenido de Ligante Asfáltico, Diseño con RAP.

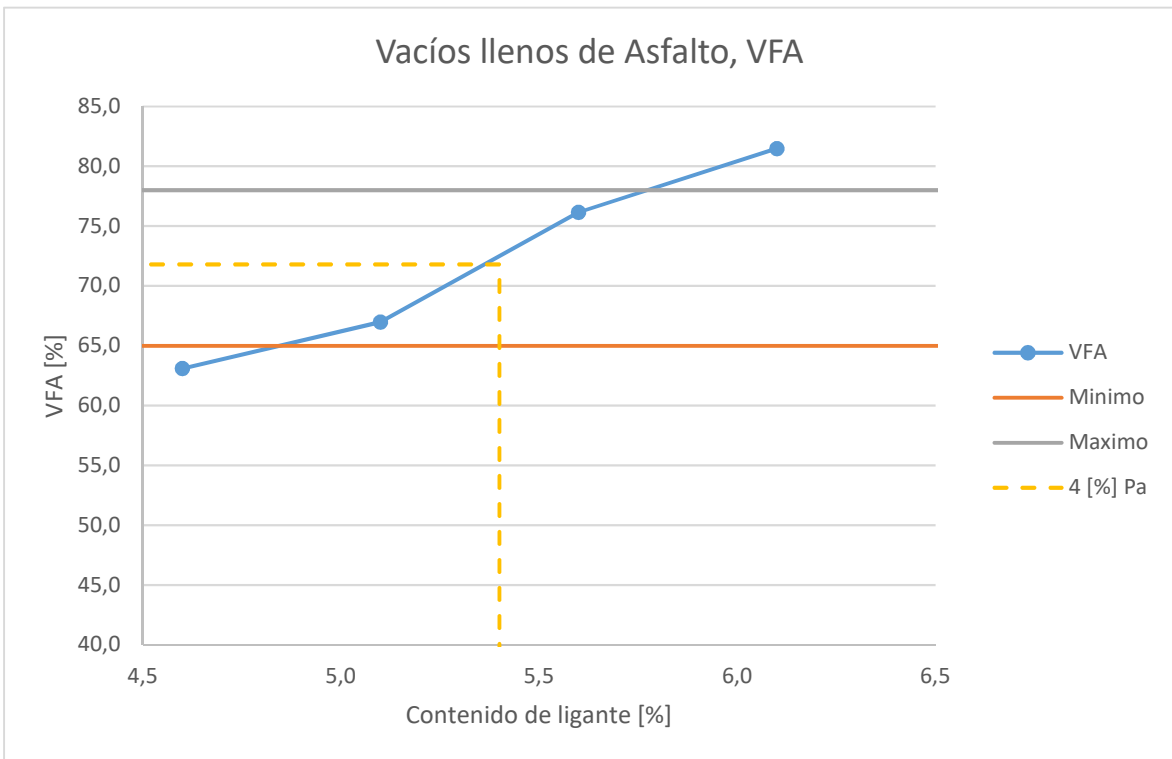


Gráfico 3-7: Vacíos llenos de Asfalto versus el Contenido de Ligante Asfáltico, Diseño con RAP.

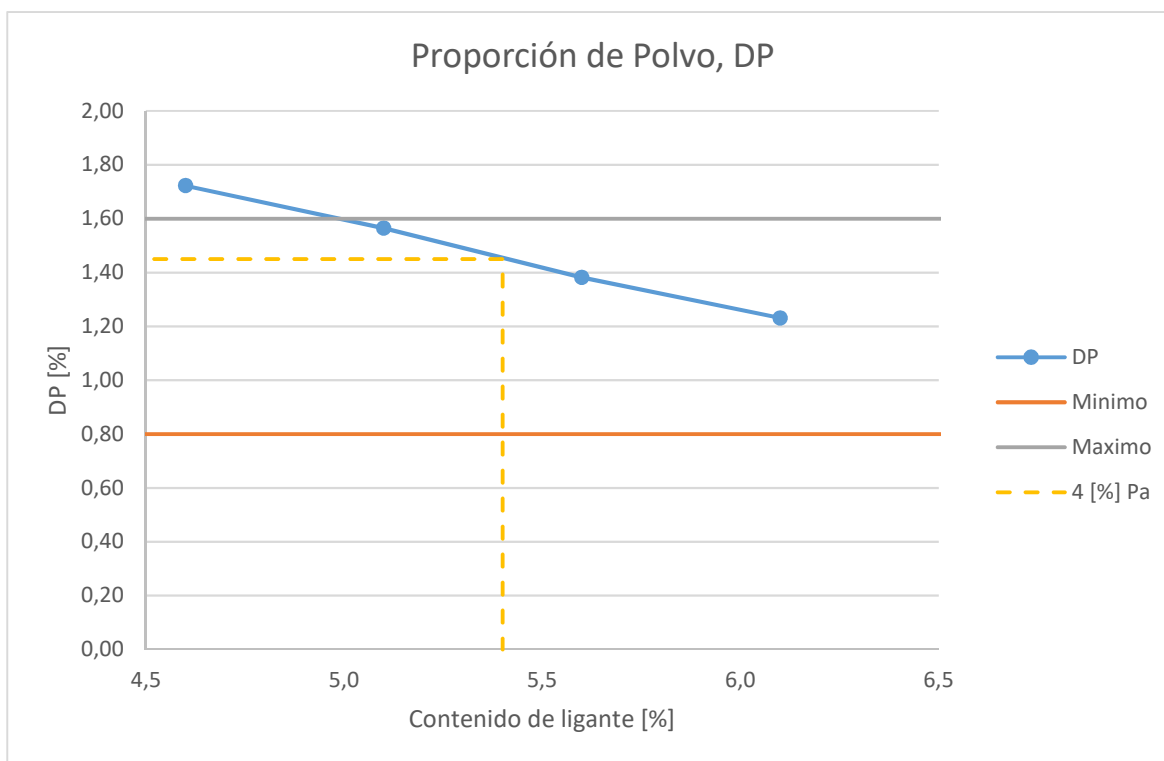


Gráfico 3-8: Proporción de Polvo versus Contenido de Ligante Asfáltico, Diseño con RAP.

3.2.4 Evaluación de la Susceptibilidad a la Humedad, TSR

Para finalizar el proceso del diseño de mezclas mediante la metodología SUPERPAVE, se realiza la Evaluación de la Sensibilidad a la Humedad de la mezcla de diseño, según la norma ASTM D4867/D4867M⁴, “Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures”, Susceptibilidad a la humedad por medio del ensayo de Tensión Indirecta (TSR).

Para determinar el daño por humedad, se preparan un conjunto de especímenes, compactados en laboratorio según la mezcla asfáltica del diseño, el proceso de preparación de la mezcla y la compactación es similar al descrito anteriormente en la sección “3.2.2 Selección de la Estructura de Agregado de Diseño” del presente Capítulo. Los especímenes se compactan a un contenido de vacíos que corresponda a los niveles de vacíos esperado en terreno, generalmente entre 6 – 8%, en el presente caso el valor deseado es 7%.

El conjunto corresponde a 6 especímenes, los cuales se dividen en dos subconjuntos de tres especímenes de contenido de vacíos aproximadamente igual. Un subconjunto se mantiene seco mientras que el otro subconjunto se somete a saturación por

vacío para alcanzar un grado de saturación constante del 55 al 80%. La resistencia a la tracción de cada subconjunto se determina mediante el ensayo de Tensión Indirecta. El potencial de daño por humedad se indica por la relación entre la resistencia a la tracción del subconjunto húmedo y la del subconjunto seco. La ecuación para determinación la resistencia es la Ecuación 3-18:

$$TSR = \frac{200 \times P}{t \times D \times \pi}$$

Ecuación 3-18: Tensión Indirecta.

Donde:

- TSR = Ensayo de Tensión Indirecta.
- P [N] = Carga Máxima.
- t [mm] = Espesor de la probeta.
- D [mm] = Diámetro de la probeta.

Por lo anterior, el procedimiento para realizar el ensayo es el siguiente:

1. Elaborar 6 probetas para cada test mediante el compactador SCG, 3 para ensayo en seco y 3 para ensayo húmedo, con un Porcentaje de Huecos de Aire de $7 \pm 1\%$.
2. Determinar la altura de cada probeta, última altura dada por el SCG.
3. Determinar las Densidad Real de cada probeta según ASTM D2726¹⁹.
4. Determinar el Volumen de la probeta, correspondiente a la resta de la masa de la probeta saturada superficialmente con la masa bajo agua del ensayo de densidad real.
5. Determinar los Huecos de Aire de cada probeta (P_a), y dividir en dos grupos las probetas de tal manera que el promedio de los Huecos de Aire de ambos grupos sea aproximadamente igual.
6. Para el grupo húmedo:
 - 6.1. Saturar parcialmente las probetas en una cámara de vacíos a 20 pulg [Hg], por un periodo de 5 minutos una temperatura de 60 [°C] o más.
 - 6.2. Determinar el Volumen de Vacíos, siendo la multiplicación del Volumen de la probeta con el porcentaje de Huecos.
 - 6.3. Determinar el Volumen de cada probeta después de la saturación parcial, restando la masa de la probeta parcialmente saturada con la masa seca.
 - 6.4. Determinar el Volumen de Agua Absorbida, restando la masa de la probeta superficialmente seca después de la saturación parcial, con la masa seca de la probeta.

- 6.5. Determinar el grado de saturación de cada probeta, dividiendo el volumen de agua absorbida en el volumen de huecos y expresar el resultado como porcentaje. Si este valor se encuentra entre 55 a 80[%], se procede con el ensayo, si es mayor el espécimen debe ser rechazado.
- 6.6. Determinar el porcentaje de hinchamiento de cada probeta, dividiendo el cambio de volumen de la probeta (valor del punto 4 con 6.3), con el volumen posterior a la saturación parcial.
7. Acondicionar las probetas húmedas, en un baño de agua destilada durante 24 horas a 60 ± 1 [°C].
 - 7.1. Ajusta la temperatura de las probetas, dejándola en un baño de agua destilada por una hora a 25 ± 1 [°C].
 - 7.2. Determinar la altura de cada probeta y calcular su volumen.
 - 7.3. Determinar el grado de saturación de cada probeta, es aceptable un valor mayor a 80%.
 - 7.4. Determinar el porcentaje de hinchamiento, ídem al punto 6.6.
8. Ajusta la temperatura del grupo seco, dejándolas en un baño de agua destilada por una hora a 25 ± 1 [°C].
9. Determinar la resistencia a tracción indirecta de ambos grupos.
10. Promediar el valor de la resistencia para cada grupo, determinar el valor de TSR dividiendo el valor húmedo con el seco.

Para el diseño con un 25% de RAP y con un 5,4% total de ligante asfáltico, se presentan los resultados del ensayo TSR en la siguiente Tabla 3-47:

Tabla 3-47: Resultado del ensayo de Susceptibilidad a la Humedad, Diseño con RAP.

	Promedio de grupo		Req. SUPERPAVE	Req. EETT
	Grupo Seco	Grupo Húmedo		
Tensión Indirecta [kPa]	621,2	559,8		
TSR [%]	90,1		> 80 [%]	>75 [%]

Se presentan las siguientes figuras del ensayo, Figura 3-15 y Figura 3-14:



Figura 3-15: Ensayo de tracción Indirecta.



Figura 3-14: Probetas después del ensayo TSR.

4. RESULTADOS

En esta sección, se presentan los resultados de la presente memoria. En primer lugar, se expone el resultado final de ambos diseños (Diseño Base y Diseño con RAP) y específicamente se comparan sus Parámetros Volumétricos. Luego, se presentan los resultados de los Ensayos de Desempeño igualmente para ambos Diseños (Módulo de Rigidez y Rueda de Hamburgo).

4.1 RESULTADO DEL DISEÑO

Se presenta la Granulometría de ambos Diseños en el Gráfico 4-1 y los Parámetros Volumétricos en la Tabla 4-1. Además, se adjunta los gráficos en conjunto de los Parámetros Volumétricos de ambos diseños en los siguientes gráficos; Gráfico 4-2, Gráfico 4-3, Gráfico 4-4 y Gráfico 4-5.

