UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE INCORPORANDO 15% DE RAP MEDIANTE METODOLOGÍA SUPERPAVE.

Memoria de titulación presentada por:

Sebastián Felipe Contreras Galleguillos

Como requisito para optar al título de:

Constructor Civil

Profesor guía:

Carlos Wahr Daniel

VALPARAÍSO, CHILE

JUNIO 2018

DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE INCORPORANDO 15% DE RAP MEDIANTE METODOLOGÍA SUPERPAVE

RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del Proyecto “Conservación Mayor pista 17R/35L Aeropuerto Arturo Merino Benítez Año 2017-2018”, la Dirección de Aeropuertos (DAP); perteneciente al Ministerio de Obras Públicas(MOP), ha decidido especificar el sistema SUPERPAVE (**SU**perior **PER**forming Asphalt **PAVE**ment) para el diseño volumétrico de una mezcla asfáltica en caliente (MAC). Éste diseño de mezcla fue realizado por el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obra (LEMCO) de la Universidad Técnica Federico Santa María.

El RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) es un componente importante en las mezclas asfálticas, puesto que al estar constituido por los mismos componentes que las MAC vírgenes (agregado y ligante asfáltico), pueden ser incorporados fácilmente en la generación de nuevas mezclas. Además, a lo largo de los años, ha sido usado exitosamente en muchos proyectos de Estados Unidos, proporcionando ahorros económicos y beneficios medioambientales.

El principal objetivo de esta memoria fue diseñar la misma MAC utilizada en el proyecto de Aeropuerto incorporando un 15 % de RAP en la mezcla. Además de lo anterior, es necesario verificar que la MAC cumpla con los requerimientos SUPERPAVE para los parámetros volumétricos y las Especificaciones Técnicas (EE.TT) del proyecto. Finalmente, medir el ahuellamiento y el módulo de rigidez en ambos diseños de mezcla con el fin de comparar resultados.

Para lograr los objetivos, fue necesario seguir paso a paso los procedimientos indicados en el capítulo 11 del manual “MS-2 Asphalt Mix Design Methods, 7th Edition”, además de las normas ASTM y AASHTO referenciadas en él.

De manera general, los resultados muestran que fue posible diseñar una mezcla SUPERPAVE incorporando un 15% de RAP, considerando como mezcla base o patrón la diseñada para el proyecto de Aeropuerto. En cuanto a los ensayos de caracterización, se verifica que al incorporar un 15% de RAP en las MAC SUPERPAVE, disminuye el potencial ahuellamiento y se incrementa la rigidez en comparación a la mezcla base.

Los resultados obtenidos indicaron que el ensayo de tensión indirecta no es el mejor para evaluar el módulo de rigidez, puesto que sólo evalúa la deformación en el rango lineal de la mezcla asfáltica.

Finalmente, para futuros estudios, se recomienda seguir incrementando el contenido de RAP y evaluar el desempeño completo de las mezclas de diseño agregando los ensayos de Módulo Dinámico, Flow Number y Fatiga.

DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE INCORPORANDO 15% DE RAP MEDIANTE METODOLOGÍA SUPERPAVE

ABSTRACT

As part of project called “Arturo Merino Benítez Airport runway conservation, 2017-2018”, the Airports Department; from the Ministry of Public Works (MOP); has decided to specify the SUPERPAVE (**SU**perior **PER**forming Asphalt **PAVE**ment) System for the volumetric design of a Hot Mix Asphalt (HMA). This mix design was made to Materials Testing and works Control Laboratory (LEMCO) of the Universidad Técnica Federico Santa Maria.

The RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) is a valuable component in HMA. Since RAP consists of the same components as virgin HMA, (aggregate and asphalt binder), it can readily be incorporated into a new mixture. Over the years, it has been used successfully to provide economic savings and environmental benefits for many projects in the United States.

The main objective of this report was to design the same HMA utilized in the airport’s project, but adding a 15 percent of RAP in the mix. In addition, another goal was to verify that HMA meet the Superpave requirements for the parameters volumetric and technical specifications of the Airport’s Project. Finally, it was important to measure the rutting and stiffness modulus in both design mixes in order to compare the results.

To achieve these objectives, it was necessary to follow step-by-step the procedures indicated in the chapter 11 of the Manual “MS-2 Asphalt Mix Design Methods, 7th Edition”, in addition to the ASTM and AASHTO standards referenced in this manual.

In general, the results show that it was possible to design a Superpave Mix adding a 15 percent of RAP, considering the Airport’s design like a standard mixture. In respect of the results of the characterization test of the HMA, show that in the HMA with RAP the rutting potential decreases and the stiffness increases, regarding the HMA virgin.

The obtained results indicate that the Indirect Tensile test is not the best test to evaluate the stiffness modulus because it only evaluates the strain in the lineal range of the HMA.

Finally, for further studies, it is recommended to keep increasing the RAP content and to evaluate the complete performance of the design mixes considering the Dynamic Modulus, Flow Number and Fatigue tests.

GLOSARIO

AASHTO	:	American Asociation of State Highway and Transportantion Officials.
ASTM	:	American Society for Testing Materials.
BBR	:	Bendind Beam Rheometer (Reómetro de viga de flexión).
DP		Dust Proportion.
DSR	:	Dynamic Shear Rheometer (Reómetro de corte dinámico).
DTT	:	Direct Tension Test (ensayo de tracción directa).
ESALs	:	Equivalent Single Axles Loads (Ejes Simples Equivalentes Cargados).
ETE		Especificaciones Técnicas Especiales.
EAPA		European Association Asphalt Pavement.
FRAP		Fractionated Reclaimed Asphalt Pavement
HMA		Hot Mix Asphalt.(Mezcla asfáltica en caliente)
IDT	:	Indirect Tensile Tester (Ensayo de tracción indirecta).
in	:	Inch (pulgada).
KPa	:	Kilopascal.
LEMCO	:	Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras.
MAC		Mezclas Asfálticas en Caliente
M.C	:	Manual de Carreteras.
MMT	:	Millones de Toneladas.
mm	:	Milímetros.
MPa	:	Megapascal.
ms	:	Milisegundo.
NAPA		National Association Asphlat Pavement.
NMAS	:	Nominal Maximum Aggregate Size (Tamaño máximo nominal del agregado).
PAV	:	Pressure Aging Vessel (Equipo a presión).
PG	:	Performance Grade.
RAP		Reclaimed Asphalt Pavement
RTFO	:	Rolling Thin Film Oven (Horno de película delgada rotativa).
RV	:	Rotational Viscometer (Viscosímetro rotacional).
s	:	Segundos.
SGC	:	Compactador Giratorio Superpave.
SHRP	:	Strategic Highway Research Program.
SST	:	Superpave Shear Tester (ensayo de corte Superpave).
SUPERPAVE		Superior Performing Asphalt Pavement.
TSR	:	Ensayo de Tracción Indirecta.
UNE	:	Norma Española.
Va	:	Vacíos de aire.
VAF	:	Vacíos llenos de Asfalto.
VAM	:	Vacíos en el Agregado Mineral.
RPBR	:	RAP Pavement Binder Ratio.

DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE INCORPORANDO 15% DE RAP MEDIANTE METODOLOGÍA SUPERPAVE

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN....1

1.1 ANTECEDENTES GENERALES....1

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO....2

1.2.1 Objetivos Generales....2

1.2.2 Objetivos específicos. 2

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO....3

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO....4

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA....5

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. 6

2.1 PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO. 6

2.1.1 Introducción....6

2.1.2 Desempeño de Mezclas asfálticas con RAP. 12

2.1.3 Metodología Aplicada....19

3 TRABAJO EN LABORATORIO. 24

3.1 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES. 24

3.1.1 Ligante Asfáltico. 24

3.1.2 Agregado Pétreo. 26

3.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL AGREGADO....34

3.2.1 Selección de las granulometrías de Prueba. 34

3.2.2 Contenido de asfalto de prueba. 37

3.2.3 Contenido de Asfalto en el RAP. 38

3.2.4 Elaboración de especímenes. 39

3.2.5 Pruebas fundamentales de la mezcla asfáltica. 42

3.2.6 Densificación de las mezclas de prueba. 47

3.2.7 Parámetros volumétricos de las mezclas de prueba compactadas....51

3.3 SELECCIÓN DEL CONTENIDO DE ASFALTO DE DISEÑO. 56

3.3.1 Parámetros volumétricos para la mezcla base y con 15% de RAP....61

3.4 SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD 65

3.5 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA. 68

3.5.1 Ensayo de rueda cargada de Hamburgo. 68

3.5.2 Ensayo de Módulo de Rigidez....70

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS. 73
4.1 DISEÑO VOLUMÉTRICO....73
4.1.1 Suceptibilidad a la humedad. 74
4.2 ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO. 74
4.3 MÓDULO DE RIGIDEZ. 75
5 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES 78
6 REFERENCIAS 81
7 ANEXOS. 83
7.1 ANEXO A. 83
7.2 ANEXO B. 87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Granulometría y tipo de asfalto. [6]....11
Tabla 2-2: Parámetros de la mezcla de diseño. [6]....12
Tabla 2-3: Agrietamiento de Mezclas con RAP en pistas de Prueba en 2006. [7]....13
Tabla 2-4: Grado del ligante asfáltico virgen para mezclas con Rap [13] 22
Tabla 3-1: Resultados de las pruebas realizadas al ligante asfáltico y el criterio de aceptibilidad. 25
Tabla 3-2: Granulometría de los Agregados. 26
Tabla 3-3: Gravedad Específica Bruta y Aparente para cada acopio de Agregados 27
Tabla 3-4: Resultados para las Propiedades de Consenso. 31
Tabla 3-5: Resultados para las Propiedades de Consenso. 33
Tabla 3-6: Porcentaje utilizado para cada acopio. 34
Tabla 3-7: Propiedades de las mezclas de prueba ponderando los valores de cada pila de acopio. 36
Tabla 3-8: Resultados de Parámetros para Contenido de Asfalto de Prueba 38
Tabla 3-9: Resultados de Densificación de mezclas de prueba sin Rap. 48
Tabla 3-10: Resultados de Densificación de mezclas de prueba con 15% de Rap. 49
Tabla 3-11: Resultados para Densidades Máximas de mezclas vírgenes. 49
Tabla 3-12: Resultados para Densidades Máximas de mezclas con 15% de RAP. 50
Tabla 3-13: Propiedades volumétricas de las mezclas de prueba vírgenes. 52
Tabla 3-14: Propiedades volumétricas de las mezclas de prueba con 15% de RAP 52
Tabla 3-15: Propiedades volumétricas corregidas para las MAC vírgenes. 54
Tabla 3-16: Propiedades volumétricas corregidas para las MAC con 15% de RAP. 55

Tabla 3-17: Densificación de la mezcla de diseño virgen. 57

Tabla 3-18: Densificación de mezclas de diseño con 15% de RAP. 57

Tabla 3-19: Resultados para las Densidades Máximas de las mezclas de diseño virgen. 58

Tabla 3-20: Resultados para las Densidades Máximas de las mezclas de diseño con 15% de RAP 58

Tabla 3-21: Resumen de parámetros volumétricos para la mezcla de diseño. 60

Tabla 3-22: Resumen de parámetros volumétricos para la mezcla de diseño con 15% de RAP. 60

Tabla 3-23: Resultados para el ensayo de susceptibilidad a la humedad 67

Tabla 4-1: Propiedades volumétricas para las mezclas de diseño. 73

Tabla 4-2: Variación porcentual para promedio de esfuerzos. 74

Tabla 5-1: Precios Unitarios para cada Material y los Porcentajes utilizados en cada mezcla. 76

Tabla 5-2: Economía de Ahorro para las mezclas con 15% de RAP.....77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Toneladas de RAP usadas por cada sector de la industria. [2] 8

Figura 2-2: Evolución del promedio de porcentaje de RAP utilizado en cada Estado. [2] 9

Figura 2-3: Evolución de la cantidad de Estados que trabajan diferentes porcentajes de RAP durante los años 2009-2016. [2].....10

Figura 2-4: Influencia en los cambios de la temperatura alta sobre el largo de las grietas para mezclas con 45% de RAP. [7] 13

Figura 2-5: Efecto del cambio de Grado del ligante asfáltico en la profundidad de la huella para mezclas con 30% de RAP. [8] 14

Figura 2-6: Efecto del aumento del RAP en la profundidad de la huella. [8].....14

Figura 2-7: Efecto del cambio de Grado del ligante asfáltico en la profundidad de la huella para mezclas con 50% de RAP. [8] 15

Figura 2-8: Efecto del cambio de Grado del ligante asfáltico en la profundidad de la huella para mezclas con 40% de RAP. [8] 15

Figura 2-9: Módulo de rigidez a 20[°C] en función del contenido de ligante asfáltico. [9] 16

Figura 2-10: Resultados para el ensayo de rueda de carga a 60[°C] [9]. 16

Figura 2-11: Resultados para susceptibilidad a la humedad para mezclas de New Hampshire. [10].....17

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1: Resultados para el Módulo de Rigidez para capas intermedias. [11] 18

Gráfico 2-2: Resultados para el Módulo de Rigidez para capas de rodadura. [11].....19

Gráfico 3-1: Granulometría de cada acopio de agregados. 27

Gráfico 3-2: Granulometrías de prueba para las MAC vírgenes. 35

Gráfico 3-3: Granulometrías de prueba para las MAC con 15% de RAP. 36

Gráfico 3-4: Curvas de Densificación para mezclas de prueba vírgenes. 50

Gráfico 3-5: Curvas de Densificación para mezclas de prueba con 15% de RAP. 51

Gráfico 3-6: Curvas de densificación para las mezcla de diseño. 59

Gráfico 3-7: Curvas de densificación para las mezcla de diseño con 15% de RAP. 59

Gráfico 3-8: Cantidad de Vacíos de aire versus el contenido de ligante asfáltico. 61

Gráfico 3-9: Vacíos en el agregado mineral versus el contenido de ligante asfáltico 62

Gráfico 3-10: Vacíos llenos con asfalto versus contenido de ligante asfáltico. 62

Gráfico 3-11: Proporción de Polvo versus contenido de ligante asfáltico. 63

Gráfico 4-1: Profundidad de la huella v/s N° de pasadas 75

Gráfico 4-2:. Valor promedio del Módulo de Rigidez ajustado para ambos diseños.....76

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Determinación de la Gravedad Específica Efectiva del RAP [1]. 21

Ecuación 2-2: Determinación de la Gravedad Específica bruta del RAP [1].....21

Ecuación 2-3: Determinación de la temperatura crítica del asfalto virgen. [1] 22

Ecuación 2-4: Determinación del RPBR. [1] 23

Ecuación 3-1: Estimación Gravedad Específica Efectiva. [14] 37

Ecuación 3-2: Estimación del volumen de ligante asfáltico absorbido. [14].....37

Ecuación 3-3: Estimación del Volumen de Ligante Efectivo. [14] 37

Ecuación 3-4: Estimación del contenido de prueba inicial de ligante asfáltico. [14] 37

Ecuación 3-5: Estimación del peso del agregado en gramos. [14] 38

Ecuación 3-6: Estimación cantidad de asfalto virgen a incorporar. 39

Ecuación 3-7: Determinación de la Gravedad máxima teórica de la mezcla suelta [14] 44