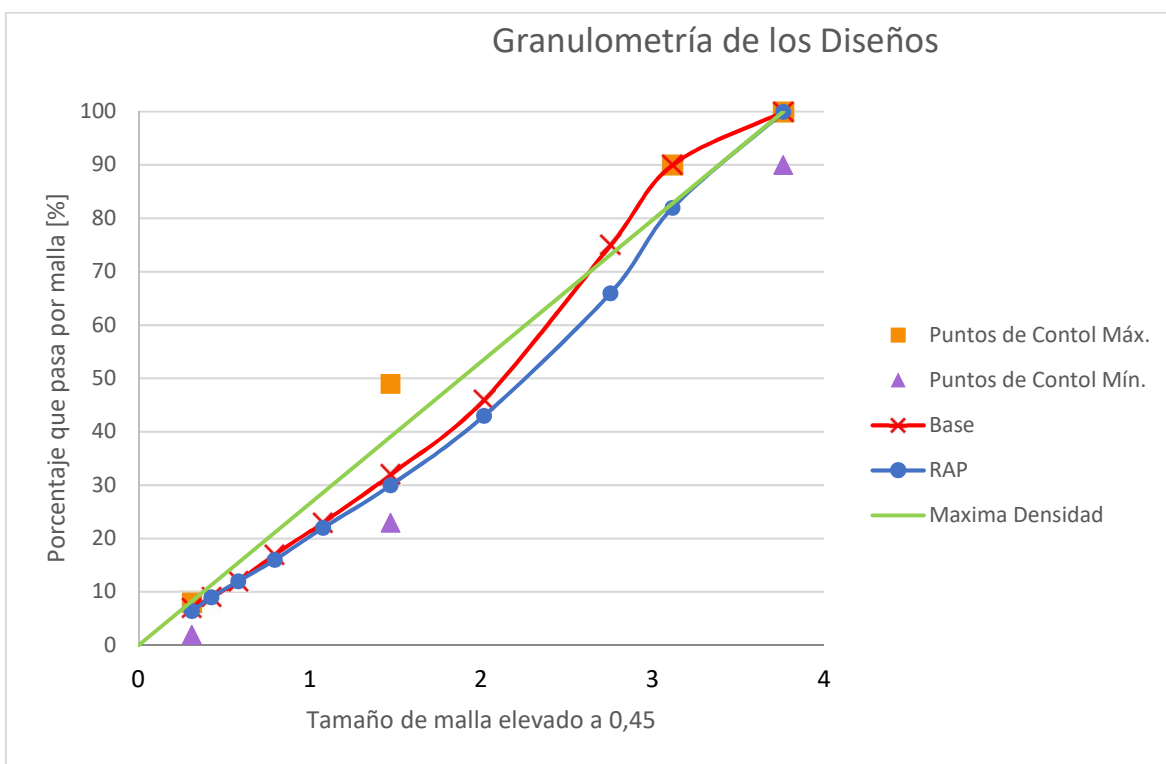


Gráfico 4-1: Granulometría de los Diseños.

Tabla 4-1: Parámetros Volumétricos de los Diseños.

	Diseño Base	Diseño con RAP
Gravedad Específica Bruta [Kg/m ³]	2.392	2.378
Gravedad Específica Teórica Máxima [Kg/m ³]	2.492	2.477
Va [%]	4,69	4,0
VAM [%]	14,20	14,2
VFA [%]	66,98	71,8
PD	1,56	1,5
Ligante Asfáltico Optimo [%]	5,3 ± 0,3	5,4 ± 0,3

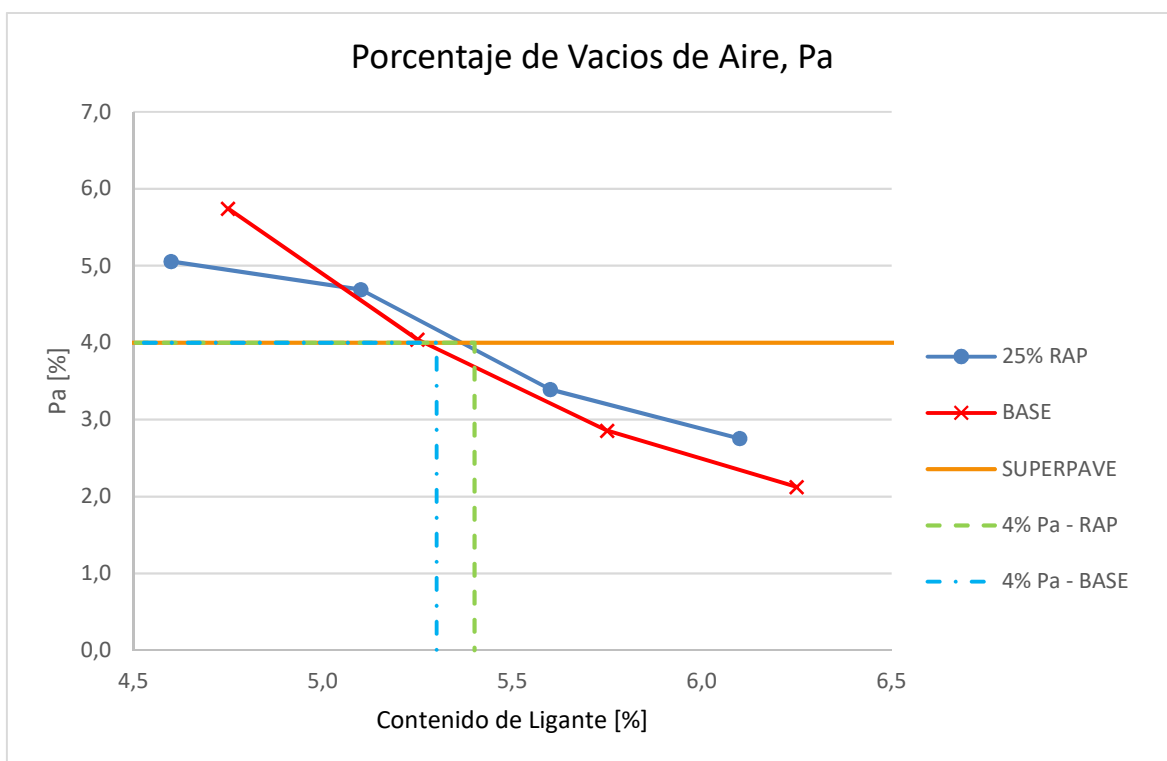


Gráfico 4-2: Vacíos de Aire versus el Contenido de Ligante.

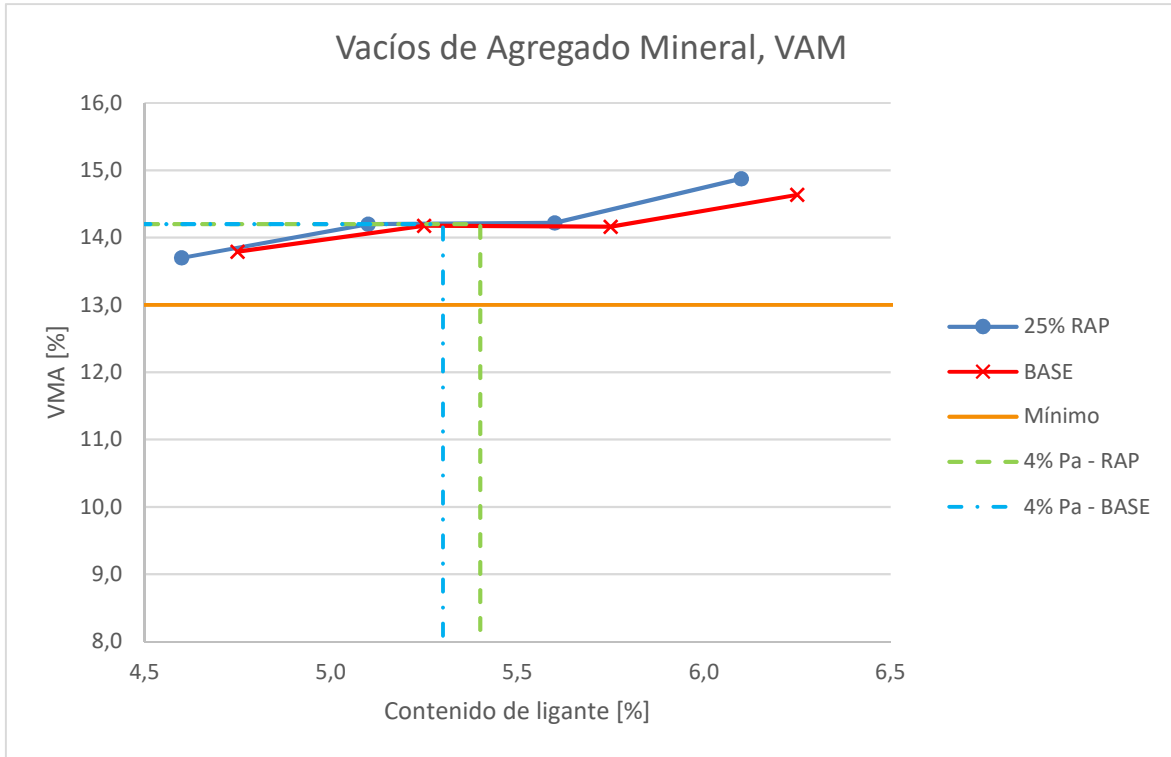


Gráfico 4-3: Vacíos de Agregado Mineral versus el Contenido de Ligante Asfáltico.

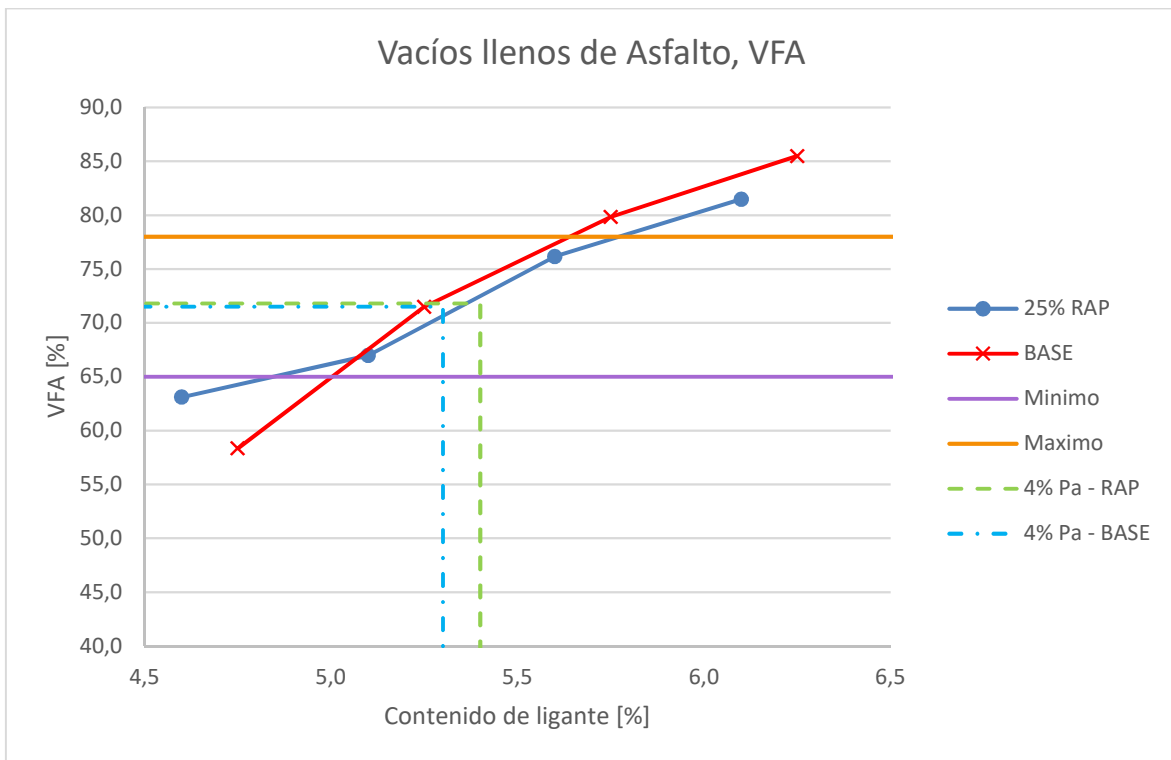


Gráfico 4-4: Vacíos Llenos de Asfalto versus el Contenido de Ligante Asfáltico.