Ecuación 3-8: Determinación de Gravedad específica bruta de la mezcla compactada. [14] 46

Ecuación 3-9: Determinación de G_{mb} estimada. [15] 47

Ecuación 3-10: Determinación de factor de corrección. [15] 47

Ecuación 3-11: Gravedad Específica Bruta corregida [15]. 48

Ecuación 3-12: Porcentaje de Vacíos de aire en la mezcla de prueba. [14].....51

Ecuación 3-13: Determinación de Vacíos en el Agregado Mineral [14].....51

Ecuación3-14: Determinación del contenido de ligante asfáltico estimado [14] 52

Ecuación 3-15: Estimación del Vacío de Agregado Mineral para un 4% de Vacíos de Aire. [14].....53

Ecuación 3-16: Estimación de los Vacíos Llenos de asfalto para un 4% de vacíos de aire [14] 53

Ecuación 3-17: Estimación de ligante asfáltico efectivo a 4% de Va. [14].....53

Ecuación 3-18: Estimación de la proporción de Polvo para un 4% de Va. [14] 54

Ecuación3-19: Estimación % Gmm @N inicial para un 4% de vacíos de aire [14].....54

Ecuación3-20: Estimación % Gmm @N máximo para un 4% de vacíos de aire [14] 54

Ecuación 3-21: Determinación de la tensión indirecta. 65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3-1: Procedimiento Ensayo de Angularidad del agregado fino.....29

Ilustración 3-2: Procedimiento para el ensayo de contenido de arcilla. 31

Ilustración 3-3: Procedimiento de mezclado. 40

Ilustración 3-4 : Acondicionamiento del RAP a una temperatura de 110[°C] por 2 [horas].....41

Ilustración 3-5: Desprendimiento de partículas para obtener la máxima densidad de la mezcla suelta 44

Ilustración 3-6: Vaciado de la mezcla en matraz. 44

Ilustración 3-7: Eliminación de vacíos de aire.....44

Ilustración 3-8: Determinación del Peso del espécimen en seco.....46

Ilustración 3-9: secado superficialmente seco. 46

Ilustración 3-10: Las tres condiciones del espécimen para el ensayo. 46

Ilustración 3-11: Saturación de probeta a una presión de 20[in. Hg] durante un tiempo de 5 [min].....66

Ilustración 3-12: Aplicación de carga diametral a 50 [mm/min].....66

Ilustración 3-13: Acondicionamiento de probetas a 25[°C] por media hora previo a realizar ensayo de tracción indirecta.....66

Ilustración 3-14: Inspección visual verificando desprendimiento de árido-ligante asfáltico en ambos grupos. 67

Ilustración 3-15: Espécimen ensayado sin RAP 69

Ilustración 3-16: Espécimen ensayado con 15% RAP. 69

INTRODUCCIÓN

En éste capítulo se presentan los antecedentes generales del tema a tratar, los objetivos del estudio, los alcances y el contexto de la investigación, la metodología de trabajo a utilizar y, finalmente, la estructura que tendrá esta memoria.

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

Actualmente en Chile, el Manual de Carreteras (M.C) conserva el método Marshall para el diseño de las MAC. A comienzos de los años 2000, nace en EE.UU la metodología SUPERPAVE la cual, además de establecer un diseño volumétrico para las mezclas, incorpora una serie de ensayos que modelan los deterioros que sufre el pavimento durante su vida de servicio. Esto hace prescindir del método Marshall, ya que los parámetros de estabilidad y fluencia utilizados en la mezcla poco aportan en el desempeño de un pavimento flexible. El método SUPERPAVE incluye la utilización del compactador giratorio, con el cual es más fácil alcanzar una cantidad predefinida de vacíos de aire, lo que es difícil de hacer con la compactación de impacto. Además, la compactación de terreno se aplica mejor a las condiciones reales, ya que se compactan las probetas con una presión uniforme e inclinada.

En esta línea, la DAP ha llevado a cabo en los años 2016 y 2017 la conservación de una pista para el Aeropuerto Arturo Merino Benítez, añadiendo en las especificaciones técnicas el diseño de mezclas Superpave. Ambos diseños fueron desarrollados por el LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Temas transversales como la contaminación, el cambio climático y el agotamiento de recursos no renovables han hecho a la industria del asfalto buscar nuevas alternativas de desarrollo. En la misma tónica, los pavimentos asfálticos tienen la característica de ser reciclables. Por lo anterior, es que gradualmente se ha ido incorporando progresivamente porcentajes RAP en las mezclas, logrando un desempeño similar que aquellas que no lo incluyen. Además su uso ha conllevado a enormes beneficios económicos para las empresas del rubro.

En la presente memoria de título se busca realizar el diseño volumétrico de la MAC correspondiente al proyecto mencionado anteriormente, pero incorporando un 15% de RAP en la mezcla. Además, se evalúa la resistencia al ahuellamiento y el módulo de rigidez para ambos diseños con el objetivo de comparar los resultados obtenidos.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.2.1 Objetivos Generales.

La presente memoria tiene por objetivo realizar el diseño volumétrico de una MAC mediante la metodología Superpave para el proyecto “Conservación mayor pista 17 R / 35 L Aeropuerto Arturo Merino Benítez 2017-2018”, trabajo que se realiza en conjunto con los memoristas Macarena Rivero y Rodrigo Fernández. Asimismo, realizar el mismo diseño, pero incorporando como agregado un 15% de RAP en la MAC y verificando si los parámetros volumétricos de la mezcla cumplen con los criterios del Método Superpave. Finalmente, medir la resistencia al ahuellamiento y módulo de rigidez para ambos diseños.

1.2.2 Objetivos específicos.

Además de lo anterior, el presente trabajo busca:

- Determinar el porcentaje de asfalto contenido en el RAP y realizar la granulometría al agregado lavado obtenido producto de la extracción del ligante asfáltico.
- Evaluar propiedades de consenso del agregado lavado y verificar si éste cumple con los criterios Superpave.
- Determinar proporción de agregados vírgenes necesarios para elaborar una mezcla asfáltica que contenga un 15 % de RAP, de tal manera que se obtenga una granulometría similar a la mezcla de diseño elaborada previamente para la DAP.
- Evaluar las propiedades volumétricas de las mezclas de prueba y estimar el contenido de ligante asfáltico óptimo para un 4% de vacíos de aire. Analizar resultados y seleccionar estructura de agregado de diseño que cumpla con los requisitos Superpave.
- Evaluar desempeño de ambos diseños a través de los ensayos de Rueda de Hamburgo y Módulo de Rigidez, según la normativa UNE-EN 12697-22:2008+A1 y UNE-EN 12697-26:2012, respectivamente.

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO

La presente memoria de título se enmarca dentro del proyecto denominado “Conservación Mayor pista 17R/35L Aeropuerto Arturo Merino Benítez Año 2017-2018”, en el cuál se especifica la construcción de una carpeta asfáltica elaborada con una MAC diseñada mediante la metodología Superpave.

El método utilizado sólo abarca el nivel 1, el cual corresponde a determinar las propiedades volumétricas de la mezcla de diseño y posteriormente evaluar la Susceptibilidad a la Humedad mediante el ensayo TSR (Tensil Strength Ratio). Además de lo anterior, las especificaciones técnicas del proyecto consideran realizar los ensayos de Módulo de Rigidez, Rueda de Hamburgo y Permeabilidad.

La guía para el desarrollo teórico y experimental de la mezcla será el Manual *“Asphalt Mix Design Methods MS-2”*, del Instituto del Asfalto, EE.UU. En consecuencia, todas las consideraciones que se mencionen provendrán de dicho manual y de las especificaciones técnicas especiales (ETE).

En cuanto a realizar el mismo diseño volumétrico para la MAC del Aeropuerto Arturo Merino Benítez, ésta sólo se limita a incorporar un porcentaje de RAP menor o igual a 15%, de tal forma que se cumplan con los criterios mínimos para las propiedades volumétricas que exige el método.

En relación con la granulometría del RAP, ésta se le realizará al agregado lavado producto de la extracción del ligante asfáltico. Si bien puede que algún agregado no cumpla con todas las propiedades de consenso, ellos pueden ser usados si la mezcla de agregados seleccionados satisface todos los criterios.

Las ETE del proyecto establecen realizar el diseño de la mezcla para un nivel de compactación Superpave correspondiente a 5, 75 y 115 giros. (Giros iniciales, de diseño y máximo, respectivamente). Además, el ligante asfáltico se clasificará según grado PG 76-22 y será del tipo modificado con polímeros.

Los áridos seleccionados para el proyecto es grava típica de Santiago, proveniente del río Maipo que cumplen con los requisitos del método Superpave.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Con el fin de alcanzar los objetivos anteriormente planteados, la metodología de trabajo se desarrolla en 3 fases: Revisión bibliográfica, Trabajo en laboratorio y Análisis de resultados.

En la primera fase, se realiza la revisión bibliográfica del tema en cuestión, la cual comprende la lectura del Manual de diseño de mezclas asfálticas del Instituto del asfalto de EE.UU, el estudio de procedimientos asociados al método Superpave especificados tanto en las normas AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), como ASTM (American Society for Testing and materials) y las especificaciones técnicas del proyecto. Luego, se comparan las normas que especifiquen un mismo ensayo, vislumbrando similitudes y diferencias. Finalmente, se hace una revisión del "Estado del Arte" del tema a nivel nacional e internacional

La segunda fase comprende el desarrollo experimental o trabajo en laboratorio, en la cual se explica detalladamente el proceso para el diseño de mezclas asfálticas mediante la metodología Superpave. En primera instancia, se deben seleccionar los materiales (agregado y ligante asfáltico). Se evalúan las propiedades del agregado pétreo y se clasifica el asfalto seleccionado de acuerdo a un grado de desempeño. Luego, se elaboran las mezclas de prueba para seleccionar la estructura del agregado de diseño. Después, se selecciona el contenido de ligante asfáltico de diseño y por último, se evalúa la susceptibilidad a la humedad de la mezcla de diseño. Finalmente, se mide la resistencia al ahuellamiento y el módulo de rigidez de la mezcla diseñada.

La tercera fase comprende analizar los resultados obtenidos durante la etapa experimental.
Se busca determinar si los parámetros volumétricos de la MAC diseñada con 15% de RAP cumplen con los criterios especificados por el método Superpave. Después, se comparan las propiedades volumétricas y los resultados de susceptibilidad a la humedad, de resistencia al ahuellamiento y de módulo de rigidez para ambas mezclas diseñadas.

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

El presente trabajo de Memoria de título se encuentra estructurado por 5 capítulos. Adicionalmente, se incluyen las referencias bibliográficas y Anexos. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

Capítulo 1: Introducción.

Se presentan los principales aspectos del tema a tratar tales como: los antecedentes generales, los objetivos que se pretenden lograr a través de su desarrollo, los alcances del proyecto y la metodología empleada para lograr los objetivos propuestos.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica.

Se define el concepto de RAP, como trabajar el diseño de mezcla con RAP según MS-2 y se recopilan antecedentes bibliográficos referentes a la normativa, producción y desempeño de mezclas con RAP en Estados Unidos, Europa y Chile.

Capítulo 3: Trabajo en Laboratorio.

Explicación detallada de los procedimientos que se ejecutan para el desarrollo de la mezcla asfáltica con RAP mediante la metodología Superpave.

Capítulo 4: Análisis de Resultados.

Se verifican si las mezclas diseñadas cumplen con los requerimientos Superpave para los parámetros volumétricos. Se comparan las propiedades volumétricas entre la mezcla patrón (sin RAP) y la con 15% de RAP. De igual forma, se comparan los resultados que arrojan los ensayos de rueda de Hamburgo y Módulo de rigidez para ambas mezclas.

Capítulo 5: Conclusiones.

Se presentan las conclusiones finales de la memoria de título.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

A continuación se definirá el concepto de RAP, se recopilarán antecedentes bibliográficos referentes a la normativa, producción y desempeño de mezclas con RAP en Estados Unidos, Europa y Chile para finalmente, explicar cómo trabajar el diseño de mezclas con RAP mediante la metodología Superpave de acuerdo al manual “MS-2”.

2.1 PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO.

En el presente estudio se emplea la abreviatura de RAP, proveniente del inglés “*Reclaimed Asphalt Pavement”*, para referirse al término de pavimento asfáltico reciclado.

2.1.1 Introducción.

Por años, el RAP ha sido usado como un componente esencial en el diseño de nuevas mezclas asfálticas por la mayoría de los países desarrollados. Al estar constituido por los mismos componentes que las MAC virgen, agregado y ligante asfáltico, estos pueden ser incorporados nuevamente en la elaboración de una mezcla asfáltica.

Económicamente, existe un beneficio ya que sus componentes pueden ser reusados, evitando la necesidad de comprar materiales nuevos (vírgenes). Adicionalmente a los beneficios económicos, el uso de RAP en las MAC tiene un impacto positivo en el medioambiente, disminuyendo el agotamiento de los recursos naturales no renovables, como el agregado virgen y el asfalto, y evitando el depósito de estos materiales en vertederos.

En relación con su procedencia, usualmente puede ser obtenido del fresado o trozos de demolición de pavimentos asfálticos. También se puede recuperar material de los excesos de producción en planta.

Al igual que en las mezclas con agregados vírgenes, la variabilidad y el control de calidad de los acopios de RAP juega un rol importante en la elaboración de la mezcla de diseño. Para maximizar el uso del RAP en las MAC, se sugiere que la fuente del RAP sea conocida y, en la práctica, se mantengan separados los acopios de RAP pertenecientes a proyectos específicos. La razón de esto es porque las propiedades del ligante asfáltico y el agregado pueden variar entre un RAP obtenido de una calle destinada al estacionamiento de vehículos y el de una autopista urbana. [1]

Una de las prácticas más comunes en la generación de acopios de RAP, es separarlos en una fracción gruesa y fina, con el objetivo de tener un mayor control de la graduación. De éste proceso, surge el término de FRAP, abreviatura del inglés que significa *Fractionated Reclaimed Asphalt Pavement*. De esta forma, al separar los acopios se puede reducir la variabilidad global de la mezcla final que usa altos porcentajes de RAP. Con esto, se incrementa la disponibilidad de opciones para el diseñador, ya que hay más acopios para trabajar. Sin embargo, se debe considerar que el proceso de fraccionamiento tiende a concentrar el ligante en la fracción más fina del FRAP y reducir el contenido de ligante en la fracción más gruesa.

Antiguamente, las agencias limitaban el porcentaje de RAP en la mezcla. Esto era una aproximación aceptable cuando el porcentaje de ligante del RAP era muy similar al del contenido total de la mezcla. Con el incremento en el uso del FRAP y los avances tecnológicos, se ha reconocido la necesidad de considerar la cantidad de RAP en la mezcla en términos de una relación entre el ligante contenido en el RAP y la cantidad total de ligante asfáltico contenido en la mezcla final, término que se conoce con la abreviatura de RPBR, del inglés RAP Pavement Binder Ratio.