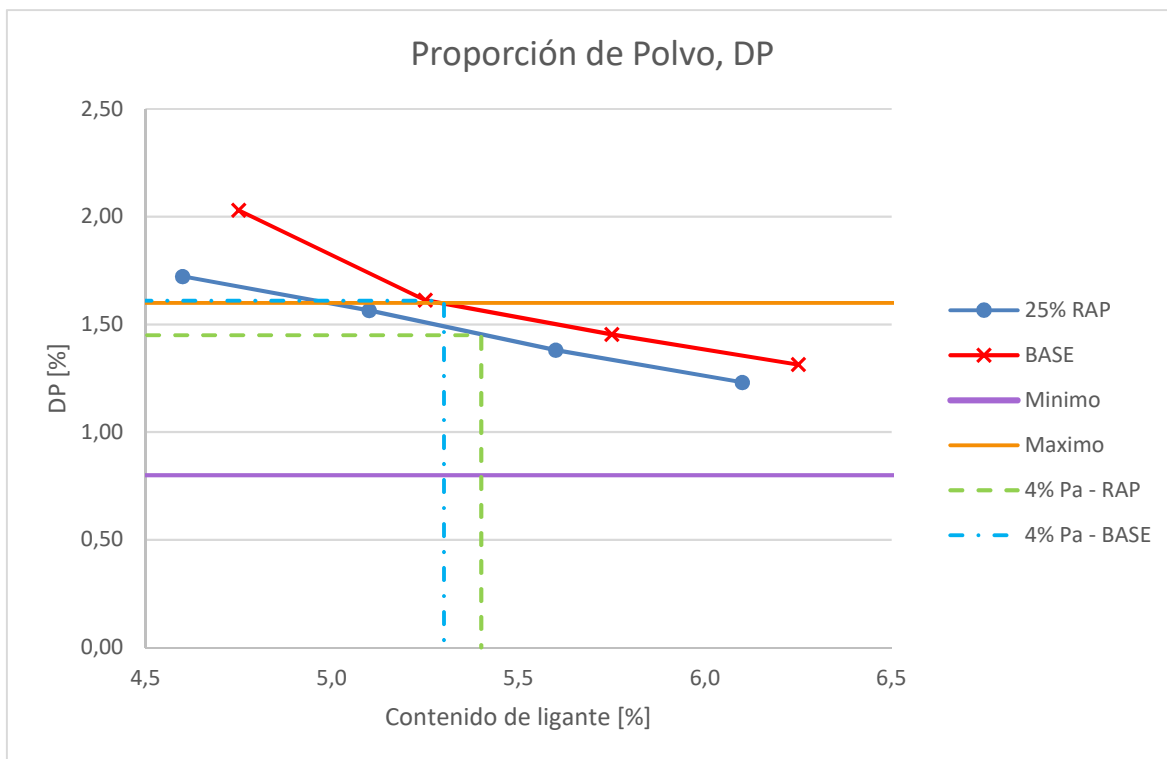


Gráfico 4-5: Proporción de Polvo versus el Contenido de Ligante Asfáltico.

4.1.1 Comparación de los Diseños

Primero, la Granulometría de los Diseños es semejante a excepción de la parte superior del Gráfico 4-1, pero aun así es mínima dicha diferencia. La granulometría de la Mezcla con RAP siempre va por abajo de la Mezcla Base, separándose más en la parte final del área del gráfico.

El Gráfico 4-2 expone el Contenido de Vacíos vs el Contenido de Asfalto y se obtienen tendencias similares en la gráfica, donde la tendencia de la Mezcla con RAP va por encima de la Mezcla Base, a excepción del primer punto de la gráfica de la Mezcla con RAP que se desvía de la tendencia del gráfico. De este gráfico se determina que la Mezcla con RAP necesita un mayor Porcentaje de Asfalto al mismo Porcentaje de Vacíos que la Mezcla Base, obteniendo en la premisa de SUPERPAVE de 4% de Vacíos una diferencia de ambas mezclas un 0,1% de Asfalto, lo cual es una diferencia mínima.

Igualmente, el Gráfico 4-3 indica los Vacíos de Agregado Mineral (VAM) vs el Contenido de Asfalto, donde el VAM representa el volumen del vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, incluye los Vacíos de Aire y el Asfalto Efectivo. La tendencia de ambas mezclas de dicho Gráfico es casi idénticas,

teniendo la tendencia de la Mezcla Base por debajo de la Mezcla con RAP, es decir que el VAM de la Mezcla con RAP es levemente superior.

Asimismo, el Gráfico 4-4 expone los parámetros de Vacíos Llenos de Asfalto (VFA) vs el Contenido de Asfalto, donde el VFA representa los vacíos en el agregado llenos de asfalto. A excepción del primer punto de la tendencia de la Mezcla con RAP, ambas gráficas son similares entre sí, donde la tendencia de la Mezcla con RAP va por debajo de la Mezcla Base, es decir que el VFA de la Mezcla Base es sutilmente mayor.

Las propiedades volumétricas, como los huecos de aire y el VAM, se ven directamente afectadas por la cantidad y el tamaño de las partículas de agregado y las características de la mezcla final. Lo anterior lo verifica el Gráfico 4-1, Gráfico 4-2, Gráfico 4-3 y Gráfico 4-4, donde en ambos diseños se emplean los mismos agregados vírgenes y además se tiene una granulometría similar en ambos diseños, teniendo como resultado unos Parámetros Volumétricos semejantes entre sí. Esto genera que las gráficas de los diseños sean semejantes.

Por último, el Gráfico 4-5 expone la Proporción de Polvo (PD) vs el Contenido de Asfalto, donde la PD corresponde a un parámetro de relación entre porcentaje del agregado bajo el tamiz N° 200 y el Porcentaje de Asfalto Efectivo de una mezcla, con un cierto rango de aceptabilidad. La gráfica muestra la misma tendencia en ambas mezclas, teniendo la Mezcla Base por encima de la con RAP y obteniendo un valor dentro del rango de aceptabilidad para el % de asfalto seleccionado para ambas mezclas.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA

Se presentan los resultados de los Ensayo de Módulo de Rigidez y Rueda de Hamburgo para el Diseño con 25% RAP y Diseño Base.

4.2.1 Ensayo de Módulo de Rigidez

Para determinar el Módulo de Rigidez de una mezcla asfáltica, se debe realizar el ensayo de tracción indirecta, que consiste en aplicar una carga axial de compresión diametral, de corta duración, a una probeta cilíndrica extraída de un pavimento o fabricadas en laboratorio. Esta carga se aplica en dos generatrices opuestas: dos diámetros trazados a 90[°]. Esta carga de compresión provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical.

Este ensayo, se puede realizar a diferentes temperaturas dentro de un rango de 10 a 30[°C]. Para este estudio, la temperatura de ensayo será de 15[°C] solamente. A demás las probetas son realizadas en laboratorio, teniendo las medidas de la altura de 60-65[mm]. Además, según especificación del ensayo se necesita que las probetas tengan un porcentaje de Huecos de Aire de $4 \pm 1\%$. El proceso de preparación de la mezcla y la compactación es idéntico al descrito anteriormente en la sección “3.2.2 Selección de la Estructura de Agregado de Diseño” del Capítulo “Trabajo en Laboratorio”.

El sistema de carga aplicado en este ensayo es a través de pulsos de carga repetitivos, que se alteran con periodos de descanso como la Figura 4-1 expuesta a continuación.

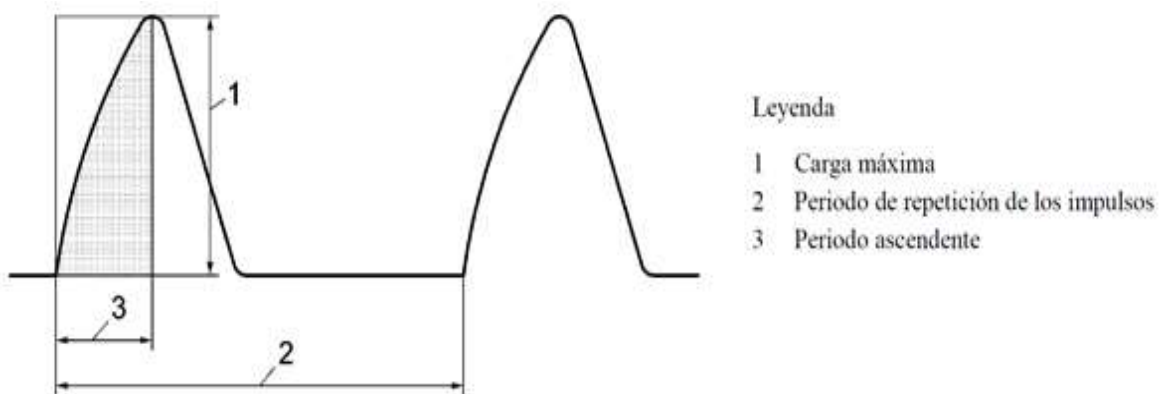


Figura 4-1: Forma del impulso de carga, mostrando el periodo ascendente y la carga máxima.³

El presente ensayo se realiza bajo la norma normativa UNE-EN 12697-26³ con probetas cilíndricas hechas en laboratorio, donde este valor es entregado de forma automática por el software del equipo de ensayo de Tracción Indirecta (Máquina Servo Hidráulica Universal HYD25-II, Cooper Technology), además el mismo software entrega un ajuste al Módulo de Rigidez medido.

El procedimiento de ensayo es el siguiente:

1. Elaboración de las probetas por medio del compactador SCG, según el diseño realizado previamente, con un porcentaje de huecos de $4\pm 1\%$. Se necesitan 4 probetas por ensayo.
2. Determinar las Densidad Real de cada probeta según ASTM D2726¹⁹.
3. Se realizan dos probetas de altura de 140[mm] para cada diseño, luego son cortadas a la mitad procurando dejar ambas caras lisas, obteniendo las 4 probetas necesarias (dos pares hermanas). Ver Figura 4-2.
4. Se deben marcar cada probeta, trazando una línea horizontal en el diámetro de la probeta, para luego trazar otra línea diametral completamente perpendicular a la anterior.
5. Cada probeta debe ser acondicionada a la temperatura de ensayo, este proceso se lleva a cabo en el mismo equipo de ensayo, a una temperatura controlada de 15[°C] por un mínimo de 4 horas.
6. Se debe posicionar la probeta en el dispositivo del equipo de ensayo. Ver Figura 4-4.
7. Introducir la probeta con los dispositivos dentro del equipo. Ver Figura 4-3.
8. Encender el ordenador e iniciar el software. Ensayar la probeta.

Se presentan las figuras del ensayo; Figura 4-2, Figura 4-4 y Figura 4-3:



Figura 4-2: Corte de las probetas.

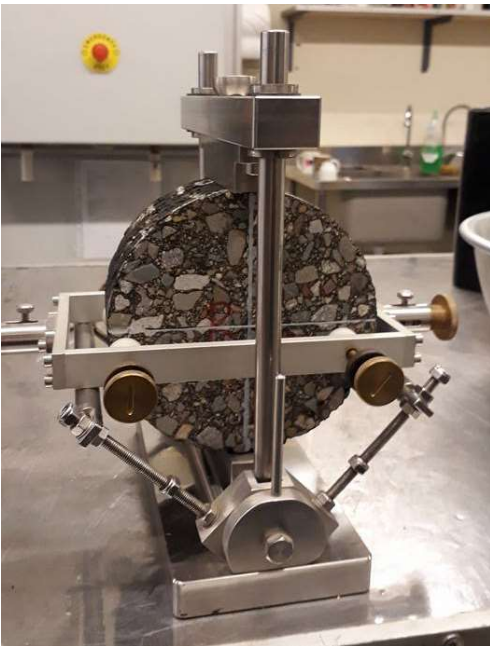


Figura 4-4: Probeta montada en el dispositivo del equipo, Ensayo Rigidez.



Figura 4-3: Probeta en el dispositivo y dentro del equipo, Ensayo Rigidez.

Como consideración del ensayo, cada vez que la probeta se somete a ensayo de Tracción Indirecta en su primer diámetro, se debe extraer del equipo de ensayo, girar 90 ± 10 [°] alrededor de su eje central, para proceder al segundo ensayo en su segundo diámetro.

También, el valor medio del módulo de rigidez de cada ensayo debe estar dentro del rango porcentual de +10% y -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.

4.2.1.1 Resultados del Ensayo

Según la normativa, se presentan los datos necesarios de cada probeta ensayada. Se presenta los resultados del ensayo para el Diseño Base en la Tabla 4-2 y para el Diseño con RAP en Tabla 4-3, descritas a continuación:

Tabla 4-2: Resultados del ensayo Módulo de Rigidez, Diseño Base.

Datos	Probeta A1	Probeta A2	Probeta B1	Probeta B2
Método de Ensayo	Realizado en base a Norma UNE-EN 12697-26, Noviembre 2012. Anexo C			
Equipo de Ensayo	Máquina Servo Hidráulica Universal HYD25-II, Cooper Technology.			
Densidad Real [Kg/m³]	2.396	2.396	2.401	2.401
Huecos de Aire [%]	3,85	3,85	3,65	3,65
Frecuencia o tiempo de carga [ms]	124,0	124,0	124,0	124,0
Deformación Horizontal [μm]	7,0	7,0	7,0	7,0
Deformación o desplazamiento [%]	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	6.283	6.169	6.355	7.141
Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]	6.338	6.228	6.414	7.226
Diferencia entre Módulos Medidos [%]	0,02	-10,26	2,90	2,35
Diferencia entre Módulos Ajustado [%]	-0,82	-10,65	1,70	1,05

Tabla 4-3: Resultados del ensayo Módulo de Rigidez. Diseño con RAP.

Datos	Probeta A1	Probeta A2	Probeta B1	Probeta B2
Método de Ensayo	Realizado en base a Norma UNE-EN 12697-26, Noviembre 2012. Anexo C			
Equipo de Ensayo	Máquina Servo Hidráulica Universal HYD25-II, Cooper Technology.			
Densidad Real [Kg/m ³]	2379	2379	2370	2370
Huecos de Aire [%]	3,96	3,96	4,32	4,32
Frecuencia o tiempo de carga [ms]	129,3	124,8	127	124,2
Deformación Horizontal [μm]	6,9	6,7	6,9	6,8
Deformación o desplazamiento [%]	0,0046	0,0045	0,0046	0,0046
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	8792	8885	8804	8643
Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]	8840	8925	8855	8741
Diferencia entre Módulos Medidos [%]	0,08	5,98	6,77	4,21
Diferencia entre Módulos Ajustado [%]	-0,81	4,76	5,86	4,33

4.2.1.2 Aceptación del Ensayo

A partir de los datos entregados, se puede considerar que el ensayo de Módulo de Rigidez es aceptado para ambos diseños, debido a que la diferencia porcentual entre los Módulos Medidos y Ajustados están dentro del rango permitido. Así mismo, las EETT del proyecto piden un valor mínimo del Módulo de Rigidez de 4.000[MPa], para la temperatura de 15[°C], valor que es superado por las cuatro probetas de ambos diseños.

Además, validando la teoría de que el RAP rigidiza la mezcla asfáltica debido a que su contenido de asfalto se encuentra envejecido, el valor del Módulo de Rigidez tanto como el Medido y Ajustado aumento en promedio porcentual un 35% al emplear RAP en el diseño.

4.2.2 Ensayo de Rueda de Hamburgo

Existen diferentes ensayos de laboratorio relacionados con el ahuellamiento, donde el ensayo de Rueda de Hamburgo corresponde a ensayos de rueda cargada, y se realiza según la normativa UNE-EN 12697-22², en el caso de dispositivo pequeño, procedimiento B en agua. Este ensayo mide la resistencia al ahuellamiento y la susceptibilidad a la humedad de las MAC.

El para el presente ensayo corresponde la elaboración de la preparación de 2 probetas por ensayo, obteniéndose de cada probeta 2 muestras hermanas, es decir, 4

muestras para ensayar, siendo 2 pares de muestras hermanas. Además, por normativa las probetas deben tener un Porcentaje de Huecos de Aire de $7\pm 1\%$.

Cada probeta, compactada mediante el compactador SGC, tiene un diámetro de 150[mm] y una altura que permita obtener dos muestras (140 [mm]), cada una de 62[mm] aproximadamente, con un mínimo de 60[mm] según la normativa. Se deben cortar las probetas asegurando que cada muestra tenga una cara lisa y perpendicular a su eje (Ver Figura 4-2). El equipo cuenta con dos brazos, cada uno con una rueda de carga. Cada par de muestras hermanas se monta en el equipo bajo uno de los brazos, como se muestra en la Figura 4-8, por lo que se debe procurar que ambas muestras hermanas tengan la misma altura, ya que al circular la rueda sobre estas no se produzca un salto que pueda alterar las mediciones o dañar el equipo.

El proceso de preparación de la mezcla y la compactación es similar al descrito anteriormente en la sección “3.2.2 Selección de la Estructura de Agregado de Diseño” del Capítulo “Trabajo en Laboratorio”.

Con respecto a la ejecución del ensayo, las probetas son elaboradas en el laboratorio LEMCO, casa central de la Universidad Técnica Federico Santa María, ciudad de Valparaíso, pero el ensayo de Rueda de Hamburgo se realiza en las dependencias de la sede San Joaquín, ciudad de Santiago, debido a que ahí se encuentra el equipo de ensayo. Por lo tanto, las probetas fueron trasladadas después de ser identificadas y embaladas en contenedor de una superficie plana y con tapa, según la normativa del ensayo.

El procedimiento de ensayo es el siguiente:

1. Elaboración de las 2 probetas de ensayo por medio del compactador SCG, con un Porcentaje de Huecos de Aire de $7\pm 1\%$.
2. Determinar las Densidad Real de cada probeta según ASTM D2726¹⁹.
3. Corte de las probetas, obteniendo 4 probetas. Se realiza un segundo corte a cada probeta requisito por la forma del equipo, obteniendo dos “ochos”. Ver Figura 4-6 y Figura 4-5.
4. Embalaje y traslado de las probetas a una temperatura no superior a los $25[^\circ\text{C}]$ y en posición horizontal.
5. Acondicionamiento de las probetas a las condiciones de ensayo.

6. Monta las probetas y se fijan en el conjunto de sujeción del equipo. La temperatura del baño de agua debe ser de $50 \pm 1 [^{\circ}\text{C}]$ y se deben acondicionar por un mínimo de 1 hora.
7. Enciende el ordenador y se inicia el software.
8. Se introducen los requisitos del proyecto, 20.000 pasadas (10.000 ciclos de carga) y una carga de 700[N].
9. Procede a operar el dispositivo, donde los primeros 5 ciclos de carga son de acondicionamiento de la probeta y durante estos ciclos no existe registro de deformación.

Se presentan las figuras del ensayo; Figura 4-6, Figura 4-5, Figura 4-8 y Figura 4-7:



Figura 4-6: Probetas hermanas después del corte.



Figura 4-5: Probetas hermanas después del corte.

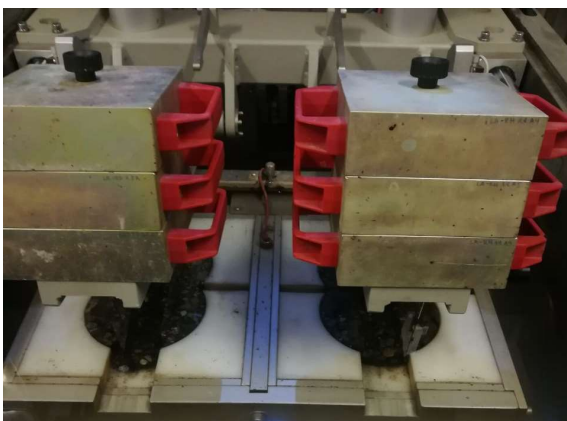


Figura 4-8: Probetas montadas y listas, Ensayo de Hamburgo.



Figura 4-7: Probetas hermanas después del Ensayo de Hamburgo.

4.2.2.1 Resultados del Ensayo

Según la normativa, se presentan los datos necesarios de cada probeta ensayada. Se presenta los resultados del ensayo para el Diseño Base en la Tabla 4-4 y para el Diseño con RAP en Tabla 4-5, descritas a continuación:

Tabla 4-4: Resultados del ensayo Rueda de Hamburgo, Diseño Base.

Dato	Probeta 1	Probeta 2
Método de Ensayo	UNE-EN 12697-22:2008+A1, Marzo 2008 ²	
Dispositivo y Procedimiento Utilizado	Dispositivo de tamaño pequeño, procedimiento B en agua, 20.000 pasadas, carga 700 [N]	
Temperatura del ensayo según especificación [°C]	50	
Espesor Medio de las Probetas [mm]	61,93	61,44
Densidad aparente de las Probetas [kg/m ³]	2325,0	2337,0
N° de Ciclos de falla de la probeta	20.000	20.000
Pendiente de deformación en pista para 10.000 ciclos de carga [mm]	0,064	0,05
Pendiente media de deformación en pista en agua a 10.000 ciclos de carga [mm]	0,057	
Porcentaje de la profundidad de la rodera en agua [%], según datos a 10.000 ciclos ^(a)	3,08	2,64
Porcentaje de la profundidad media de la rodera en agua [%] , según datos a 10.000 ciclos ^(a)	2,86	
Profundidad de la rodera en agua [mm], según datos a 10.000 ciclos.	1,87	1,66
Profundidad media de la rodera en agua [mm], según datos a 10.000 ciclos.	1,77	

Tabla 4-5: Resultado del ensayo de Rueda de Hamburgo, Diseño con RAP.

Dato	Probeta 1	Probeta 2
Método de Ensayo	UNE-EN 12697-22:2008+A1, Marzo 2008 ²	
Dispositivo y Procedimiento Utilizado	Dispositivo de tamaño pequeño, procedimiento B en agua, 20.000 pasadas, carga 700 [N]	
Temperatura del ensayo según especificación [°C]	50	
Espesor Medio de las Probetas [mm]	61,68	61,68
Densidad aparente de las Probetas [kg/m ³]	2323	2319
N° de Ciclos de falla de la probeta	20.000	20.000
Pendiente de deformación en pista para 10.000 ciclos de carga [mm]	0,042	0,05
Pendiente media de deformación en pista en agua a 10.000 ciclos de carga [mm]	0,046	
Porcentaje de la profundidad de la rodera en agua [%], según datos a 10.000 ciclos ^(a)	2,47	2,77
Porcentaje de la profundidad media de la rodera en agua [%] , según datos a 10.000 ciclos ^(a)	2,62	
Profundidad de la rodera en agua [mm], según datos a 10.000 ciclos.	1,29	1,49
Profundidad media de la rodera en agua [mm], según datos a 10.000 ciclos.	1,39	

4.2.2.2 Aceptación del Ensayo

A partir de los datos entregados, se puede considerar el ensayo de Rueda de Hamburgo aceptado según la normativa del ensayo para ambos diseños. La norma indica que se debe continuar el ensayo hasta que se apliquen 10.000 ciclos de carga, o hasta que la profundidad de la rodera sea de 20[mm], lo que ocurra antes. En ambos diseños, se aplicaron los 10.000 ciclos de carga o 20.000 pasadas y la profundidad de la rodera fue inferior a lo mencionado.

Además, validando la teoría de que el RAP rigidiza la mezcla asfáltica debido a que su contenido de asfalto se encuentra envejecido, el ahuellamiento disminuye en promedio porcentual un 21,5% en su deformación al emplear RAP en la mezcla.

5. CONCLUSIONES

5.1 GENERALES

Se realizó de forma detallada el procedimiento de diseño de MAC por medio de la metodología SUPERPAVE en su Primer Nivel para ambos diseños realizados (Base y RAP). El resultado de ambos diseños alcanzó los parámetros esperados de las EETT y criterios SUPERPAVE.

Primeramente, se realiza el Diseño Base para el Proyecto menciona anteriormente obteniendo una mezcla patrón que permitió ser de guía para realizar el Diseño con RAP. Se concluye el Diseño Base consiguiendo cumplir con todos los parámetros especificados del Proyecto, tanto para los materiales individuales como la combinación de ellos y por sobre todo la MAC final.

Para el Diseño con RAP, en base a los resultados, a los requisitos especificados y especialmente a los parámetros volumétricos, se determina el porcentaje óptimo de ligante asfáltico de un 5,4%, siendo este porcentaje el necesario para poder llegar a la premisa de la metodología SUPERPAVE del 4% de Vacíos de Aire. Además, la combinación de los agregados pétreos seleccionada fue; Gravilla $\frac{3}{4}$ 26%, Gravilla $\frac{1}{2}$ 24%, Polvo Roca 24% y RAP 25%.

Concluyendo el Diseño con RAP, se realiza el ensayo de Tracción Indirecta (TSR) el cual exige según SUPERPAVE una relación de resistencias del subgrupo acondicionado y el subgrupo seco de un mínimo de 80%. Los resultados obtenidos arrojan un 90,1%, siendo este porcentaje satisfactorio.