Durante los últimos años, el uso del RAP se ha masificado enormemente tanto en Europa como en EE.UU, aumentando su producción y generándose avances respecto a su manipulación durante el proceso de diseño de nuevas mezclas asfálticas. A continuación, se resume el contexto actual de este material en el mundo y en nuestro país. Además se hace mención a la normativa actual que rige el diseño de mezclas con RAP en EE.UU y Chile.

2.1.1.1 Uso de Mezclas asfálticas con RAP en EE.UU.

El diseño de mezclas asfálticas con RAP se encuentra estipulado por el Manual MS-2, del Instituto del Asfalto [1]. En él, se establece una metodología que permite al diseñador desarrollar mezclas que mantengan las propiedades originales de desempeño establecidas por el método Superpave, incluyendo la recomendación de los grados PG que ha demostrado su eficacia para la resistencia al agrietamiento térmico y deformación permanente. En esta misma línea, se busca diseñar una mezcla asfáltica con materiales reciclados que cumpla con todos los requisitos especificados para mezclas producidas con 100% de materiales vírgenes. La metodología propuesta se explicará en detalle en el punto 2.1.2 de éste capítulo.

A partir del año 2009, la National Asphalt Pavement Association (NAPA) de los Estados Unidos, elabora un estudio respecto al uso de materiales reciclados y mezclas asfálticas tibias. [2].
En el último, emitido el año 2016, se entrega un balance categórico respecto de la situación del reciclado de mezclas asfálticas en dicho país.

Primero, señalar que actualmente el 99% de las mezclas asfálticas recuperadas de pavimentos antiguos se vuelven a usar en pavimentos nuevos. El porcentaje promedio de RAP utilizado en las mezclas asfálticas entre los años 2009 y 2016 se ha incrementado de un 15,6% a un 20,5%, respectivamente. En cuanto a las toneladas estimadas de RAP usado en las mezclas asfálticas, éste fue de 76,9 MMt (millones de toneladas) para el año 2016. Estas cifras representan más de 3,8 MMt de ligante asfáltico virgen economizado, junto con el reemplazo de 73 MMt de agregado virgen, representando un ahorro de más de $US 2 billones para las agencias. Además, el almacenamiento de acopios de RAP para fines del 2016 disminuyo a 93,6 MMt.

La Figura 2-1 representa las toneladas de RAP utilizado para cada sector de la industria, los cuáles han mantenido la tendencia de un crecimiento a la baja entre los años 2009 y 2016.

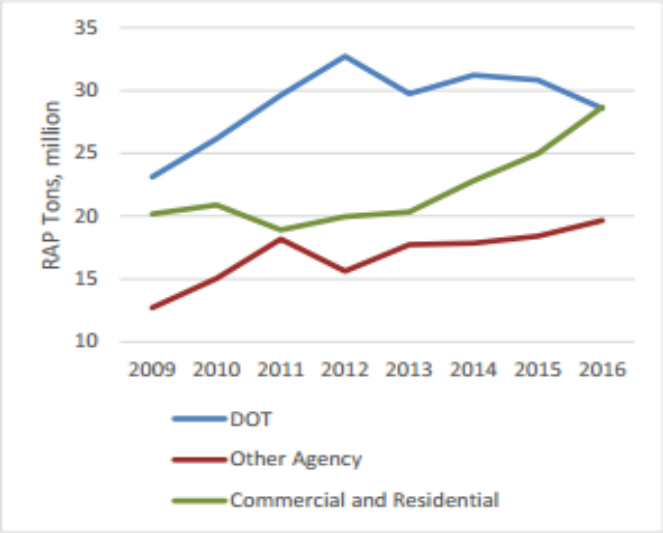


Figura 2-1: Toneladas de RAP usadas por cada sector de la industria. [2]

La Figura 2-2 muestra el porcentaje de RAP promedio usado en mezclas asfálticas para cada Estado. Cabe señalar que el estudio considera una muestra que incluye los 50 Estados, 229 compañías y 1146 plantas de asfalto. Se puede apreciar que el número de Estados que han

aumentado los porcentajes de RAP en las mezclas asfálticas se ha mantenido en alza entre los años 2012 y 2016.

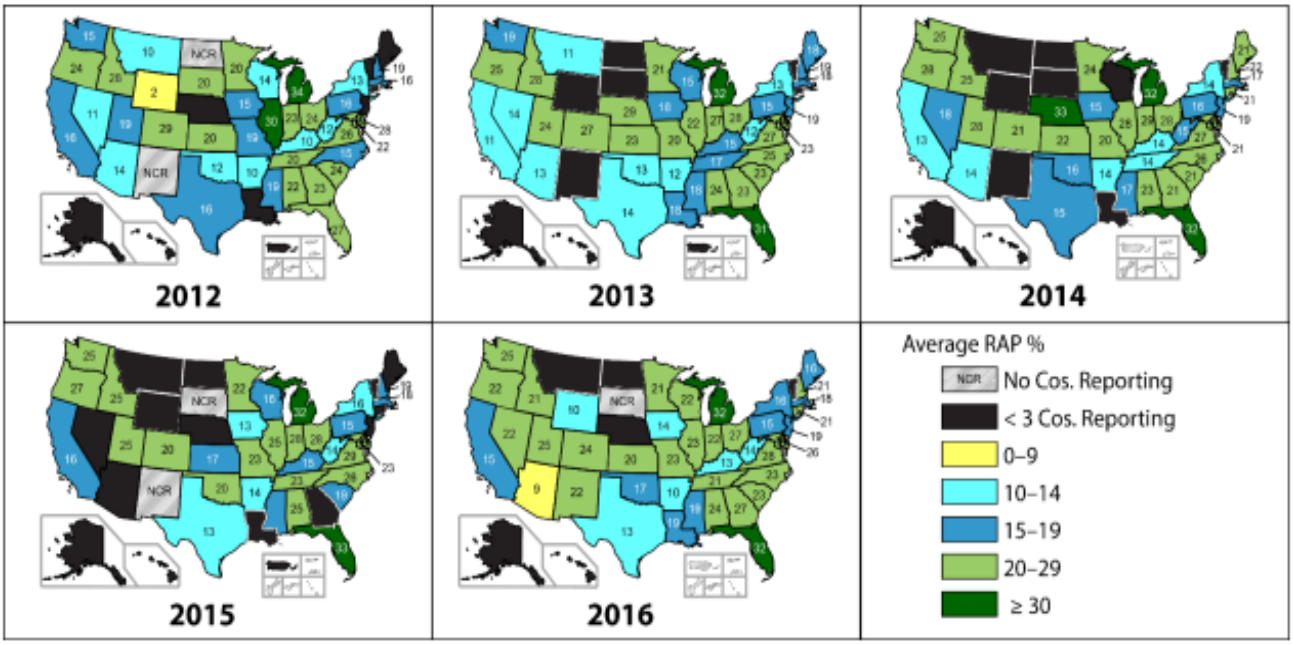


Figura 2-2: Evolución del promedio de porcentaje de RAP utilizado en cada Estado. [2]

La figura 2-3, representa la cantidad de Estados informando un determinado rango de porcentaje de RAP entre los años 2009 y 2016. De éste se desprende que el número de Estados reportando sobre un 20% de RAP ha tenido un incremento significativo, aumentando de 10 a 27 entre los años 2009 y 2014, después decreciendo a 21 Estados en el 2015 y alcanzando 29 Estados el 2016.

La cantidad de Estados que utilizan bajo 15% de RAP ha disminuido de 23 a sólo 2 entre los años 2009 y 2014 y permaneciendo en 10 Estados entre el 2015 y el 2016.

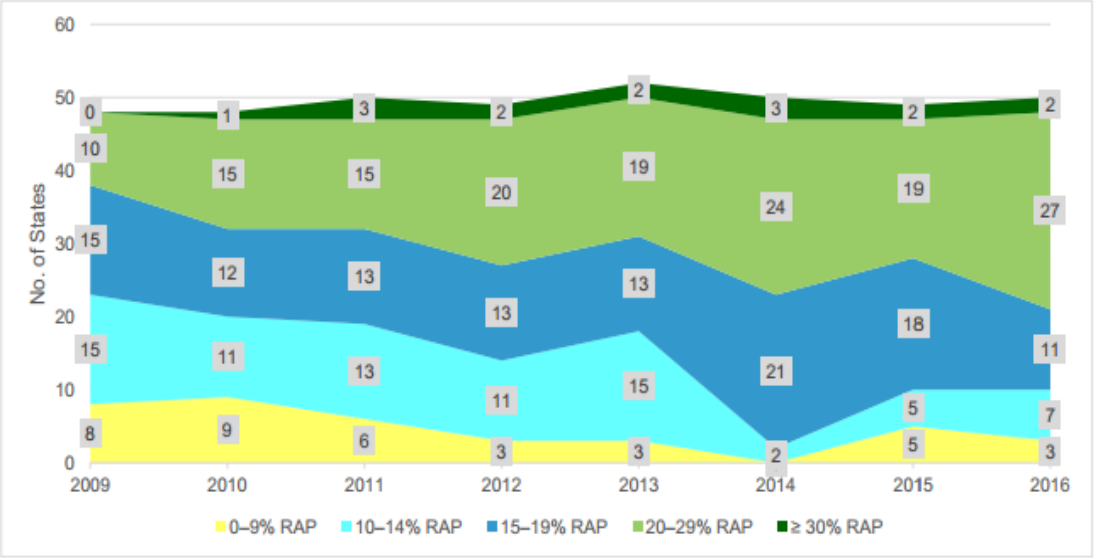


Figura 2-3: Evolución de la cantidad de Estados que trabajan diferentes porcentajes de RAP durante los años 2009-2016. [2]

2.1.1.2 Uso de Mezclas asfálticas con RAP en Europa.

De acuerdo a un informe emitido por la *European Asphalt Pavement Association* (EAPA) [3], alrededor de 260 [MMt] de mezclas asfálticas en caliente fueron producidas el año 2015. Hoy, más del 90%, de los 5,5 millones de kilómetros de carreteras en Europa, son de asfalto. Existen alrededor de 4500 plantas de asfalto, más de 10000 compañías productoras y la industria ha facturado alrededor de 30 billones de Euros.

Se ha presentado un incremento de la cantidad de países que están reusando/reciclando asfalto recuperado y/o residuos de demolición para reemplazar agregados vírgenes y ligante asfáltico. Alrededor de 50 MMt de asfalto recuperado se encuentran disponibles por año, de las cuales 81% son recicladas y 57% son reusadas.

2.1.1.3 Uso de Mezclas asfálticas con RAP en Chile.

En Chile, el uso de RAP en mezclas asfálticas nuevas, es aún muy incipiente, sin embargo, tanto en vías urbanas como inter-urbanas, es común el uso extensivo de la técnica de fresado, es decir, retirar una capa asfáltica deteriorada para reemplazarla por una nueva. Lo anterior, ha traído como consecuencia que, con el tiempo, la cantidad de RAP acumulado sea significativa. Existen un par de antecedentes respecto a tramos elaborados con adición de RAP. [6]

En noviembre del 2012 se confeccionó un tramo de prueba con una MAC que incorporaba un 20% de RAP, para el Contrato Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué, en la región de Valparaíso.

La estructura de la calzada de 3,5 [m] de ancho estuvo compuesta por 5 [cm] de espesor de carpeta de rodado con mezcla asfáltica con RAP, 9 [cm] de espesor de binder (capa intermedia) con mezcla virgen y 29 [cm] de base granular.

En la tabla 2-1 se presenta la proporción de agregados y el tipo de ligante asfáltico para la mezcla diseñada. Cabe señalar que se utilizan dos acopios de RAP (uno fino y otro grueso) para la confección de la estructura del agregado.

Tabla 2-1: Granulometría y tipo de asfalto. [6]

Materiales	Porcentajes
Gravilla 1	16%
Gravilla 2	24%
Polvo roca	38%
RAP 1	4%
RAP 2	16%
Cemento asfáltico	CA 24

En la tabla 2-2 se presentan los parámetros volumétricos de la mezcla diseñada.

Tabla 2-2: Parámetros de la mezcla de diseño. [6]

ITEM	VALOR
% ligante	5,0±0,3
% de aporte de asfalto en RAP	0,8
Contenido de asfalto en el RAP	4,1
% ligante a inyectar	4,2±0,3
Densidad Marshall [Kg/m3]	2377
Temperatura de mezclado [°C]	145-170
Temperatura compactación [°C]	120-160

Existe un segundo tramo de prueba realizado en el Camino Cruce Ruta G-78 (Malloco) con el Cruce G-78 (Puangue), cuya mezcla asfáltica se fabricó con 20% de RAP. De igual forma, un tercer tramo que comprende la ruta G-30 (Lonquén) de aproximadamente 18 [km].

2.1.2 Desempeño de Mezclas asfálticas con RAP*.*

Debido a que el estudio consiste en realizar el mismo diseño de mezcla asfáltica efectuado para el proyecto “Conservación Mayor pista 17R/35L Aeropuerto Arturo Merino Benítez Año 2017-2018”, pero con incorporación de un 15% de RAP, la búsqueda de información se limitó a recopilar antecedentes relacionados a los ensayos de rueda de Hamburgo y módulo de rigidez solicitados por la DAP.

En general, los resultados muestran que a medida que se incrementan los porcentajes de RAP, disminuye el potencial ahuellamiento del pavimento y se incrementa la rigidez de la mezcla. [7]

Existe un reporte que resume la información del desempeño de mezclas con altos contenidos de RAP, colocados en Florida, Ohio, Minnesota, Alabama y Manitoba. [7] Al respecto, se analizan los datos para las pistas de pruebas elaboradas en Alabama

Se realizan dos pistas de prueba con diferentes grados PG, uno estándar para cargas de tráfico menores a 10 millones de ESAL’s, correspondiente a un PG 67-22, y otro para altos niveles de tráfico, utilizando un PG 76-22. Además, en ambos diseños se utilizaron asfaltos modificados con polímeros. Posteriormente, se evalúan las diferencias producidas en el agrietamiento para mezclas con 20% de RAP después de dos años de servicio. Los resultados se pueden apreciar en la parte superior de la Tabla 2-3. Más tarde, otras cuatro canchas fueron construidas, cada una con diferentes PG para el grado del ligante virgen y con 45% de RAP en la mezcla.

Después de 20 millones de Esals (aproximadamente 5 años) ninguna de las secciones tuvo más de 5 [mm] de profundidad de ahuellamiento. El largo total de las grietas disminuye a medida que baja la temperatura alta del grado PG del ligante. Los resultados para el agrietamiento se presentan en la parte inferior de Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Agrietamiento de Mezclas con RAP en pistas de Prueba en 2006. [7]

Test Section	RAP Content	%RAP Asphalt	Virgin Asphalt Grade	Date of first Crack	ESALs at first Crick	Total Lenght of Craking
Impact of Reducing Critical PG High Temperature (<25% RAP)						
W4	20 %	17,6	PG 67-22	No Cracking		
W3	20 %	18,2	PG 76-22	4/7/2008	6,522,440	34,0
Impact of Reducing Critical PG High Temperature (>25% RAP)						
W5	45%	42,7	PG 58-28	8/22/2011	19,677,699	3,5
E5	45%	41,0	PG 67-22	5/17/2010	13,360,016	13,9
E6	45%	41,9	PG 76-22	2/15/2010	12,182,331	53,9
E7	45%	42,7	PG 76-22S	1/28/2008	5,587,906	145,5

La figura 2-4 representa la influencia en los cambios del grado PG en el ligante virgen sobre el largo de las grietas producidas durante estos 5 años y los ESAL'S alcanzados para cada agrietamiento.