Finalmente, se emplean los ensayos de desempleo de Rueda de Hamburgo y Módulo de Rigidez para el Diseño con RAP, evaluando así el comportamiento de la mezcla a futuro. Para el ensayo de Rueda de Hamburgo los resultados son categóricos, las deformaciones permanentes medidas promedio son de 1,39[mm], siendo esta una deformación leve comparando con lo permitido de no superar 20[mm] a las 20.000 pasadas. El ensayo de Módulo de Rigidez también arroja un resultado positivo, siendo el promedio del Módulo de Rigidez Medido de 8.781[MPa] y para el Ajustado de 8.840 [MPa], resultados que superan el mínimo especificado de 4000[MPa].

5.2 ESPECÍFICAS

En relación con los materiales empleados, el asfalto virgen se clasifica según los ensayos de caracterización realizados, obteniendo un asfalto modificado con un grado de desempeño PG 76-28, cumpliendo cada uno de los parámetros especificados en el Proyecto, donde lo mínimo requerido es de PG 76-22. Los agregados pétreos correspondientes a Gravilla $\frac{3}{4}$, Gravilla $\frac{1}{2}$ y Polvo Roca, cumplen los parámetros de aceptación tanto de manera individual como la combinación de ellos, en los ensayos de Graduación y Propiedades de Consenso y de Origen. Además, en base a las Propiedades de Consenso fue posible cumplir la máxima capacidad de soporte antes las solicitaciones (ESAL's). Ambos diseños se realizaron hasta 30 millones de ESAL's, lo cual quedó limitado por el ensayo de Angularidad del Agregado Grueso.

La combinación de los agregados para el Diseño con RAP se selecciona en función de los parámetros volumétricos de las Mezclas de Prueba, seleccionando la combinación con los parámetros volumétricos (V_a , VAM, VFA y criterios de compactación) más semejantes al Diseño Base, debido al objetivo principal del diseño de homologar el Diseño Base.

En cuanto al RAP como agregado, se realizó los ensayos correspondientes para lograr su caracterización, específicamente su contenido de ligante y agregado, granulometría, graduación (Gravedades o Densidades), angularidad del agregado grueso y fino y partículas lajeadas. De las características mencionadas, todas son necesarias para poder llevar a cabo el diseño, pero la de mayor relevancia es su contenido de asfalto, donde el ensayo arrojó un 4,3% de ligante asfáltico y por ende un 95,7% de agregado pétreo. En base a lo mencionado, el 5,4% óptimo de ligante total obtenido para el Diseño con RAP se descompone en un 4,3% asfalto virgen y un 1,1% de RAP.

Para la elaboración de una MAC mediante la metodología SUPERPAVE sea adecuada, es fundamental realizar una correcta selección de los agregados pétreos, ligante asfáltico y el contenido de aire de esta; como también velar por el cumplimiento de los requerimientos de diseño para cada una de las pruebas de caracterización. Resulta fundamental hacer hincapié en esto, ya que es posible observar como varían las propiedades volumétricas de la mezcla tan sólo con modificar alguno de los parámetros; lo que implica a su vez, una variación en las propiedades mecánicas de ésta.

Con lo anterior y analizando los gráficos de las propiedades volumétricas de los dos diseños en conjunto (Gráfico 4-2, Gráfico 4-3, Gráfico 4-4 y Gráfico 4-5), se concluye que al emplear los mismos agregados vírgenes y una granulometría similar en ambos diseños, se genera que sus resultados de los Parámetros Volumétricos sean semejantes entre sí. La semejanza de los parámetros se observan en los gráficos mencionados.

En relación con la teoría de la rigidez de las MAC con RAP, que sostiene que el RAP al haber estado expuesto al oxígeno en su vida como pavimento en servicio, el ligante de este se encuentre ya envejecido, por ende, el ligante del RAP es más rígido que uno virgen y al considerarlo en la mezcla está resultaría más rígida que una sin RAP. La teoría se ve reflejada en los ensayos de desempeño realizados. Para el ensayo de Rigidez, tanto como el Módulo de Rigidez Medido y el Ajustado, aumenta en promedio porcentual un 35% al emplear RAP en el diseño. Asimismo, el ensayo de Rueda de Hamburgo disminuye el ahuellamiento en promedio porcentual un 21,5% al emplear RAP en la mezcla. Ambas diferencias son en relación con el Diseño Base.

A partir de lo anterior, se evidencia que las mezclas con RAP se esperan que sean más rígidas, por lo tanto, más resistentes a la deformación permanente. Sin embargo, teóricamente esta rigidez puede conducir a una disminución en la resistencia al agrietamiento por fatiga.

Al emplear el recurso RAP en una MAC se ven modificados varios pasos del procedimiento del diseño, pero la base de la metodología SUPERPAVE no cambia. Se habla de un beneficio económico y ambiental al reutilizar el RAP. Se genera el beneficio ambiental debido a que disminuye la explotación de los recursos naturales (áridos y el ligante asfáltico) y se reduce la cantidad de escombros de construcción que se dirigen a los vertederos. Por otro lado, el beneficio económico porque sustituye una parte de los materiales vírgenes. ¿Pero, cuánto se ahorra? Se hace un presupuesto tipo, donde los valores son entregados por una planta asfáltica de la ciudad, calculando los valores de precio unitario se realiza una estimación entre la mezcla del diseño del Proyecto y la del diseño con RAP, expuesta en las siguientes Tabla 5-1 y Tabla 5-2:

Tabla 5-1: Valores de los materiales de una MAC.

Material	P.U.[\$/M ³]	Diseño Proyecto	Diseño con RAP
Gravilla ¾"	9700	15[%]	26[%]
Gravilla ½"	9000	35[%]	24[%]
Polvo Roca	9000	50[%]	25[%]
RAP	13000	-	25[%]
[%] Ligante del Diseño	-	5,3[%]	5,4[%]
[%] Ligante Virgen	-	5,3[%]	4,33[%]

Tabla 5-2: Ahorro de una MAC con incorporación de RAP para 1[m³].

Material	Diseño Proyecto [\$]	Diseño con RAP [\$]
Áridos	8622	4918
Asfalto	1272	1038
RAP	0	3250
Total	9894	9206
[%] Ahorro	7,0	

Por lo anterior, se puede estimar un ahorro de un 7% por metro cúbico de MAC. No obstante, los valores empleados de los materiales son de venta al por menor, por lo tanto, hay que tener en cuenta que las plantas asfálticas generalmente poseen su propia planta de áridos y una compra al por mayor del ligante, debido a la cantidad de demanda diaria que poseen, pudiendo así reducir aún más este ahorro estimado.

6. REFERENCIAS

1. Asphalt Institute. MS-2 Asphalt Mix Design Methods. 7ta Ed. USA, 2014.
2. Asociación Española de Normalización y Certificación. Mezclas bituminosas, Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 22: Ensayo de rodadura. UNE-EN 12697-22: +A1 AENOR. Madrid, España. 2008.
3. Asociación Española de Normalización y Certificación. Mezclas Bituminosas, Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente, Parte 26: Rigidez, Anexo C: Ensayo de Tracción Indirecta sobre probetas cilíndricas. UNE-EN 12697-26 AENOR. Madrid, España. 2012.
4. ASTM. Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. ASTM designation D4867/D4867M. 2014.
5. LORCA Cortez, Víctor Manuel. Diseño volumétrico de una mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología superpave. Memoria (Constructor Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2016.
6. Warh Carlos. Apuntes del Curso Vialidad II. Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile. 2017.
7. Oil Malal. Ficha Técnica, Cemento Asfáltico modificado con Polímero. YAFU Elastomérico 60/80. Chile. 2017.
8. ASTM. Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. ASTM designation D 5821. 2013.
9. ASTM. Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). ASTM designation C1252. 2107.
10. ASTM. Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. ASTM designation D4791. 2010.
11. ASTM. Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. ASTM designation D2419. 2014.
12. ASTM. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM designation C131/131M. 2014.
13. ASTM. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. ASTM designation C88. 2013.

14. ASTM. Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates. ASTM designation C142/C142M. 2013.
15. ASTM. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM designation C136/136. 2014.
16. ASTM. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. C127. 2015.
17. ASTM. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM designation C128. 2015.
18. ASTM. Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. ASTM designation D2041. 2011.
19. ASTM. Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures. ASTM designation D2726/D2726M. 2017.
20. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras, Volumen 5. MC-V5. Chile. Edición 2017.
21. ASTM. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. ASTM designation D2172. 2017.
22. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot Mix Asphalt (HMA). AASHTO T 164. AASHTO, Washington, D.C. 2014.
23. ASTM. Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator. ASTM designation D5404/D5404M. 2012
24. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. Mechanical Analysis of Extracted Aggregate. AASHTO T 30. AASHTO, Washington, D.C. 2010.
25. ASTM. Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using Toluene and the Rotary Evaporator. ASTM designation D7906. 2014.
26. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. Standard Method of Test for Recovery of Asphalt Binder from Solution by Abson Method. AASHTO T 170. AASHTO, Washington, D.C. 2009.
27. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. Standard Method of Test for Quantitative Extraction and Recovery of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. AASHTO T 319. AASHTO, Washington, D.C. 2015.

28. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. AASHTO M 323. AASHTO, Washington, D.C. 2013.
29. ASTM. Standard Practice for Sampling Aggregates. ASTM designation D75/D75. 2014.
30. ASTM. Standard Practice for Sampling and the Amount of Testing of Hydraulic Cement. ASTM designation C183. 2016.
31. ASTM. Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. ASTM designation C702/C702M. 2003.
32. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras, Volumen 8. MC-V8. Chile. Edición 2017.
33. ASTM. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM designation D4318. 2017.
34. Manual of operation and instruction Model 5850 Gyratory Compactor, Troxler Electronic Laboratories, Inc. USA.
35. Laboratorio Nacional de Vialidad. Mezcla Asfáltica en Caliente con Pavimento Asfáltico Recuperado RAP. Marzo 2016.
36. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Project 9-12: Incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave System. Octubre 2000.

A. ANEXOS

“Ensayo de Modulo de Rigidez, Pulsos de Carga del Ensayo para el Diseño del Proyecto”

A.1. Probeta A1:

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

Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

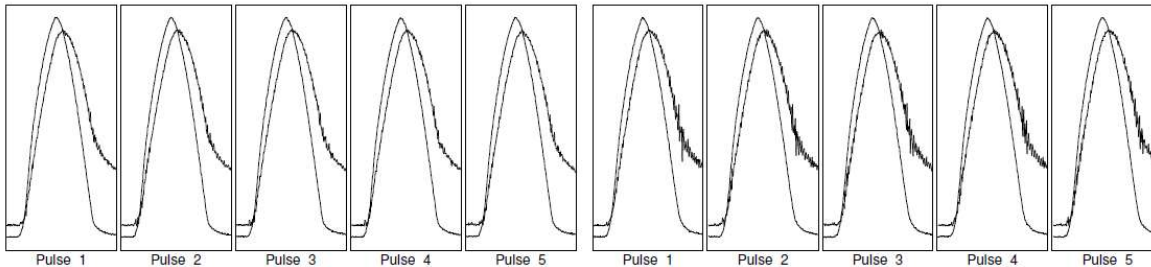
Date of print-out: 09:11:2017
Test carried out by: Rodrigo Verdugo
Specimen reference: Specimen 1 de 2 a 15 grados
Test temperature: 15 °C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 69,5 mm
Bulk density: 2396(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

Date & time of test :	09:nov:2017 08:16	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26-2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
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)		4,86	4,87	4,86
Horizontal stress (kPa)		296,7	297,5	297,1
Load-area factor	0,60	0,62	0,62	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	6,9	6,9
Load (rise) time (ms):	124	121,0	124,0	122,8
Measured stiffness modulus (MPa)		6248	6304	6282
Adjusted stiffness modulus (MPa)		6331	6382	6364

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		4,93	4,95	4,94
Horizontal stress (kPa)		301,0	302,6	301,9
Load-area factor	0,60	0,60	0,61	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,0	7,1	7,0
Load (rise) time (ms):	124	120,0	123,0	120,6
Measured stiffness modulus (MPa)		6241	6319	6283
Adjusted stiffness modulus (MPa)		6272	6359	6312

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms):	: 121,7
Horizontal deformation (µm)	: 7,0
Horizontal deformation (%)	: 0,0046
Measured stiffness modulus (MPa)	: 6283
Adjusted stiffness modulus (MPa)	: 6338

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (0,8)

Person responsible for this test report	LEMCO	Date of issue of report	09:11:2017
---	-------	-------------------------	------------

A.2. Probeta A2:

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

Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

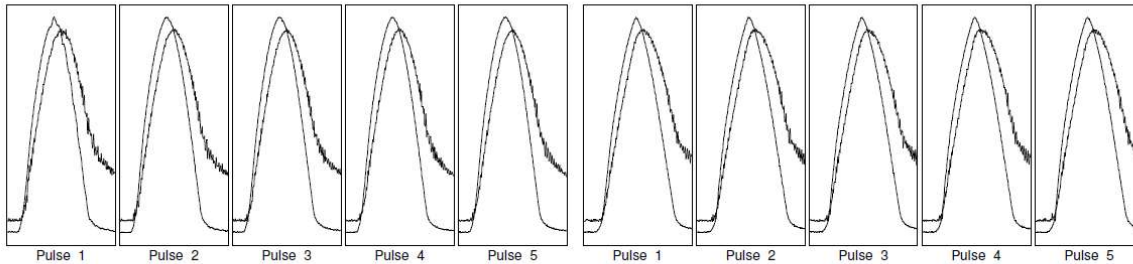
Date of print-out: 08:11:2017
Test carried out by: Operator
Specimen reference: R1_2_15
Test temperature: 15 °C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 66,3 mm
Bulk density: 2396(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

Date & time of test :	08:nov:2017 11:01	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26-2012
Method of compaction	patrón
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)		4,68	4,72	4,69
Horizontal stress (kPa)		299,4	302,3	300,2
Load-area factor	0,60	0,61	0,63	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,7	6,8	6,8
Load (rise) time (ms):	124	120,0	123,0	122,4
Measured stiffness modulus (MPa)		6432	6531	6470
Adjusted stiffness modulus (MPa)		6492	6647	6543

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		4,46	4,47	4,46
Horizontal stress (kPa)		285,2	286,0	285,6
Load-area factor	0,60	0,61	0,62	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,1	7,2	7,1
Load (rise) time (ms):	124	123,0	129,0	124,8
Measured stiffness modulus (MPa)		5817	5905	5868
Adjusted stiffness modulus (MPa)		5885	5962	5913

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	123,6
Horizontal deformation (µm) :	6,9
Horizontal deformation (%) :	0,0046
Measured stiffness modulus (MPa) :	6169
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	6228

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (10)

Person responsible for this test report	LEMCO	Date of issue of report	08:11:2017
---	-------	-------------------------	------------

A.3. Probeta B1:

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

Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

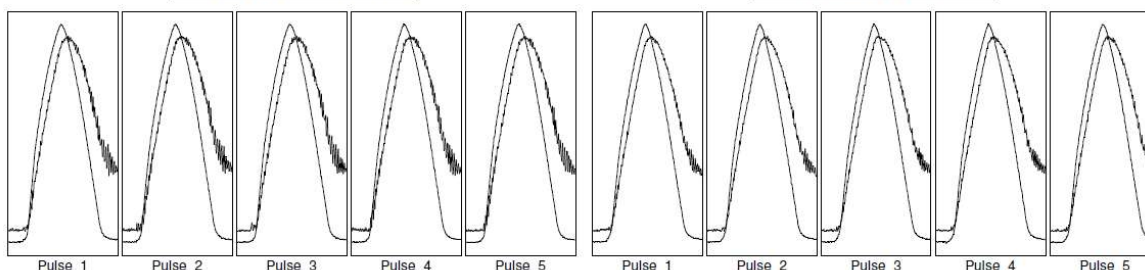
Date of print-out: 08:11:2017
Test carried out by: Operator
Specimen reference: R2_3_15
Test temperature: 15°C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65,6 mm
Bulk density: 2401(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

Date & time of test :	08:nov:2017 13:13	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26-2012
Method of compaction	patrón
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)		4,54	4,56	4,55
Horizontal stress (kPa)		293,7	295,0	294,3
Load-area factor	0,60	0,62	0,63	0,63
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,8	6,9	6,9
Load (rise) time (ms):	124	123,0	126,0	124,8
Measured stiffness modulus (MPa)		6211	6303	6261
Adjusted stiffness modulus (MPa)		6296	6407	6359

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		4,75	4,76	4,76
Horizontal stress (kPa)		307,5	308,2	307,9
Load-area factor	0,60	0,60	0,61	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	7,0	7,0
Load (rise) time (ms):	124	123,0	128,0	125,6
Measured stiffness modulus (MPa)		6398	6494	6448
Adjusted stiffness modulus (MPa)		6392	6533	6469

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	125,2
Horizontal deformation (µm) :	6,9
Horizontal deformation (%) :	0,0046
Measured stiffness modulus (MPa) :	6355
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	6414

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (-1,715)

Person responsible for this test report	LEMCO	Date of issue of report	08:11:2017
---	-------	-------------------------	------------

A.4. Probeta B2:

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

Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

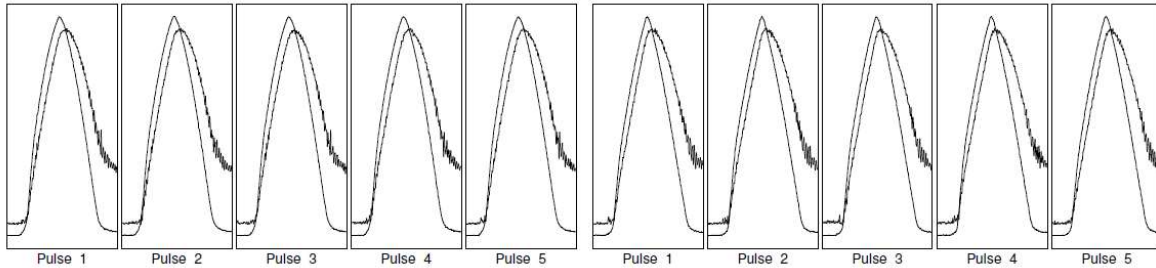
Date of print-out: 08:11:2017
Test carried out by: Operator
Specimen reference: R2_4_15
Test temperature: 15°C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 70,3 mm
Bulk density: 2401 (kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

Date & time of test :	08:nov:2017 13:59	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26-2012
Method of compaction	patrón
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)		5,65	5,66	5,66
Horizontal stress (kPa)		341,2	341,8	341,6
Load-area factor	0,60	0,62	0,63	0,63
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,0	7,1	7,1
Load (rise) time (ms):	124	119,0	123,0	122,2
Measured stiffness modulus (MPa)		6994	7139	7061
Adjusted stiffness modulus (MPa)		7086	7263	7188

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		5,74	5,76	5,75
Horizontal stress (kPa)		346,7	347,8	347,1
Load-area factor	0,60	0,60	0,62	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	7,1	7,0
Load (rise) time (ms):	124	122,0	126,0	123,6
Measured stiffness modulus (MPa)		7127	7333	7221
Adjusted stiffness modulus (MPa)		7142	7379	7264

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	122,9
Horizontal deformation (µm) :	7,0
Horizontal deformation (%) :	0,0047
Measured stiffness modulus (MPa) :	7141
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	7226

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (-1,052)

Person responsible for this test report	LEMCO	Date of issue of report	08:11:2017
---	-------	-------------------------	------------

B. ANEXOS

“Ensayo de Modulo de Rigidez, Pulsos de Carga del Ensayo para el Diseño con RAP”

B.1. Probeta A1:

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R11

Address of testing laboratory

Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

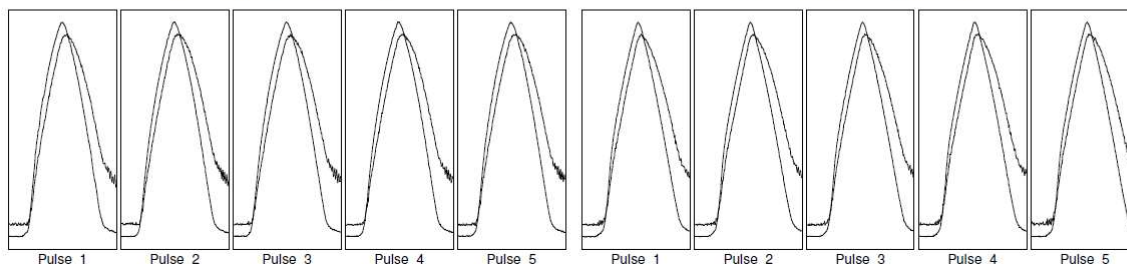
Date of print-out: 26:04:2018
Test carried out by: AZM
Specimen reference: R11
Test temperature: 15°C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65,6 mm
Bulk density: 2379(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

Date & time of test :	26:abr:2018 08:34	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	Diseño Superpave 25% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26:2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
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)		6,44	6,47	6,45
Horizontal stress (kPa)		416,5	418,3	417,4
Load-area factor	0,60	0,61	0,63	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	7,0	6,9
Load (rise) time (ms):	124	129,0	132,0	130,8
Measured stiffness modulus (MPa)		8737	8838	8788
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8832	8970	8875

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,40	6,42	6,42
Horizontal stress (kPa)		414,2	415,6	415,1
Load-area factor	0,60	0,60	0,61	0,60
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,8	7,0	6,9
Load (rise) time (ms):	124	126,0	129,0	127,8
Measured stiffness modulus (MPa)		8669	8870	8795
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8663	8899	8804

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	129,3
Horizontal deformation (µm) :	6,9
Horizontal deformation (%) :	0,0046
Measured stiffness modulus (MPa) :	8792
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	8840

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (0,8)

Person responsible for this test report	LEMCO	Date of issue of report	26:04:2018
---	-------	-------------------------	------------

B.2. Probeta A2:

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R12

Address of testing laboratory

Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

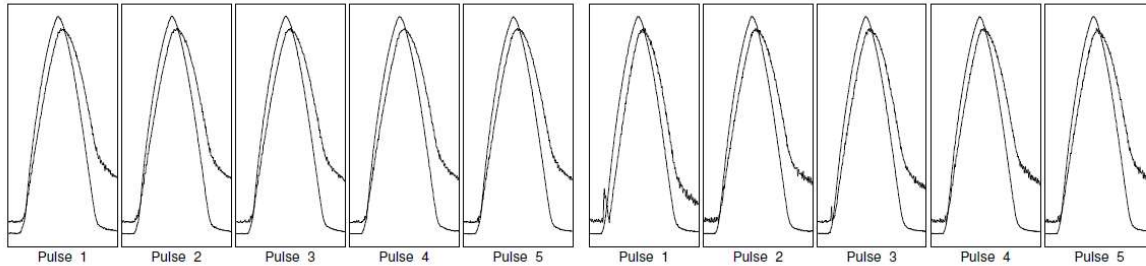
Date of print-out: 26:04:2018
Test carried out by: AZM
Specimen reference: R12
Test temperature: 15 °C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65,6 mm
Bulk density: 2379(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

Date & time of test :	26:abr:2018 09:46	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 25% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26-2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
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)		6,23	6,25	6,24
Horizontal stress (kPa)		403,1	404,5	403,6
Load-area factor	0,60	0,61	0,62	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,8	6,9	6,8
Load (rise) time (ms):	124	123,0	126,0	125,0
Measured stiffness modulus (MPa)		8575	8689	8611
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8650	8801	8707

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,41	6,43	6,43
Horizontal stress (kPa)		414,5	416,3	415,7
Load-area factor	0,60	0,59	0,61	0,60
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,0	7,0	6,6
Load (rise) time (ms):	124	123,0	126,0	124,6
Measured stiffness modulus (MPa)		8734	10137	9159
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8680	10055	9142

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	124,8
Horizontal deformation (µm) :	6,7
Horizontal deformation (%) :	0,0045
Measured stiffness modulus (MPa) :	8885
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	8925

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (-4,874)

Person responsible for this test report	LEMCO	Date of issue of report	26:04:2018
---	-------	-------------------------	------------

B.3. Probeta B1:

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R21

Address of testing laboratory

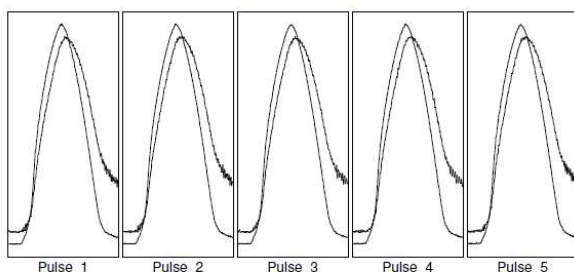
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

Date of print-out: 26:04:2018
Test carried out by: AZM
Specimen reference: R21
Test temperature: 15°C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65,6 mm
Bulk density: 2370(kg/m³)
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