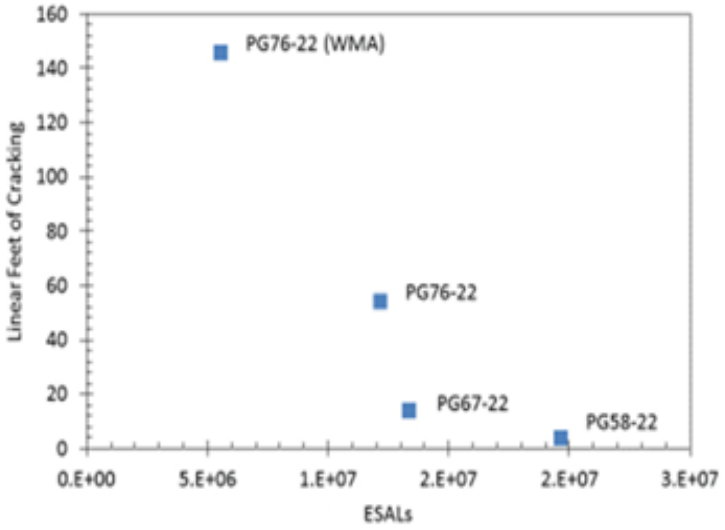


Figura 2-4: Influencia en los cambios de la temperatura alta sobre el largo de las grietas para mezclas con 45% de RAP. [7]

Existen además otros estudios donde se evalúan los efectos de la incorporación de RAP en la deformación permanente de las mezclas. Por ejemplo, la Universidad de Illinois publicó un artículo en donde se sometieron especímenes al ensayo de rueda de carga utilizando distintos porcentajes de RAP y modificando los grados PG del ligante asfáltico. [8]

Para ello, se diseñó una mezcla de control con 0% de RAP y con un asfalto base de un grado PG 64-22. Con el objetivo de comparar los resultados de resistencia al ahuellamiento, otras tres MAC fueron elaboradas con 30%, 40% y 50% de RAP, respectivamente. Además, para cada una se disminuyó la temperatura alta y aumento la baja en un grado PG, con respecto al asfalto base de la MAC de control, siendo de un PG 58-22 y un PG 58-28, respectivamente.

Ninguno de las especímenes alcanzo los 12,5 [mm] (criterio de falla seleccionado).

En la Figura 2-6 se evidencia una mejora en la resistencia al ahuellamiento de la MAC de control a medida que se incrementa el contenido de RAP de 0% a 40%. Sin embargo, con 50% de RAP, la muestra alcanza una resistencia similar a la de MAC de 40%.

En la Figura 2-5 se puede observar los efectos del cambio del grado PG en el ligante asfáltico para un diseño de MAC con 30% de RAP. Respecto a los resultados anteriores, se puede observar que el ahuellamiento es mayor cuando se modifica el grado del ligante.

Para las MAC con 40% de RAP (ver figura 2-8) el efecto fue similar, sin embargo, el ahuellamiento se incrementa aún más respecto al diseño con 40% de RAP y un PG 64-22 (curva roja).

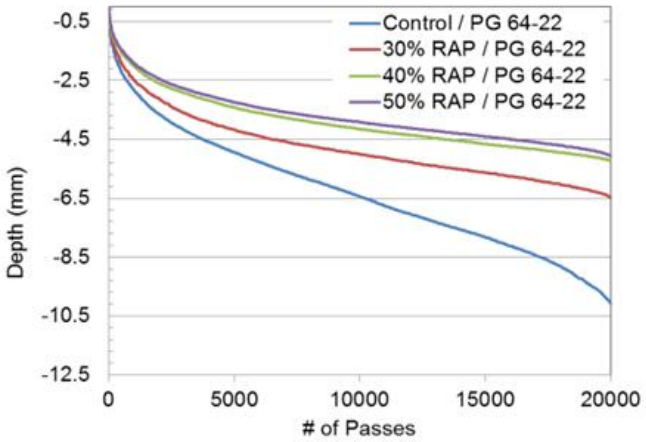


Figura 2-6: Efecto del aumento del RAP en la profundidad de la huella. [8]

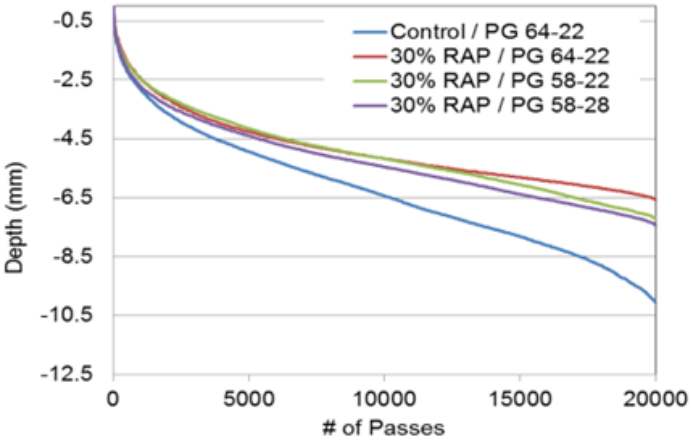


Figura 2-5: Efecto del cambio de Grado del ligante asfáltico en la profundidad de la huella para mezclas con 30% de RAP. [8]

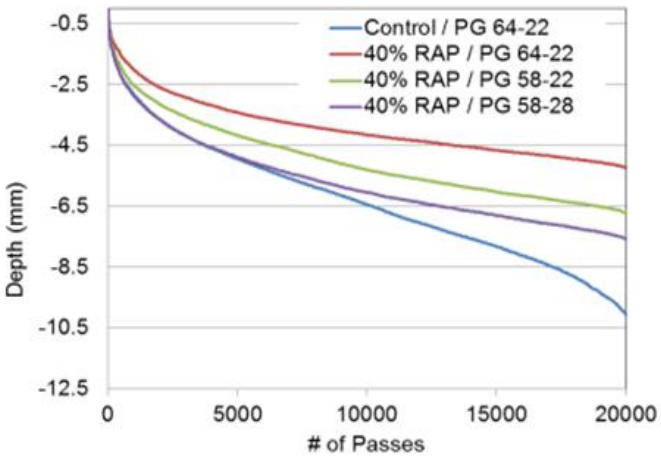


Figura 2-8: Efecto del cambio de Grado del ligante asfáltico en la profundidad de la huella para mezclas con 40% de RAP. [8]

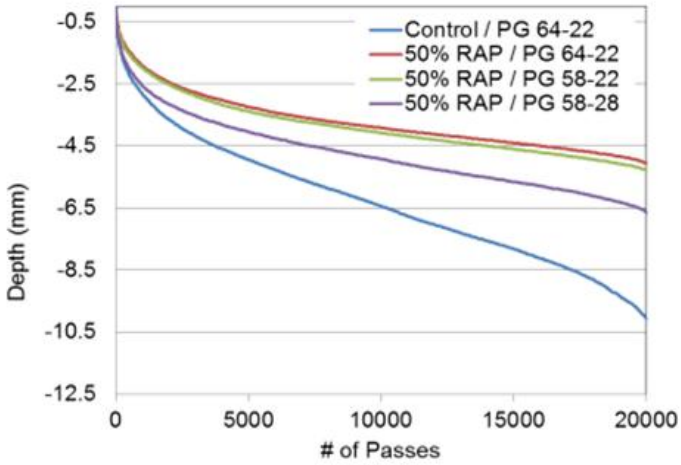


Figura 2-7: Efecto del cambio de Grado del ligante asfáltico en la profundidad de la huella para mezclas con 50% de RAP. [8]

Para las MAC con 50% de RAP (ver figura 2-7), el ahuellamiento disminuye al modificar el grado del ligante, respecto a las MAC con 40% de RAP.

En general, los datos demuestran que se obtienen menores ahuellamientos aumentando los porcentajes de RAP en las MAC que modificando el grado PG del ligante asfáltico.

Se señala otro estudio en donde el ahuellamiento y el módulo de rigidez fueron analizados para mezclas con altos porcentajes de RAP, 0%, 15%, 30% y 50%, respectivamente. [8] Para un contenido de asfalto de 4,5 %, los valores de rigidez son de aproximadamente 11.000 MPa. Estos aumentan ligeramente con un incremento en el contenido de RAP para el mismo contenido de asfalto. El modulo comienza a decrecer al aumentar el contenido de asfalto, con valores cercanos a los 10000 MPa para 5,5% de asfalto en todas las mezclas. El ensayo se ejecutó para una temperatura de 20°C.

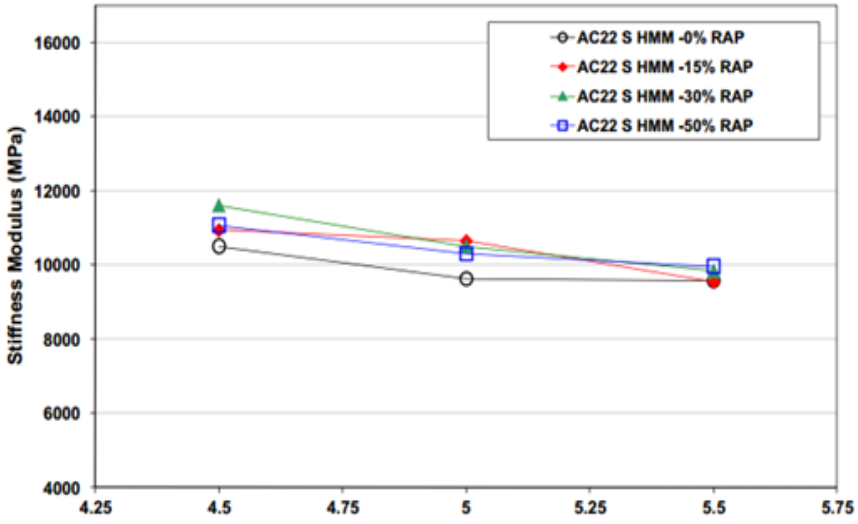
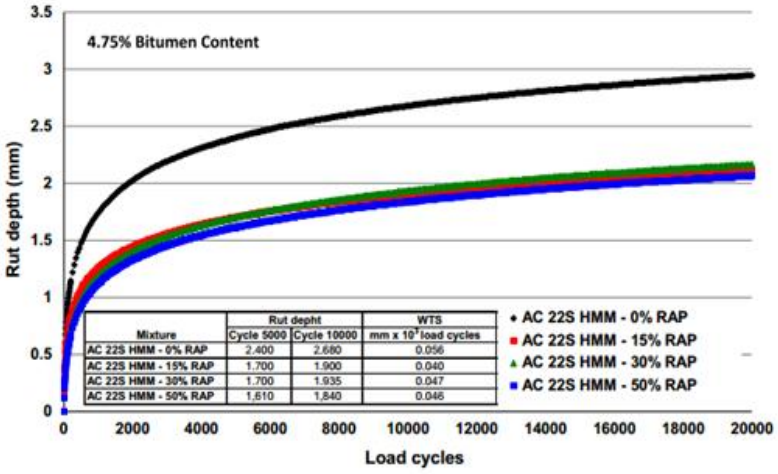


Figura 2-9: Módulo de rigidez a 20[°C] en función del contenido de ligante asfáltico. [9]

De igual forma, se someten las mismas mezclas al ensayo de rueda de carga, evidenciándose claramente una disminución en la profundidad de la huella para las mezclas con RAP.



Mixture	Rut depht		WTS
	Cycle 5000	Cycle 10000	mm x 10^3 load cycles
AC 22S HMM - 0% RAP	2.400	2.680	0.056
AC 22S HMM - 15% RAP	1.700	1.900	0.040
AC 22S HMM - 30% RAP	1.700	1.935	0.047
AC 22S HMM - 50% RAP	1.610	1.840	0.046

Figura 2-10: Resultados para el ensayo de rueda de carga a 60[°C] [9].

Con respecto a la susceptibilidad a la humedad, las mezclas con altos porcentajes de RAP contienen generalmente altas tensiones de esfuerzos, lo cual es esperable debido a la contribución de rigidez del ligante del RAP. [9]

En la figura 2-11, se aprecia que las probetas sin acondicionar alcanzan esfuerzos más altos y, al incorpora RAP, estos tienden a aumentar aún más.

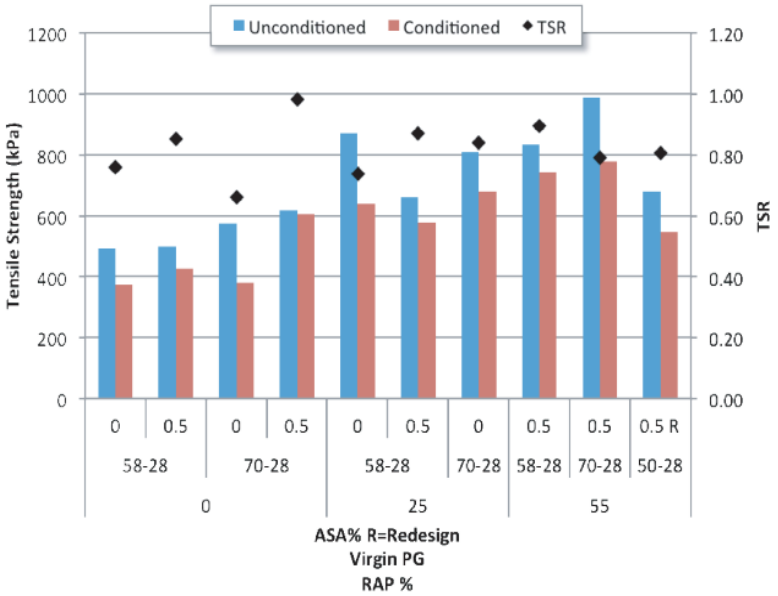


Figura 2-11: Resultados para susceptibilidad a la humedad para mezclas de New Hampshire. [10]

En el contexto del proyecto *"Investigación y Desarrollo de nuevos pavimentos asfálticos sostenibles de baja temperatura y recicladas"* realizado laboratorio nacional de Vialidad y Sacyr S.A, es que se elaboró un tramo de prueba de 17 [km] en la ruta 5 norte, específicamente para el tramo La Serena- Vallenar, en la Provincia de Elqui. [11].

El diseño de la mezcla asfáltica fue realizado mediante el Método Marshall. Los datos obtenidos corresponden a un segundo seguimiento del tramo de prueba mencionado, del cual se extrajeron 14 testigos para calcular los parámetros Marshall (estabilidad y fluencia) y medir del módulo de rigidez de acuerdo a la Norma UNE-EN 12697-26 [12], a las temperaturas de 15°C, 20°C Y 25°C.

En la cancha de prueba se realizaron tramos con distintos porcentajes de RAP, tanto para capas intermedias como rodadura.

Los resultados para el ensayo de módulo de rigidez para una temperatura de 15[°C] se presentan en los gráficos 2-1 y 2-2. Se desprende que mientras se aumenta el porcentaje de RAP los valores de rigidez disminuyen, para ambas capas. Estos resultados son contradictorios respecto a los estudios analizados anteriormente.

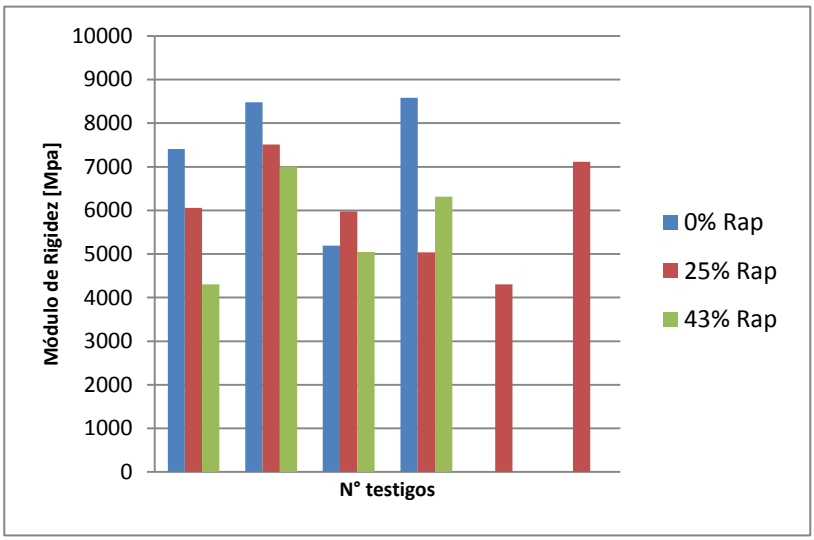


Gráfico 2-1: Resultados para el Módulo de Rigidez para capas intermedias. [11]

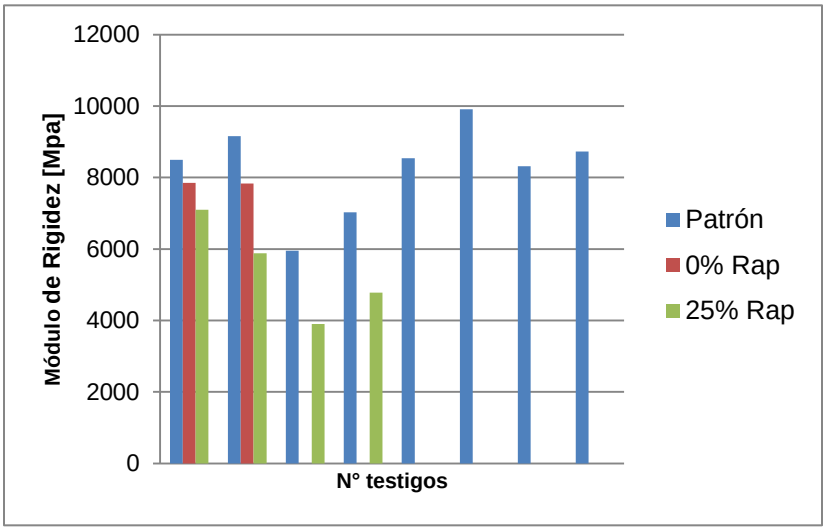


Gráfico 2-2: Resultados para el Módulo de Rigidez para capas de rodadura. [11]

2.1.3 Metodología Aplicada.

En este trabajo, el diseño de las mezclas se llevará a cabo de acuerdo a lo estipulado en el Capítulo 11 del Manual MS-2 [1]. El manual de carreteras, en su edición 2017, también incorpora el diseño de mezclas asfálticas con RAP.[4].

Respecto al diseño de mezclas con RAP, se establecen las siguientes diferencias entre ambos manuales:

1. El MS-2 establece el diseño de mezclas con RAP mediante la metodología Superpave, mientras que el M.C establece el método Marshall.
2. En el MS-2 se establecen cinco bandas de trabajo con distintos tamaños nominales (37,5, 25, 19, 12,5 y 9,5 [mm]) para encontrar la fórmula de trabajo de la mezcla de agregados. En el M.C se especifican dos bandas para las mezclas con RAP dependiendo de la capa en donde se utilicen (una para capas de rodadura y otra para capas intermedias y base gruesa). Para la mezcla de agregados, se debe tener en cuenta la banda de trabajo y en base a la granulometría que arrojen los acopios definir el porcentaje de RAP a incorporar.
3. En lo que se refiere al acondicionamiento del RAP en el laboratorio, el M.C considera calentar el RAP al mismo rango que los agregados vírgenes, lo cual también ha sido comprobado que éste no debe superar las 2 horas de acondicionamiento a 110°C por el MS-2, existiendo diversos experimentos que sustentan lo anterior. [5]

4. El MS-2 establece un cambio en el grado PG del ligante virgen debe ser necesario dependiendo del porcentaje de RAP a agregar en la mezcla. El M.C sólo hace referencia a que cuando el porcentaje de ligante en el RAP es mayor a 3,0 % este se deberá caracterizar.

5. El M.C señala que para porcentajes sobre 20% de RAP, es necesario fabricar una mezcla patrón con la finalidad de comparar y evidenciar el impacto de la incorporación del RAP en la mezcla asfáltica. Para las mezclas asfálticas de rodadura se debe determinar los parámetros de los ensayos de módulo de rigidez, ahuellamiento y fatiga. El MS-2 no establece ningún límite en el porcentaje de RAP en la mezcla para ejecutar los ensayos de caracterización o desempeño.

La metodología que se aplicará en esta investigación será la expuesta en el MS-2, en la que se especifica la elaboración de mezclas con RAP que cumplan con los mismos requisitos Superpave establecidos para las mezclas producidas con 100% de materiales vírgenes.

Al incorporar RAP en la mezcla asfáltica, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Respecto a su manipulación en el laboratorio, el RAP debe ser tratado como cualquier otro acopio de agregados, sin embargo, debe ser acondicionado alrededor 2 [horas] a una temperatura máxima de 110[°C] antes de mezclar, con el fin de evitar cambios en las propiedades del ligante asfáltico. Existen diversos reportes de la *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)* que sustentan dicha práctica. [5]

- La gravedad específica bruta del RAP tiene que ser estimada.

- Se debe considerar el porcentaje de ligante asfáltico que aporta el RAP a la mezcla de diseño, con el fin determinar el contenido de ligante asfáltico virgen a incorporar.

- Por último, un cambio en el grado del ligante virgen debe ser necesario dependiendo del porcentaje de RAP a agregar en la mezcla.

Salvo estas excepciones, el procedimiento para el diseño volumétrico de las MAC es básicamente el mismo con o sin incorporación de RAP, como será detallado en el capítulo 3.

2.1.3.2 Estimación de la Gravedad Específica Bruta del RAP.

Con el objetivo de caracterizar el acopio de RAP y seleccionar la mezcla correcta, se propone calcular un valor un estimado para la gravedad específica bruta del RAP, Gsb_{rap} *("bulk specific gravity")* [1]. De acuerdo a la ecuación 2-2, se debe obtener previamente la Gravedad específica efectiva, Gse_{rap} *("effective specific gravity").* Para ello, es necesario conocer el contenido de ligante asfáltico en el RAP y en la mezcla final. Además, se tiene que determinar la gravedad específica máxima teórica antes de proceder con los cálculos. El procedimiento para determinar éste último parámetro se describe en el punto 3.1.5.

A continuación, se presentan las ecuaciones que permiten calcular los parámetros mencionados:

$$Gse_{rap} = \frac{100 - P_{b,rap}}{\frac{100}{G_{mm,rap}} - \frac{P_{b,rap}}{G_{b,rap}}}$$

Ecuación 2-1: Determinación de la Gravedad Específica Efectiva del RAP [1].

Donde:

Gse_{rap} Gravedad específica efectiva del RAP.

$P_{b,rap}$ Porcentaje de asfalto en el RAP.

$G_{mm,rap}$ Gravedad específica máxima teórica del RAP.

$G_{b,rap}$ Gravedad específica del ligante asfáltico del RAP. Se recomienda utilizar un valor de 1,04, por tratarse de un asfalto que está envejecido [1]

$$Gsb_{rap} = \frac{Gse_{rap}}{\frac{P_{ba,rap} * Gse_{rap}}{100 * Gb_{rap}} + 1}$$

Ecuación 2-2: Determinación de la Gravedad Específica bruta del RAP [1]

Donde:

Gsb_{rap} Gravedad específica bruta del RAP estimada.

$P_{b,a\,rap}$ Contenido de ligante asfáltico absorbido en el RAP. Basado en la experiencia con mezclas en el laboratorio, se asume un valor de 1.

2.1.3.3 Selección del grado de desempeño del ligante virgen para mezclas con RAP.

Para el diseño de mezclas con RAP, la norma AASHTO M323 [13] recomienda bajar uno o dos grados la temperatura alta y baja del ligante asfáltico virgen Dicha sugerencia va a depender de la cantidad de Rap a incorporar en la mezcla, como se aprecia en la tabla 2-6.

Tabla 2-4: Grado del ligante asfáltico virgen para mezclas con Rap [13]

Grado del ligante virgen	Porcentaje Rap
No hay cambios en el ligante seleccionado	<15
Seleccionar un grado más bajo.	15 a 25
Se recomienda usar cuadros de mezcla.	>25

Esta consideración se usa siempre y cuando el contenido de ligante asfáltico en el RAP sea similar al contenido de asfalto en la mezcla de diseño (entre 4 y 6%) y cuando se desee incorporar porcentajes de RAP menores a 25% en la mezcla. [1]

2.1.3.4 Cuadros de Mezcla.

Para porcentajes mayores a 25% de RAP, se recomienda utilizar los cuadros de mezcla. Estos consisten en una aproximación lineal que relaciona las temperaturas del ligante virgen, de la mezcla y el RAP. Además, estas temperaturas se relacionan con el porcentaje de RAP a incorporar en la mezcla, como muestra la ecuación 2-3.

Su uso entrega una aproximación más consistente puesto que caracteriza las propiedades del ligante del RAP y luego determina las propiedades que surgen de la mezcla de ligantes asfálticos entre el RAP y el asfalto virgen.

$$T_{virgen} = \frac{T_{mezcla} - (\%RPBR * T_{rap})}{(1 - \%RPBR)}$$

Ecuación 2-3: Determinación de la temperatura crítica del asfalto virgen. [1]

Donde:

% RPBR Corresponde al porcentaje de RAP a incorporar en términos de una relación entre el ligante contenido en el RAP y la cantidad total de ligante asfáltico contenido en la mezcla final, como muestra la ecuación 2-4

$$RPBR = \frac{P_{b,rap} * \%RAP}{P_{total}}$$

Ecuación 2-4: Determinación del RPBR. [1]

Existen tres formas de usar la ecuación 2-3, entre las que se encuentran:

1. Determinar un apropiado grado del ligante virgen, cuando se conoce el porcentaje de RAP a usar y el grado de la mezcla final.
2. Determinar el porcentaje de RAP a usar, cuando se especifica el grado del ligante asfaltico virgen y el grado de la mezcla final.
3. Determinar el grado final de la mezcla una vez fijado el porcentaje de RAP y el grado del ligante asfáltico virgen.

La mayoría de los proyectos especifican el grado de la mezcla final, dejando sólo el porcentaje de RAP y el grado del ligante virgen como variables.

2.1.3.5 Propiedades de Consenso

Al igual que en los agregados vírgenes, se debe evaluar la angularidad del agregado grueso y fino y las partículas planas y elongadas. El ensayo de equivalente de arena no se realiza, ya que en caso de existir arcilla o arena, ésta es removida durante el proceso de extracción del ligante asfáltico. [1]

TRABAJO EN LABORATORIO.

El trabajo consiste en realizar el diseño volumétrico de una MAC, que cumpla con criterios Superpave en conjunto con “Especificaciones técnicas especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por Superpave” (ETE N°1A), la tarea se desarrolla en equipo, junto a los memoristas Rodrigo Fernández y Macarena Rivero.

De manera individual, se realizará una réplica del diseño anterior, incorporando 15% de RAP en la mezcla.

El proceso de diseño de las mezclas Superpave se divide en estos 4 pasos:

1. Selección de los Materiales (Ligante Asfáltico y agregados pétreos).

2. Diseño de la Estructura del Agregado

3. Diseño del contenido de Asfalto.

4. Evaluación de la Susceptibilidad a la humedad.

3.1 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES.

En primer lugar, se deben seleccionar los materiales: Ligante asfáltico y el Agregado Pétreo.

3.1.1 Ligante Asfáltico.

Las propiedades físicas del ligante son evaluadas en tres estados: sin envejecer (original), envejecimiento primario y secundario. El primero, hace referencia a la etapa que se da durante el transporte, almacenamiento y manejo. El segundo, es producido luego de la fabricación y colocación de la mezcla asfáltica. Éste estado es simulado a través del equipo HPDR (Horno de Película Delgada Rotatoria). El tercero, cuando ha permanecido en servicio durante un largo plazo. Ésta condición se representa mediante el ensayo PAV (*“Pressure aging vessel”*).

Se establecen cuatro test que miden las propiedades físicas del ligante asfáltico:

- Viscosímetro Rotacional RV (Rotational Viscometer).
- Reómetro de Corte Dinámico DSR (Dynamic Shear Rheometer).
- Reómetro de Viga de Flexión BBR (Bending Beam Rheometer)
- Ensayo de Tracción Directa DTT (Direct Tension Test).

Estos ensayos tienen como objetivo medir la rigidez del ligante asfaltico para distintos estados de envejecimiento y temperaturas. El equipo DSR mide las propiedades del asfalto para temperaturas altas e intermedias, el dispositivo RV para temperaturas altas y el ensayo BBR para temperaturas bajas.

Los ensayos evaluados para este diseño de mezcla, junto con los requerimientos Superpave, se presentan en la tabla 3-1:

Tabla 3-1: Resultados de las pruebas realizadas al ligante asfáltico y el criterio de aceptibilidad.

LIGANTE ORIGINAL		
Ensayo	**Resultado**	**Requerimiento Superpave**
Punto de inflamación	318	230 mín
Viscosidad Rotacional 135°C [Pa s]	1,782	3 máx
Reómetro Dinámico de Corte G*/senδ@76[°C] [kPa]	1,41	1,00 mín
LIGANTE ENVEJECIDO-HPDR		
Cambio de masa [%]	-0,230	±1,00 máx
Reómetro Dinámico de Corte G*/senδ@76[°C] [kPa]	2,49	2,20 mín
LIGANTE ENVEJECIDO-PAV		
Reómetro Dinámico de Corte G*senδ@19[°C] [kPa]	3.510	5.000 máx
Reómetro de Flexión Stiffness @-18 [°C] [MPa]	127,49	300 máx
Reómetro de Flexión Valor m @-18 [°C]	0,32	0,300 mín
Densidad [Kg/m3]	1,021	**Requerimiento EETT**
GRADO DE DESEMPEÑO PG	**PG 76-28**	**PG 76-22**

Como se observa en la tabla, los resultados obtenidos para cada ensayo, cumplen con los criterios de aceptabilidad exigidos por Superpave en conjunto con ETE, por lo tanto, se cumple que el ligante utilizado con PG 76-28 cumpla con las especificaciones.

La temperatura de mezclado y compactación fueron informadas por el proveedor del ligante, siendo de 179,5±4,5 [°C] y 158± 3 [°C], respetivamente.

3.1.2 Agregado Pétreo.

Corresponden a tres acopios, dos de material grueso y uno fino, siendo grava de ¾” ,½” y polvo roca, respectivamente. Son materiales chancados provenientes de la planta San Guillermo, cercana al río Maipo en Santiago. Por otro lado, el acopio de RAP proviene de la planta Bitumix, Comuna de Maipú, Santiago.

3.1.2.1 Preparación de la muestra.

Para cada acopio se debe obtener una muestra representativa. Para ello se debe cuartear el material de acuerdo a la sección 8.202.2 del M.C.

Para determinar la granulometría del agregado fino y grueso, se deben realizar los procedimientos de la sección 8.202.3 y 8.202.4 del M.C, respectivamente.

3.1.2.2 Granulometría del RAP.

Independientemente de la cantidad de RAP a usar en la mezcla, para realizar el diseño se necesita conocer el contenido de ligante asfáltico en el RAP. De esta forma, se podrá determinar el contenido de asfalto virgen a inyectar en la mezcla final. Para ello, existen 2 métodos: horno de ignición (AASHTO T308) y extracción mediante solvente (AASHTO T164). En este caso, se aplicó el segundo método mediante extracción con tricloroetileno. Finalmente, se determina la granulometría del agregado lavado producto de la extracción.

Los resultados del análisis granulométrico de las 4 pilas de acopio se presentan en la tabla 3-2

Tabla 3-2: Granulometría de los Agregados.

Tamices			Porcentaje que pasa (%)			
ASTM	**mm**	**mm a 45**	**¾”**	**½”**	**Polvo roca**	**RAP**
¾”	19	3,76	100	100	100	100
½”	12,5	3,12	35	100	100	92
3/8”	9,5	2,75	2	70	100	85
N°4	4,75	2,02	1	5	88	66
N°8	2,36	1,47	1	2	62	49
N°16	1,18	1,08	1	2	45	36
N°30	0,63	0,81	1	2	32	26
N°50	0,315	0,59	1	2	24	18
N°100	0,15	0,43	1	2	17	13
N°200	0,075	0,31	0,8	1,6	12,6	9

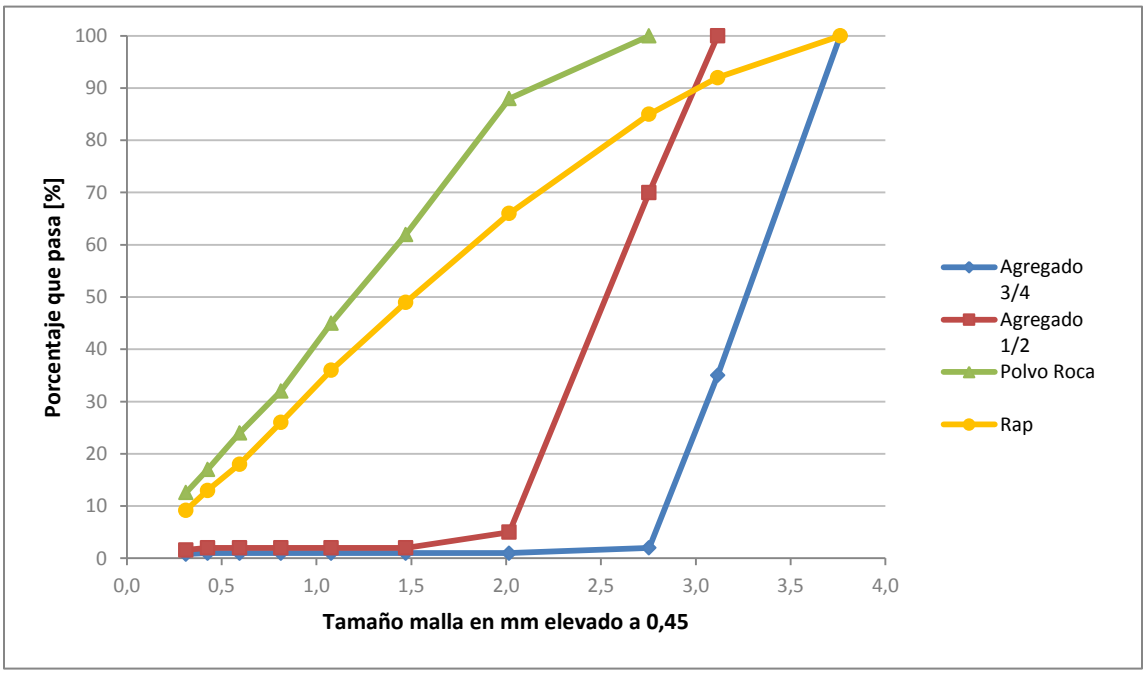


Gráfico 3-1: Granulometría de cada acopio de agregados.

Con el objetivo de caracterizar cada acopio y seleccionar la mezcla correcta, se debe determinar la gravedad especifica bruta, Gsb (*brut specific gravity, Gsb*) para cada agregado mediante norma ASTM C127. Esta gravedad es equivalente a la densidad real seca, dividida por la densidad del agua de la sección 8.202.20 del M.C. Además, se debe determinar la gravedad especifica aparente (*apparent specific gravity, Gsa*) mediante norma ASTM C128, que es equivalente a la densidad neta, dividida por la densidad del agua de la sección 8.202.21 del M.C. En la tabla 3-3 se muestran los resultados de estas gravedades para cada acopio de agregados.

Tabla 3-3: Gravedad Específica Bruta y Aparente para cada acopio de Agregados

Ensayo	¾”	½”	Polvo Roca	RAP
Gsb	2,692	2,680	2,597	2,541
Gsa	2,795	2,792	2,770	-
Absorción de Agua	1,2	1,3	1,7	-

3.1.2.3 Propiedades de Consenso

A continuación se describen los procedimientos de cada ensayo que permiten evaluar las propiedades de Consenso.

- *Angularidad del agregado grueso.*

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM D5821, la cual define una cara fracturada cuándo la proyección de ésta, en una determinada dirección, cumple con ser al menos, un 25% de la máxima sección transversal de la partícula (ver FIG.1 de norma ASTM D5821). Para efectos prácticos, también se considera la definición de material chancado que entrega la sección 8.202.6 del M.C, como aquella que posee 2 o más caras fracturadas y que por ello tiene al menos una arista, entendiéndose esta última como una línea que resulta de la intersección de dos superficies fracturadas.

Debido a que el ensayo se realiza para el agregado grueso, se debe determinar el contenido de partículas fracturadas para el material retenido sobre el tamiz de malla #4 (4,75 mm). Luego se fija la masa mínima para la muestra de ensaye, dependiendo del NMAS del agregado, de acuerdo a la tabla del punto 7.2 de la norma en cuestión.

Se debe lavar el agregado y se deja secar hasta obtener una masa constante a 110°C por 24 hrs.

La muestra se separa en dos categorías: partículas que cumplan con el criterio de partículas fracturadas y aquellas que no. Para el grupo de partículas fracturadas, se debe determinar aquellas que tengan 1 o más caras fracturadas y 2 o más caras fracturadas. Finalmente, se determina el porcentaje en peso que representan ambas categorías de partículas fracturadas respecto a la muestra total.

- *Angularidad del agregado fino.*

Este ensayo se ejecuta de acuerdo a la norma ASTM C1252, mediante el método B. Se entiende que mientras mayor sea la angularidad del agregado, mayores serán los vacíos en el agregado mineral (VAM) a obtener.

Previamente, se debe calibrar el cilindro y determinar su volumen. Primero, se registra el peso del cilindro. Luego, se aplica una capa ligera de grasa en el borde superior del cilindro. Se registra el peso del cilindro en conjunto con la grasa y placa de vidrio juntos. Se debe rellenar el

cilindro con agua a una temperatura entre 18 y 24°C. Enrasar con placa de vidrio evitando que queden burbujas y pesar. Determinar volumen del cilindro (V), de acuerdo a los cálculos del punto 8.2 de la norma aludida.

Antes de comenzar con el ensayo, se debe lavar la muestra, secar y obtener una masa retenida mínima de 190 gr para cada malla de # 16,30 y 50. Luego, utilizando un embudo estándar y el cilindro calibrado se ejecuta lo siguiente: tapar la parte inferior del embudo y verter la muestra como se muestra en la foto 3-1. Luego, se deja caer en el cilindro destapando parte inferior del embudo. Después se enrasa lo que sobre de muestra. Previamente se debe tener la pesa tareada con peso del cilindro calibrado. Obtener peso de árido. Repetir estos pasos dos veces para cada fracción retenida y obtener promedio.

Con el Gsa del agregado, la masa de cada fracción y el volumen del cilindro calibrado, obtener el volumen de huecos no compactados para cada fracción retenida de acuerdo a los cálculos del punto 11.1 de la norma.

Ilustración 3-1: Procedimiento Ensayo de Angularidad del agregado fino

- *Partículas planas y alargadas.*

Este ensayo está definido por la norma ASTM D4791, específicamente el método B. Al igual que los ensayos anteriores, el agregado se debe lavar y secar hasta obtener una masa constante. Para cada NMAS ocupar la masa mínima que establece la tabla del punto 7.2 de la norma. Se separa la muestra en tamiz #4 (4,75 mm) y se divide cada fracción en 10% o más respecto a la muestra original hasta obtener 100 partículas aproximadamente. Luego se hacen dos grupos: aquellas que cumplan con el criterio de planas y alargadas y las que no.

El porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre la máxima y mínima dimensión sea mayor que 5, corresponderá a partículas planas y alargadas.

- *Contenido de arcilla o Equivalente de arena*.

Este ensayo se realiza en base a la norma ASTM D2419.

Se debe considerar la fracción del agregado menor a 4,75 mm. Se agita cilindro que contiene la fracción de muestra de agregado mezclada con una solución floculante que permite separar la arena de arcilla, forzando a que el material arcilloso entre suspensión por encima del agregado granular.

Se espera hasta que la arena sedimente y se mide la altura de la arcilla suspendida y la de arena sedimentada. Luego se obtiene una relación entre ambas alturas, lo que representa el valor de equivalente de arena.

Al evaluar las propiedades de consenso del RAP, se debe tener en cuenta separar la fracción fina de la gruesa. Para la fracción retenida en sobre la malla #4 se evaluará la angularidad del agregado grueso y las partículas planas y alargadas. El material que pasa la malla #8 es ocupado para la angularidad del agregado fino.

El ensayo de equivalente de arena no es necesario evaluarlo por tratarse de agregado que ha sido cubierto con asfalto y el contendido de arcilla, si es que hay, ha sido removido durante la extracción por solvente.

Ilustración 3-2: Procedimiento para el ensayo de contenido de arcilla.

En la tabla 3-4 se presentan los resultados obtenidos para cada ensayo descrito. Además, se corrobora que cumplan con requerimientos que exige el método Superpave para cada uno de ellos.

Tabla 3-4: Resultados para las Propiedades de Consenso.

ENSAYO	3/4"	1/2	P.R	RAP	REQUERIMIENTO SUPERPAVE
Angularidad del agregado grueso (1 o más caras) [%]	100	100	-	98	80 mín.
Angularidad del agregado grueso (2 o más caras) [%]	94	99	-	95	75 mín.
Angulalridad del Agregado Fino [%]	-	-	51	47	40 mín.
Partículas planas y alargadas [%]	0	0,7	0	0,7	10 máx.
Equivalente de arena [%]	-	-	57	-	45 mín.

3.1.2.4 Propiedades de origen.

A continuación se describen los procedimientos de cada ensayo que permiten evaluar las propiedades de Origen.

- *Tenacidad.*

Se mide a través del ensayo de Desgaste los Ángeles, establecido por la norma ASTM C131 y la sección 8.202.11 del M.C. En lo que se refiere a la preparación de la muestra, ésta se debe cortar en la malla # 8 antes de lavar. Luego dejar secando hasta masa constante en horno a una temperatura de 110 ±5°C.

Realizar granulometría del agregado, procurando que el material quede separado en las fracciones resultantes del tamizado.

Se escoge un grado del ensaye (A, B, C, D) que mejor represente la granulometría de la muestra. Una vez escogido el grado, se verifica la masa inicial mínima de la muestra, el número y masa de las esferas a utilizar y el número de revoluciones.

Después, el material es sometido al impacto y triturado por medio de esferas de acero, al interior de un tambor de acero giratorio. La máquina se debe rotar a una velocidad entre 30 y 33 rpm. Finalmente, se mide la diferencia entre la masa que pasa por el tamiz #12 (1,7 mm), antes y después de haber sido sometida al ensayo. El resultado del ensayo es el porcentaje de pérdida en peso del agregado durante el ensayo.

- *Durabilidad.*

Este ensayo se basa en lo detallado en la sección 8.202.17 del M.C en conjunto la norma ASTM C88.

Consiste en someter a varios ciclos de saturación y secado los diferentes tamaños de la fracción de agregado grueso, mediante el empleo de una solución de sulfato de sodio o magnesio y medir la diferencia de antes y después del ensayo. Con esto, se busca estimar la resistencia del agregado al deterioro por acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento.

- *Materiales deletéreos.*

Los materiales deletéreos son definidos como el porcentaje en peso de materiales como madera, mica, carbón, entre otros, que se pueden mezclar con los agregados.

Se realiza mediante la norma ASTM C142. Consiste en tamizar el agregado, por vía húmeda. Si se hace sobre fino, se debe cortar el agregado por malla #16 y trabajar con la fracción retenida. La muestra debe tener una masa de al menos 25 gr. Para el agregado grueso, utilizar la tabla del punto 7.2 de la norma para seleccionar la masa mínima muestra.

El porcentaje en peso del material perdido como resultado del tamizado húmedo se informa como el porcentaje de la masa de arcilla y partículas friables.

En la tabla 3-5 se presentan los resultados obtenidos para cada ensayo descrito. Además, se corrobora que cumplan con requerimientos que exige el método Superpave para cada uno de ellos.

Tabla 3-5: Resultados para las Propiedades de Origen.

ENSAYO	3/4"	1/2	P.R	RAP	REQUERIMIENTO SUPERPAVE
Tenacidad [%]	11,1	13,4	15,5	-	40
Durabilidad [%]				-	20
Desintegración por Sulfato de Sodio	3,50	3,40		-	
Desintegración por sulfato de Magnesio	4,40	4,50		-	
Materiales Deletéreos [%]	0,00	0,00	0,80	-	4
Carbón y lignitos [%]	No detectados	.		-	4

3.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL AGREGADO

Con el objetivo de seleccionar la estructura del agregado de diseño, el método Superpave exige elaborar al menos tres mezclas de agregados de prueba que cumplan con las propiedades de consenso y origen, que sean distintas en su conformación (graduación fina, intermedia y gruesa) y cumplan con los requerimientos de la granulometría de control.

Las granulometrías de las mezclas de prueba son determinadas combinando en distintas proporciones las pilas de acopios de los agregados seleccionados. Esta primera etapa, se realiza mediante un proceso de prueba y error, el cual consiste en encontrar una dosificación de materiales que satisfaga los requerimientos de la especificación Superpave. La estructura del agregado definitiva será aquella que cumpla con los criterios para los parámetros volumétricos, respecto a un determinado contenido de ligante asfáltico inicial.

Las mezclas Superpave establecen seis tamaños máximos nominales (37.5, 25, 19, 12.5 ,9.5 y 4,75 [mm]) para definir las granulometrías del agregado. Para cada uno de ellos, se utilizan cuatro tamaños de malla para establecer los límites superiores e inferiores por los cuáles debe pasar la estructura del agregado de la mezcla prueba seleccionada. Para el caso de la mezcla diseñada, el proyecto establece un NMAS (*"Nominal Maximum Aggregate Size"*) de 19 [mm].

3.2.1 Selección de las granulometrías de Prueba.

Se realizan distintas combinaciones matemáticas usando las granulometrías individuales de cada acopio con el objetivo de encontrar una dosificación que cumpla con los límites establecidos previamente. En la tabla 3-6 se presentan las proporciones para cada acopio que cumplen con los puntos de control y la banda granulométrica, para una mezcla de NMAS de 19[mm].

Tabla 3-6: Porcentaje utilizado para cada acopio.

Acopio [%P]	MAC virgen			MAC con 15% RAP		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
¾"	20	20	15	25	28	28
½"	39	35	35	23	27	24
Polvo Roca	41	45	50	37	30	33
RAP	-	-	-	15		

En la tabla 3-7 se presentan los datos de las 6 mezclas de pruebas elaboradas, 3 para las MAC vírgenes y otras 3 para las MAC con 15% de RAP. Se determina que todas las granulometrías seleccionadas cumplen con los puntos de control y la banda de trabajo especificada por el proyecto. En los gráficos 3-2 y 3-3, se puede apreciar con mayor facilidad el cumplimiento de estos requerimientos.

Tabla 3-7: Granulometrías de prueba para las MAC vírgenes y con 15% de RAP

Tamiz [ASTM]	Mezcla de prueba sin RAP			Mezclas de prueba con 15% RAP			Puntos de control para ¾" Nmas.		Banda de trabajo	
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	Min	Max	Min	Max
¾"	100	100	100	100	100	100	90	100	100	
½"	88	88	90	83	81	81	-	90	85	90
3/8"	69	70	75	66	62	63	-	-	70	80
N°4	38	42	46	44	38	40	-	-	41	49
N°8	26	29	32	31	27	29	23	49	28	36
N°16	18	21	23	23	20	21	-	-	19	27
N°30	14	15	17	16	14	15	-	-	14	21
N°50	10	11	12	12	10	11	-	-	9	15
N°100	8	9	9	9	8	8	-	-	7	11
N°200	6,0	6,4	7	6,6	5,8	6,1	2.0	8.0	5,5	7,0

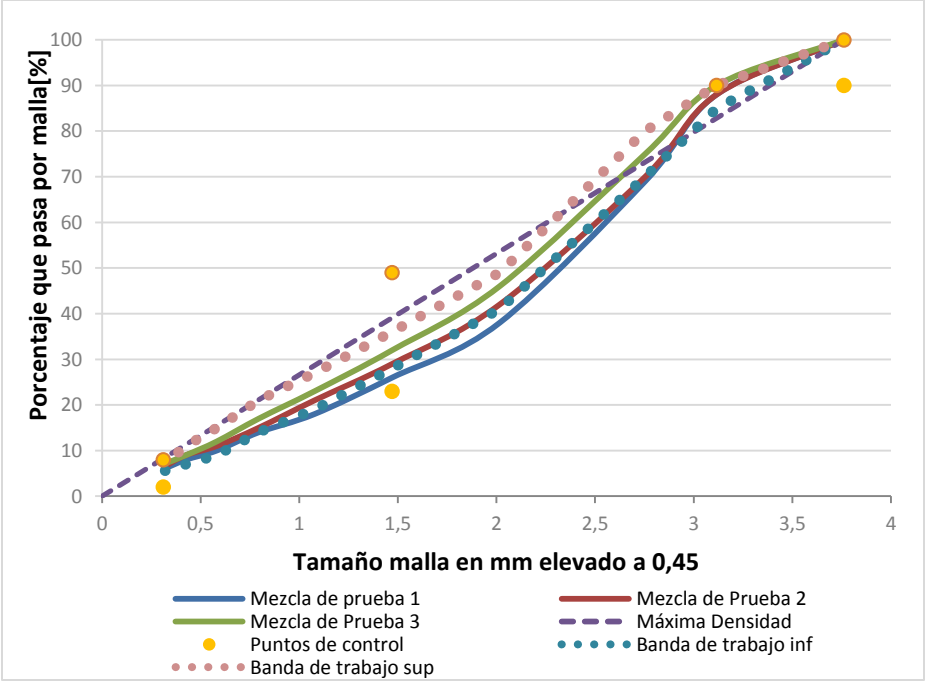


Gráfico 3-2: Granulometrías de prueba para las MAC vírgenes.

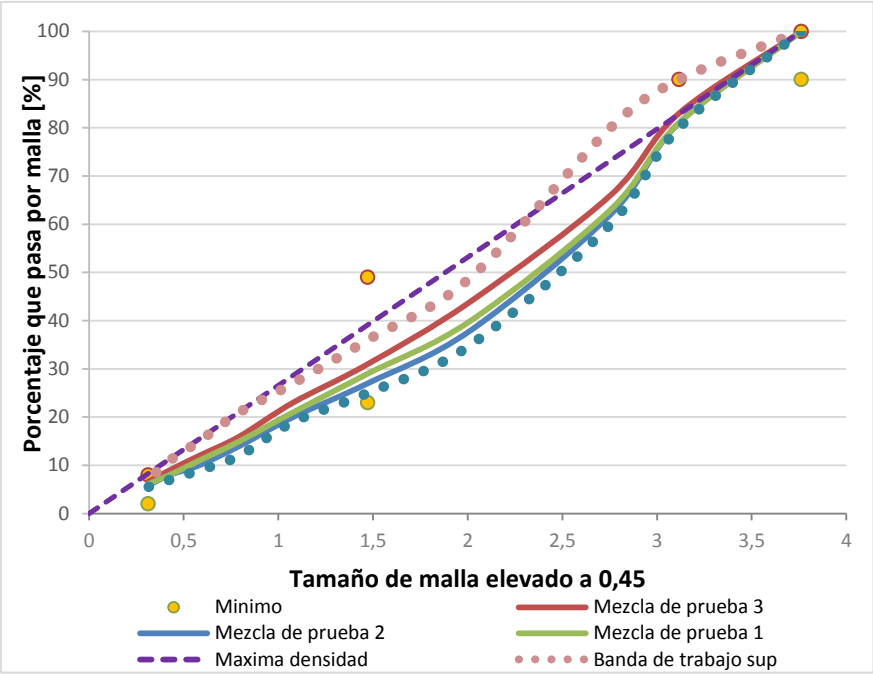


Gráfico 3-3: Granulometrías de prueba para las MAC con 15% de RAP.

Una vez seleccionadas las granulometrías de prueba, se obtienen las propiedades de cada mezcla de agregado, ponderando las propiedades de cada pila de acopio. Los resultados se presentan en la tabla 3-7. Al respecto, se verifica que todas las mezclas de pruebas definidas para cada diseño cumplen con los requerimientos exigidos.

Tabla 3-7: Propiedades de las mezclas de prueba ponderando los valores de cada pila de acopio.

GRAVEDADES ESPECÍFICAS							
Propiedades	**Mezcla sin RAP**			**Mezcla con 15% RAP**			Requerimiento Superpave
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	
Gsb	2,648	2,645	2,640	2,631	2,638	2,635	-
Gsa	2,783	2,782	2,781	-	-	-	-
PROPIEDADES DE CONCENSO							
Angularidad del agregado grueso (1 o más caras) [%]	99%-96%			90%-94%			95%-90% mín.
Angulalridad del Agregado Fino [%]	51%	51%	51%	49%	49%	49%	40 mín.
Partículas planas y alargadas [%]	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	10 máx.
Equivalente de arena [%]	57%			57%			45 mín.
PROPIEDADES DE ORIGEN							
Tenacidad	11,1	13,4	15,5	11,1	13,4	15,5	40 máx.
Durabilidad	3,7	3,8	3,7	3,7	3,8	3,7	20 máx.
Materiales Deletéreos	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	4 máx.

3.2.2 Contenido de asfalto de prueba.

Se busca establecer un contenido de asfalto que genere un porcentaje cercano al 4% de vacíos de aire en la mezcla compactada. Para ello, se utiliza el siguiente criterio, que entrega una aproximación inicial del contenido de asfalto que deben tener las mezclas de prueba.

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

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

Ecuación 3-1: Estimación Gravedad Específica Efectiva. [14]

El Volumen de Ligante Asfáltico (V_{ba}) absorbido en el agregado se estima con:

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

Ecuación 3-2: Estimación del volumen de ligante asfáltico absorbido. [14]

Donde:

Ps Porcentaje de Agregado (Se ha supuesto un 95%).

Pb Porcentaje de ligante asfáltico. (Se ha supuesto un 5

Gb Gravedad específica del ligante. (Se ha supuesto 1,02).

Va Volumen de vacíos de aire. (Se fija un valor de 0,04)

El Volumen de Ligante Efectivo (V_{be}) se determina según la siguiente ecuación:

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

Ecuación 3-3: Estimación del Volumen de Ligante Efectivo. [14]

Donde:

Sn: tamiz máximo nominal de la mezcla de agregados en pulgadas.

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

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

Ecuación 3-4: Estimación del contenido de prueba inicial de ligante asfáltico. [14]

Donde se tiene que:

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

Ecuación 3-5: Estimación del peso del agregado en gramos. [14]

Donde:

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

W_s: Peso del Agregado [g].

A continuación, en la Tabla 3-9 se entregan los resultados obtenidos para los parámetros que permiten obtener el contenido de prueba inicial de ligante asfáltico (P_{bi}) para cada mezcla de prueba del diseño de MAC virgen.

Tabla 3-8: Resultados de Parámetros para Contenido de Asfalto de Prueba

Mezcla de prueba	Gse (est)	Vba (est)	Vbe (est)	Pbi
1	2,734	3,274	8,943	5,17
2	2,738	3,164	8,943	5,12
3	2,736	3,193	8,943	5,14

Se determina utilizar un contenido de asfalto inicial de 5,2%, correspondiente al promedio de las 3 mezclas de prueba.

3.2.3 Contenido de Asfalto en el RAP.

De la extracción realizada a la muestra de RAP, se obtuvo que éste contiene un 4,3% de ligante asfáltico, con respecto a la muestra total.

La ecuación 3-6 representa la forma de calcular la cantidad de asfalto virgen que se necesita incorporar en la mezcla, para alcanzar un determinado porcentaje de asfalto total en la MAC final.

$$Masa\ Asfalto\ virgen = Mtotal * \left(P_b - P_{RAP} * P_{b,rap}\right)$$

Ecuación 3-6: Estimación cantidad de asfalto virgen a incorporar.

Dónde:

$\boldsymbol{Mtotal}$: : Masa total de la mezcla (considera masa agregado más el ligante asfáltico)

$\boldsymbol{P_b}$: : Porcentaje de asfalto de la mezcla de prueba o diseño. (Referido a la mezcla total)

$\boldsymbol{P_{RAP}}$: : Porcentaje de RAP a incorporar en la mezcla de prueba o diseño.

$\boldsymbol{P_{b,rap}}$: : Porcentaje de ligante asfáltico contenido en el RAP.

3.2.4 Elaboración de especímenes.

Una vez seleccionadas las mezclas de agregados y el contenido de ligante asfáltico inicial, se procede a elaborar los especímenes de mezcla con el fin de seleccionar la estructura definitiva del agregado de diseño.

A continuación, se presenta el procedimiento utilizado para la preparación de la mezcla y posterior compactación.

3.2.4.1 Preparación de la mezcla.

1. El día antes se debe mezclar las proporciones de agregado de los distintos acopios de ¾”, ½”, polvo roca y RAP, según corresponda a la granulometría de la mezcla a elaborar. Los agregados vírgenes se mezclan en un recipiente y se dejan a 100°C. En otro, se deja acondicionando el RAP a 50°C, ambos agregados durante toda la noche.
2. A primera hora del día siguiente, se debe colocar los agregados y el asfalto a temperatura de mezclado (175-184° [C]). Ambos materiales tardan aproximadamente 2 horas en alcanzar dicha temperatura. Se debe monitorear constantemente la temperatura del asfalto hasta que alcance la temperatura deseada, ya que si se mantiene más del tiempo necesario puede conllevar a un envejecimiento excesivo. Al mismo tiempo, se debe cambiar uno de los recipientes con RAP a 50°C, a otro horno que se encuentre a 110°C (se recomienda dejar el día anterior dicho horno a 110°C para uso exclusivo del RAP). Al igual que el asfalto, no debe exceder las 2 horas de acondicionamiento. Para ello, se debe tener en cuenta la mezcla que se realizará primero, pues será el RAP que utilice ésta el que se tendrá que cambiar primero de horno. Se sugiere dejar un desfase de 20 a 30 minutos entre el mezclado de cada espécimen.

Esto se debe al tiempo que demora cada mezcla en alcanzar la temperatura de compactación después de las 4 horas de acondicionamiento a 135[°C].

3. 30 [Min] antes de mezclar, se debe revolver el ligante asfaltico verificando que éste fluya rápidamente. Además se enciende cocinilla para que la cama de arena; sobre la cual se revolverá la mezcla, esté caliente al momento de mezclar.

4. Finalizada las 2[hrs] se procede a mezclar. Se retira el agregado virgen y se mezcla con RAP registrando la temperatura. Si la mezcla de agregados ha alcanzado la temperatura adecuada (alrededor de 190°C), se procede con el ligante asfaltico.

5. Formar un cráter en el centro y verter el asfalto cuidadosamente hasta el contenido que corresponda, de acuerdo al tipo de mezcla que se esté elaborando. (Prueba, diseño o desempeño).

6. Colocar el recipiente sobre cama de arena y revolver manualmente a fondo, de tal manera que no quede ninguna partícula sin cubrir con asfalto, verificando que se cumpla con la temperatura de mezclado.

7. Finalizada la operación, el Instituto del Asfalto y la norma AASHTO R30 recomiendan acondicionar la mezcla por 4 horas a 135°C, para agregados cuya absorción de agua sea mayor a 2%. El propósito de acondicionar la mezcla es permitir la absorción del ligante asfáltico durante el proceso de diseño.

8. Revolver la mezcla cada 60 ±5 [min] para mantener la condición uniforme.

Recomendaciones:

Trabajar con 4 hornos, uno para calentar los agregados vírgenes a 200°C, otro para el acondiconamiento del RAP a 110°C, otro para el acondicionamiento del asfalto a 190°C y un último para el acondicionamiento de la mezcla a 135°C.

Ilustración 3-3: Procedimiento de mezclado.

Antes de las 2 horas. **Después de las 2 horas.**

Ilustración 3-4 : Acondicionamiento del RAP a una temperatura de 110[°C] por 2 [horas]

3.2.4.2 Compactación de la mezcla.

De acuerdo requerimientos de la ETE N°1A, la compactación de las probetas deben cumplir con un número de giros de diseño ($N_{diseño}$) de 75 un número máximo de giros ($N_{máximo}$) de 75.

Para las probetas en las que se determinen los parámetros volumétricos, se recomienda ocupar una masa de 4700 [gr] y que las gravedades específicas de la mezcla de agregados varíe entre 2,55 y 2,70. [gr/cm3].

Debido a que posteriormente se necesita determinar la densidad real de las probetas (Gmb), se exige que estas tengan un diámetro de 150 mm y que cumplan con una altura para los giros de diseño y máximo de 115±5 [mm].

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

1. Finalizada las 4 horas de acondicionamiento de la primera mezcla se debe llevar a la temperatura de compactación [155-161°C]. Dependiendo de la masa, se tarda entre 20 a 30 [Min] en alcanzar una temperatura de 15°C mayor que la temperatura de compactación (para lograr esto se recomienda dejar horno a 190°C). Este tiempo puede variar dependiendo de la masa de mezcla, a menor masa, menos se demora en alcanzar la temperatura de compactación.

2. Para la compactación, el laboratorio LEMCO, cuenta con 3 moldes, por lo que se pueden compactar un máximo de 3 probetas por día.

3. Mientras la muestra se está acondicionando, se debe calibrar la presión, ángulo y altura del compactador. Además se deben definir el número máximo de giros (Nmáx), que en este caso corresponde a 115. Asimismo, una hora antes de la compactación del primer espécimen, se recomienda colocar los moldes platos en el horno a temperatura de compactación. (Idealmente el horno debe estar a 200°C). Esto se realiza con el fin de reducir las pérdidas de temperatura durante la compactación.

4. Retirar molde y dos platillos del horno.

5. Colocar primer platillo dentro del molde y un disco de papel con desmoldante. Además cubrir manto de los moldes con desmoldante.

6. Sacar mezcla de horno, revolver y colocar en receptáculo, evitando la menor pérdida de material posible. De igual forma, llevar la mezcla del receptáculo al molde, nivelarla con espátula y colocar papel con desmoldante. Luego, colocar el segundo platillo y colocar molde dentro del compactador, de tal manera que quede centrado respecto al pistón que aplicará la presión.

7. Iniciar la compactación. El SGC se detendrá hasta alcanzar la máxima cantidad de giros para la cual fue programada. La altura debe ser constantemente monitereada. Se recomienda registrar la altura para N ini, Ndis y Nmáx. Para N diseño y Nmax. se debe cumplir la altura de 115±5.

8. Se recomienda desmoldar las probetas al día siguiente.

3.2.5 Pruebas fundamentales de la mezcla asfáltica.

Existen dos estados en la mezcla donde nuevamente se utiliza el concepto de gravedad específica: cuando está suelta y luego compactada.

En la primera condición, se calcula la Gravedad específica Máxima de la Mezcla Asfáltica, Gmm, la que considera el volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos de aire. Este parámetro permitirá obtener el porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica diseñada con un determinado contenido de ligante asfáltico.

En el segundo estado, se evalúa la Gravedad Específica Bruta de la Mezcla Asfáltica Compactada, Gmb, la que utiliza en sus cálculos el volumen de mezcla asfáltica compactada.

A continuación, se explican los ensayos para determinar estos dos parámetros. .

3.2.5.1 Determinación de la Gravedad específica teórica máxima.

Éste ensayo se realiza mediante la norma ASTM D2041. Básicamente consiste en saturar la mezcla aplicando vacío, con el fin de extraer todo el aire que contiene. Para ello, se utiliza un mínimo de 2 muestras necesarias para la determinación de la gravedad específica teórica máxima de cada una de las mezclas de prueba en estado suelto. La masa de la muestra depende del NMAS de la mezcla, variando de 1500 a 5000 [gr].

1. La masa de la muestra se determina de acuerdo al punto 7.3 de la norma en cuestión.
2. Seguir procedimiento de mezclado.
3. Una vez que la muestra esté seca y aún caliente, esparcir en mesón y separar las partículas manualmente, evitar fracturar el agregado y eliminar aquellas que no hayan sido cubiertas completamente por el ligante asfáltico.
4. Enfriar muestra a temperatura ambiente y luego pesar. (A)
5. Rellenar matraz con agua a 25°C hasta la marca de aforo y registrar peso.
6. Eliminar agua y colocar muestra en matraz, rellenar con agua a 25[°C] hasta 2 dedos sobre el nivel alcanzado por la muestra. No olvidar colocar la tapa al matraz.
7. Iniciar agitación manual e inmediatamente comenzará a removerse el aire atrapado en la muestra y gradualmente incrementando la presión de vacío hasta la presión residual del manómetro el cual debería ser alcanzado rápidamente. Después se debe regular la presión de la bomba hasta los 21 in mm.
8. Se debe golpetear y agitar constantemente el matraz hasta lograr eliminar todo el aire al interior de la muestra durante 15±2 [min].
9. Se verá como las bubujas de aire suben. A medida que pasa el tiempo estas van a ir disminuyendo.
10. Finalizado los 15 min se baja lentamente la presión de la bomba (hasta la presión residual) y se apaga. Se quita la manguera y se procede a rellenar el matraz con agua hasta la marca de aforo. Se debe dejar caer cuidadosamente el agua al interior del matraz puesto que se debe evitar el ingreso de aire en la muestra.
11. Se pesa y se registra.

Luego, el Gmm se calcula como sigue:

$$Gmm = \frac{A}{(A + D - E)} * pw$$

Ecuación 3-7: Determinación de la Gravedad máxima teórica de la mezcla suelta [14]

Dónde:

A: Masa de la muestra seca al aire (gr)

D: Masa del matraz lleno con agua a 25[°C] (gr)

E: Masa del recipiente lleno con agua y la muestra a 25[°C]

pw: Densidad del agua (se usa generalmente 997,1 [kg/m3]

Ilustración 3-5: Desprendimiento de partículas para obtener la máxima densidad de la mezcla suelta

Ilustración 3-6: Vaciado de la mezcla en matraz.

Ilustración 3-7: Eliminación de vacíos de aire.

3.2.5.2 Determinación de la Gravedad específica teórica máxima del RAP.

Para el RAP se realiza el mismo procedimiento anteriormente descrito, salvo por las siguientes consideraciones al momento de mezclar:

1. Se debe acondicionar el Rap a 110°C no más de 2 hrs.
2. Revolver a fondo el Rap, de tal manera que el ligante envejecido cubra todas las partículas.
3. Se debe agregar entre un 1 y 3% de ligante asfáltico virgen con respecto al total de la mezcla, para así cubrir la totalidad de las partículas.
4. La mezcla se debe mezclar a no más de 120°C.

3.2.5.3 Determinación de la Gravedad Específica Bruta de la Mezcla Asfáltica Compactada.

Éste ensayo se realiza en base a la norma ASTM D2726, la cuál indica que sólo se realiza para especímenes de mezcla compactada con una absorción de agua menor o igual a 2% del volumen del espécimen.

Se recomienda dejar una probeta extra para evaluar dicha absorción

La norma establece los siguientes pasos a seguir:

1. Determinar masa seca del espécimen en aire (A)
2. Se recomienda dejar espécimen acondicionando a 25° [C] por media hora.
3. Sumergir espécimen bajo agua a una temperatura de 25±1 [°C] por 3 a 5 [min]. Si la temperatura del espécimen difiere en 2[°C] respecto a la temperatura del agua dejarlo entre 10 y 15 min. Observar que el agua dejará de escurrir y el registro de la pesa se detendrá. (C)
4. Remover espécimen del agua y secar superficialmente con un paño húmedo. La idea es que se una absorción rápida. Determinar masa en aire. (B). Se recomienda que ésta etapa la realice siempre el mismo operador. Las probetas a usar en la determinación de parámetros volumétricos deben tener un diámetro de 150 mm y una altura de 115 mm. Se recomienda utilizar una masa de 4700 gr. aprox.

$$Gmb(medido) = \frac{A}{B - C}$$

Ecuación 3-8: Determinación de Gravedad específica bruta de la mezcla compactada. [14]

Donde:

A: Masa seca del espécimen al aire.

B: Masa saturada superficialmente seca.

C: Masa del espécimen bajo agua.

Ilustración 3-8: Determinación del Peso del espécimen en seco

Ilustración 3-9: secado superficialmente seco.

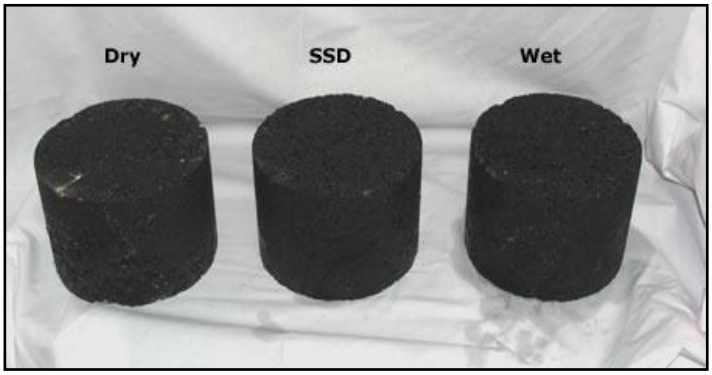


Ilustración 3-10: Las tres condiciones del espécimen para el ensayo.

3.2.6 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 para Ninicial, Ndis y Nmáx, considerando el diámetro del molde y la altura medida del espécimen.

Éste cálculo se supone que el espécimen es un cilindro de bordes lisos, lo cual dista de ser cierto. El volumen del espécimen es ligeramente menor que el volumen de un cilindro de bordes lisos, pues la superficie es irregular. Para corregir esta diferencia, en donde Gmb (est) es menor al Gmb (medido), el Gmb estimado a cualquier número de giros es multiplicado por la relación entre la gravedad específica bruta medida para Nmáx y la gravedad específica bruta estimada para Nmax.

Para corregir las densidades o gravedades se realiza lo siguiente:

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

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

Ecuación 3-9: Determinación de G_{mb} estimada. [15]

Donde:

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

W_m: Masa del espécimen [g]. -

V_{mezcla}: Volumen de probeta compactada [cm^3], se calcula usando:

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

Se calcula el factor de corrección, mediante la siguiente relación:

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

Ecuación 3-10: Determinación de factor de corrección. [15]

Donde:

G_{mb} (medida): Gravedad Específica bruta medida al $N_{diseño}$.

G_{mb} (estimada): Gravedad Específica bruta medida al $N_{diseño}$.

El G_{mb} (estimado) a otro nivel de compactación se determina usando:

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

Ecuación 3-11: Gravedad Específica Bruta corregida [15].

Donde:

G_{mb}(corregida): Gravedad Específica bruta corregida del espécimen a algún nivel de revolución.
C: factor de corrección
G_{mb} (estimada): Gravedad Específica bruta estimada a alguna revolución.

La tabla 3-9 y 3-10 entrega los resultados de las alturas para 5, 75 y 115 giros, el Gmb estimado para cada uno de estos giros, el Gmb medido para N máx, los factores de corrección y el Gmb corregido para Ninicial y N diseño.

Tabla 3-9: Resultados de Densificación de mezclas de prueba sin Rap.

Altura probeta [mm]	M1		M2		M3	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Nini	128,6	129,2	127	127,4	125,8	125,6
Ndis	116	116,5	114,7	114,9	113,5	113,5
Nmax	114,2	114,7	112,7	113,1	111,9	11,9
Área probeta [cm2]	176,71					
Peso total [g]	4640,5	4609,4	4625,2	4654,6	4646,8	4607,1
Gmb est @Nmax	2,299	2,274	2,322	2,329	2,350	2,330
Gmb est @Nini	2,042	2,019	2,061	2,067	2,090	2,076
Gmb est @Ndis	2,264	2,239	2,282	2,292	2,317	2,297
Gmb med @Nmax	2,394	2,389	2,410	2,424	2,422	2,414
C (factor de corrección)	1,041	1,050	1,038	1,041	1,031	1,036
Gmb corr @Nini	2,126	2,120	2,139	2,152	2,154	2,150
Gmb corr @Ndis	2,357	2,352	2,368	2,386	2,387	2,380

Tabla 3-10: Resultados de Densificación de mezclas de prueba con 15% de Rap.

Altura probeta [mm]	M1		M2		M3	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Nini	127,8	126,3	133,8	130,3	131,7	126
Ndis	113,9	112,7	119,8	116,7	117,8	112,6
Nmax	112,2	111	118,1	115	116,1	110,9
Área probeta [cm2]	176,71					
Peso total [g]	4647	4662,3	4640,1	4661,2	4620,5	4655,1
Gmb est @Nmax	2,344	2,377	2,223	2,294	2,252	2,375
Gmb est @Nini	2,058	2,089	1,962	2,024	1,985	2,091
Gmb est @Ndis	2,309	2,341	2,192	2,260	2,220	2,339
Gmb med @Nmax	2,426	2,446	2,336	2,389	2,354	2,450
C (factor de corrección)	1,035	1,029	1,051	1,042	1,045	1,031
Gmb corr @Nini	2,130	2,150	2,062	2,109	2,075	2,156
Gmb corr @Ndis	2,390	2,409	2,303	2,354	2,320	2,413

Finalmente, se calcula el % G_{mm} para cada uno de los especímenes de prueba. Para ello, se divide la G_{mb} (corregida) por el valor de G_{mm} medida. El promedio de los %G_{mm} para los especímenes homologados también es informado. El promedio de %G_{mm} se usa como base para la comparación entre las mezclas de prueba.

Los valores de Densificación de cada mezcla de prueba vírgenes y con 15% de RAP se presentan en la Tabla 3-11 y 3-12, respectivamente.

Tabla 3-11: Resultados para Densidades Máximas de mezclas vírgenes.

%Gmm	M1		M2		M3	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Gmm	2,469	2,469	2,481	2,481	2,486	2,486
%Gmm@Nini	86,1	85,9	86,2	86,7	86,6	86,5
%Gmm promedio @Nini	86,0		86,5		86,6	
%Gmm@Ndis	95,4	95,2	95,5	96,2	96,0	95,7
%Gmm promedio @Ndis	95,3		95,8		95,9	
%Gmm@Nmax	97,0	96,7	97,2	97,7	97,4	97,1
%Gmm promedio @Nmax	96,8		97,4		97,2	

Tabla 3-12: Resultados para Densidades Máximas de mezclas con 15% de RAP.

%Gmm	M1		M2		M3	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Gmm	2,495	2,495	2,475	2,475	2,483	2,483
%Gmm@Nini	85,4	86,2	83,3	85,2	83,6	86,8
%Gmm promedio @Nini	85,8		84,2		85,2	
%Gmm@Ndis	95,8	96,6	93,0	95,1	93,4	97,2
%Gmm promedio @Ndis	96,2		94,1		95,3	
%Gmm@Nmax	97,2	98,1	94,4	96,5	94,8	98,7
%Gmm promedio @Nmax	97,6		95,5		96,7	

Luego se grafican las curvas de densidad a partir de los %Gmm promedio para cada nivel de giro. Estos últimos se ajustan en la abscisa a Ln en base 10. Las curvas de densificación para ambos diseños de mezcla se encuentras representadas en los gráficos 3-4 y 3-5, represpectivamente.