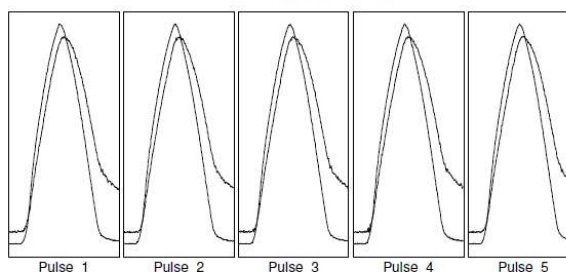
Date & time of test :	26:abr:2018 13:50	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 25% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26-2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
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)		6,33	6,34	6,34
Horizontal stress (kPa)		409,4	410,5	409,9
Load-area factor	0,60	0,61	0,62	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,0	7,1	7,1
Load (rise) time (ms):	124	124,0	129,0	126,0
Measured stiffness modulus (MPa)		8426	8545	8495
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8545	8629	8587

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,53	6,56	6,54
Horizontal stress (kPa)		422,7	424,2	423,3
Load-area factor	0,60	0,60	0,61	0,60
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,7	6,9	6,8
Load (rise) time (ms):	124	125,0	129,0	128,0
Measured stiffness modulus (MPa)		8982	9235	9112
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8958	9294	9122

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	127,0
Horizontal deformation (µm) :	6,9
Horizontal deformation (%) :	0,0046
Measured stiffness modulus (MPa) :	8804
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	8855

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (-6,042)

Person responsible for this test report	LEMCO	Date of issue of report	26:04:2018
---	-------	-------------------------	------------

B.4. Probeta B2:

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R22

Address of testing laboratory

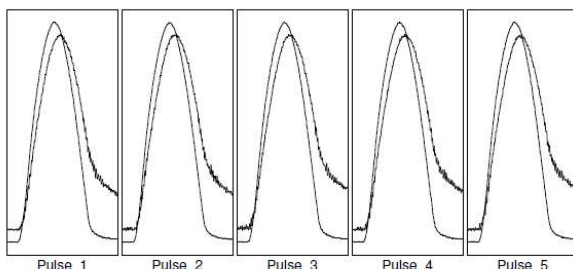
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

Date of print-out: 26:04:2018
Test carried out by: AZM
Specimen reference: R22
Test temperature: 15 °C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65,6 mm
Bulk density: 2370(kg/m³)
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

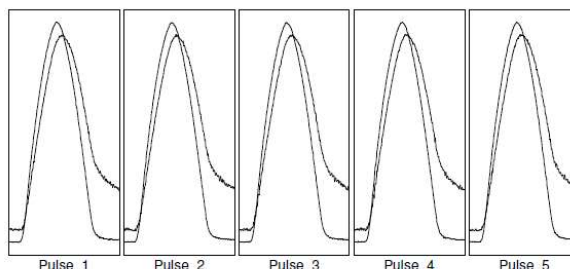
Date & time of test :	26:abr:2018 14:38	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 25% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26-2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
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)	6,21	6,22	6,21	
Horizontal stress (kPa)	401,7	402,5	402,0	
Load-area factor	0,60	0,61	0,63	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,8	7,1	6,9
Load (rise) time (ms):	124	120,0	125,0	122,6
Measured stiffness modulus (MPa)	8305	8635	8457	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	8374	8706	8547	

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	6,29	6,32	6,30	
Horizontal stress (kPa)	406,7	409,2	407,8	
Load-area factor	0,60	0,61	0,63	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,7	6,8	6,7
Load (rise) time (ms):	124	125,0	127,0	125,8
Measured stiffness modulus (MPa)	8787	8895	8829	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	8865	9034	8934	

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	124,2
Horizontal deformation (µm) :	6,8
Horizontal deformation (%) :	0,0046
Measured stiffness modulus (MPa) :	8643
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	8741

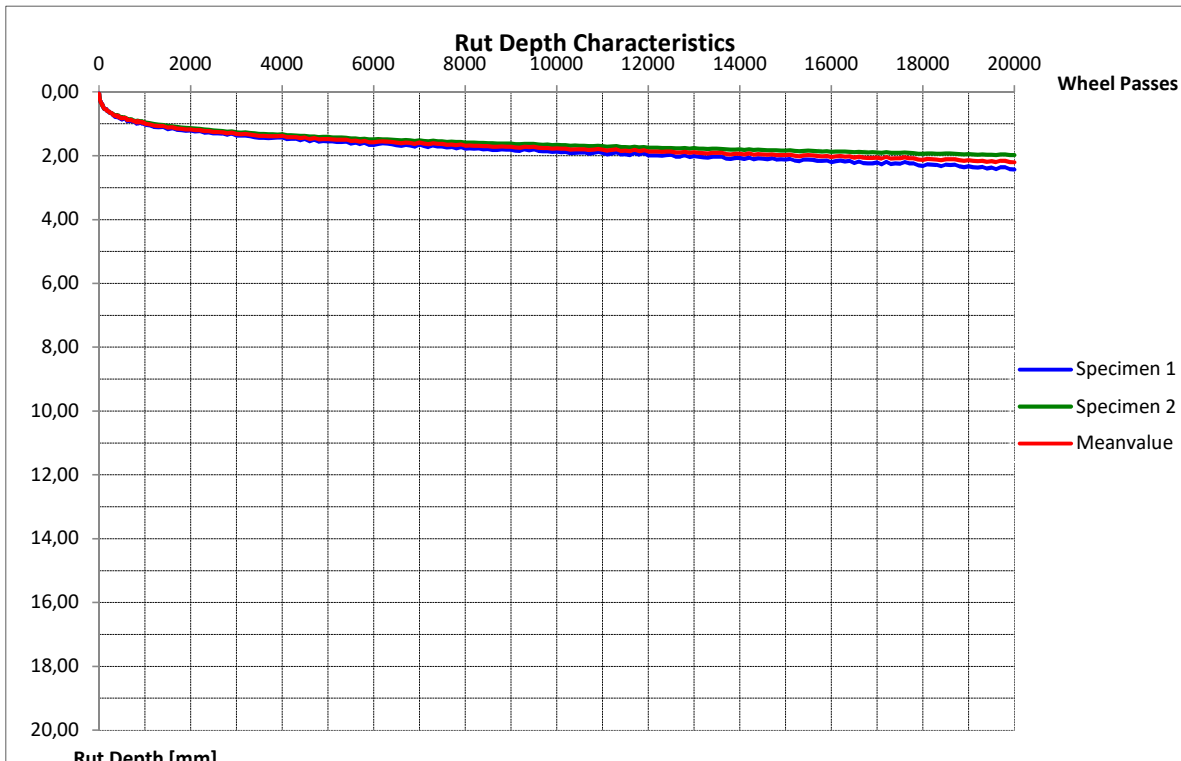
Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (-4,428)

Person responsible for this test report	LEMCO	Date of issue of report	26:04:2018
---	-------	-------------------------	------------

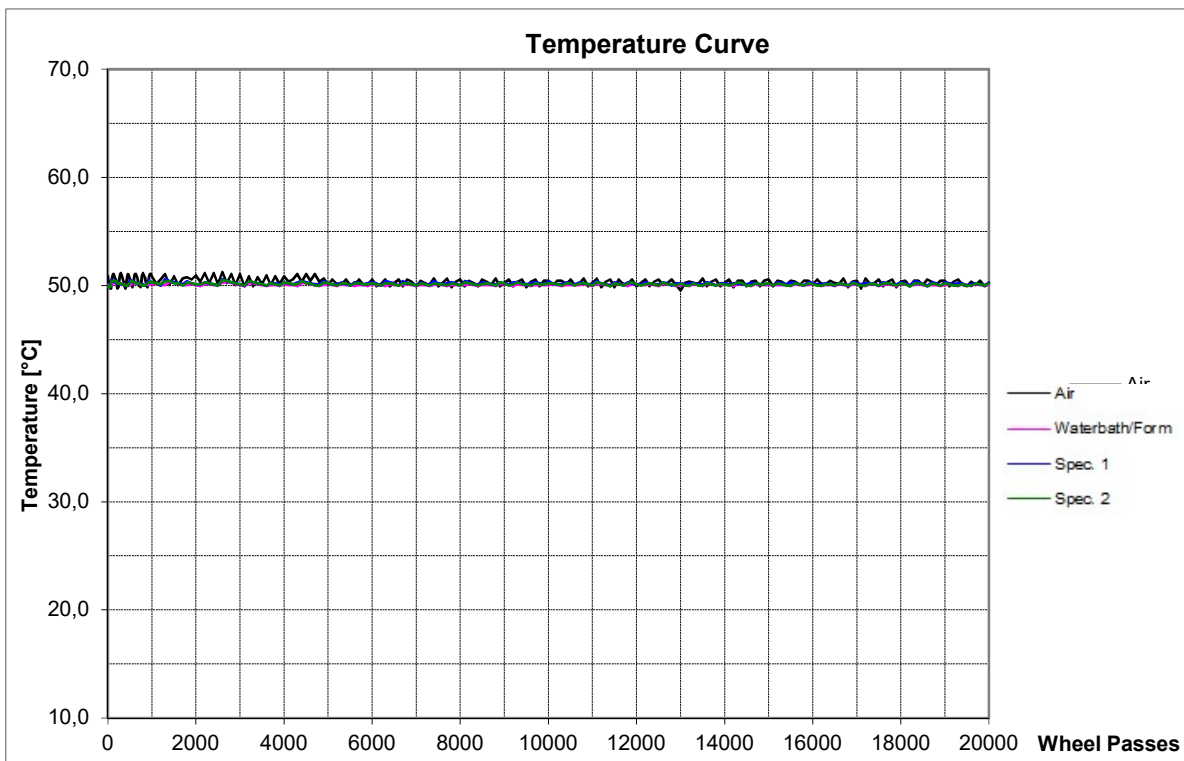
C. ANEXOS

“Resultados del Ensayo de Rueda de Hamburgo, diseño del Proyecto”

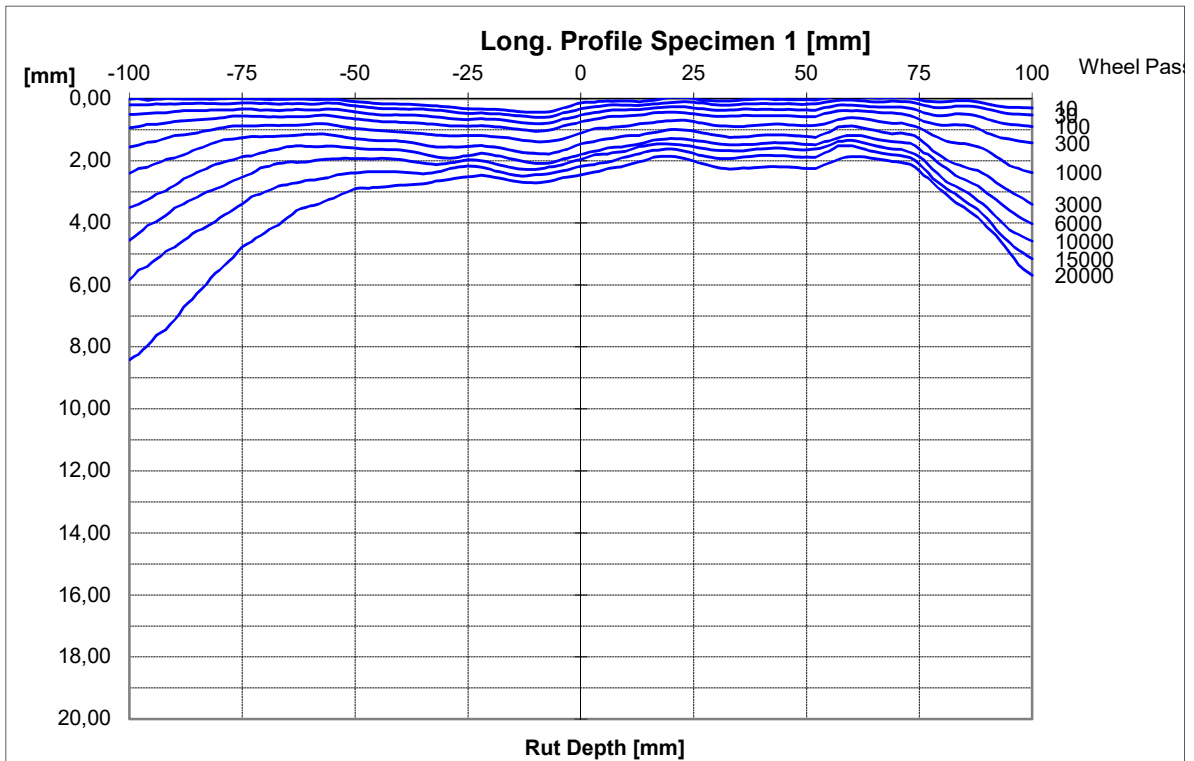
C.1. Gráfico Profundidad de la Huella v/s N° de Pasadas:



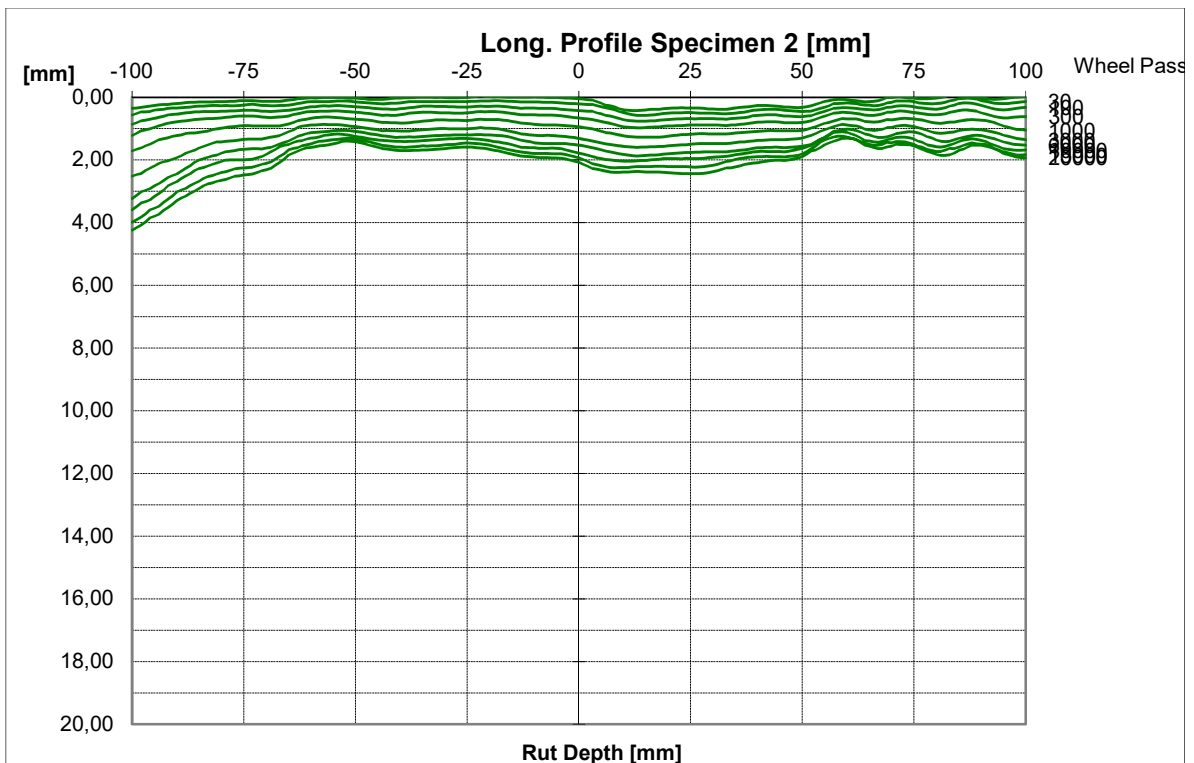
C.2. Curva de Temperatura:



C.3. Perfil Longitudinal de la Probeta 1, [mm]:



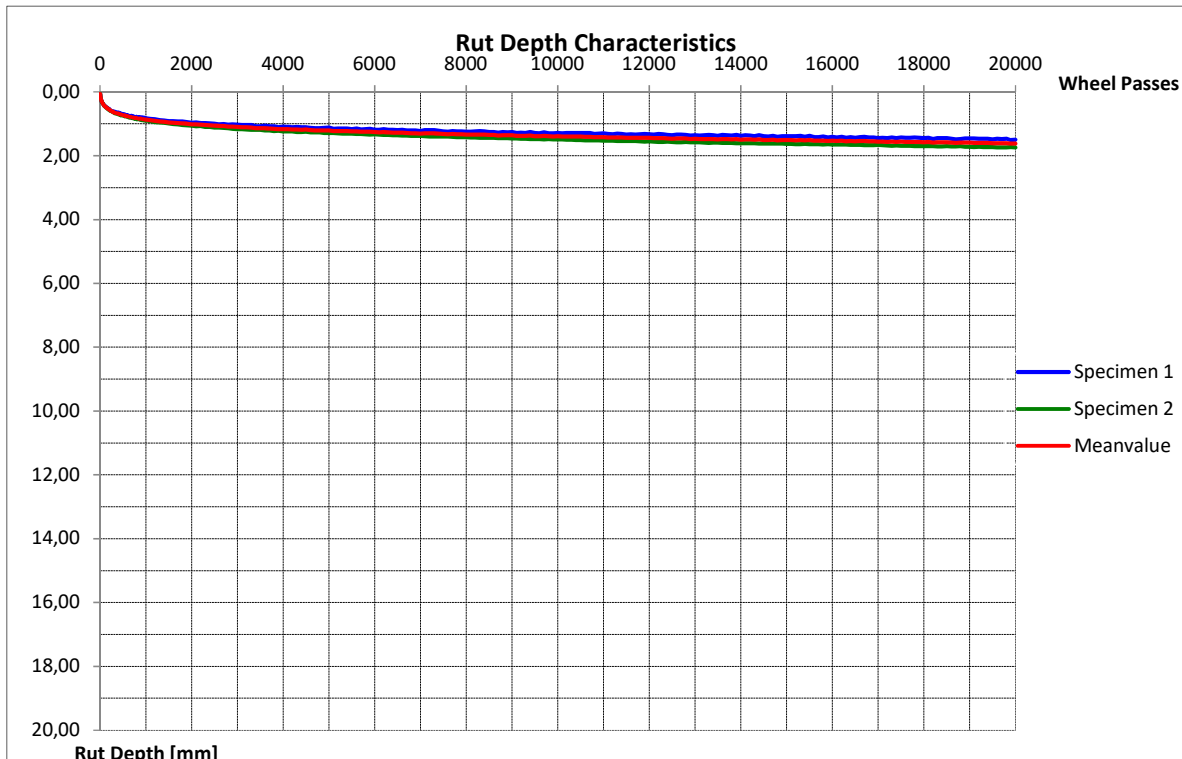
C.4. Perfil Longitudinal de la Probeta 2, [mm]:



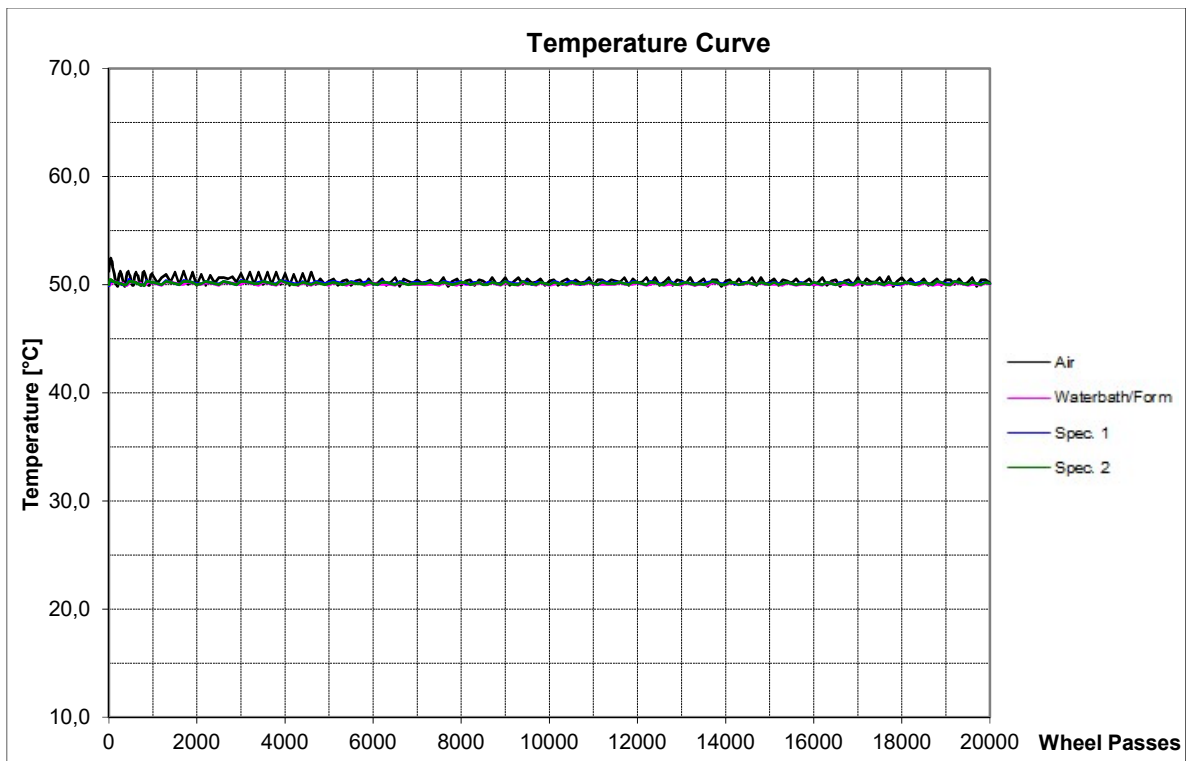
D. ANEXOS

“Resultados del Ensayo de Rueda de Hamburgo, diseño con RAP”

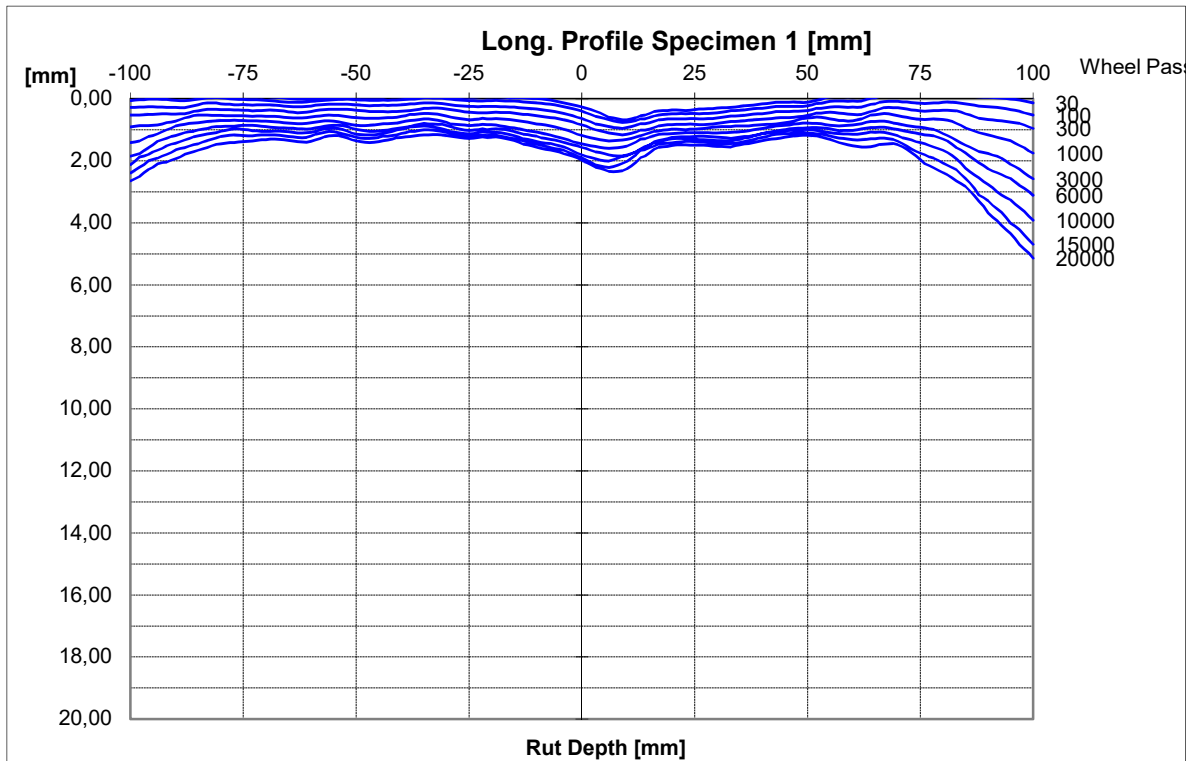
D.1. Gráfico Profundidad de la Huella v/s N° de Pasadas:



D.2. Curva de Temperatura:



D.3. Perfil Longitudinal de la Probeta 1, [mm]:



D.4. Perfil Longitudinal de la Probeta 2, [mm]:

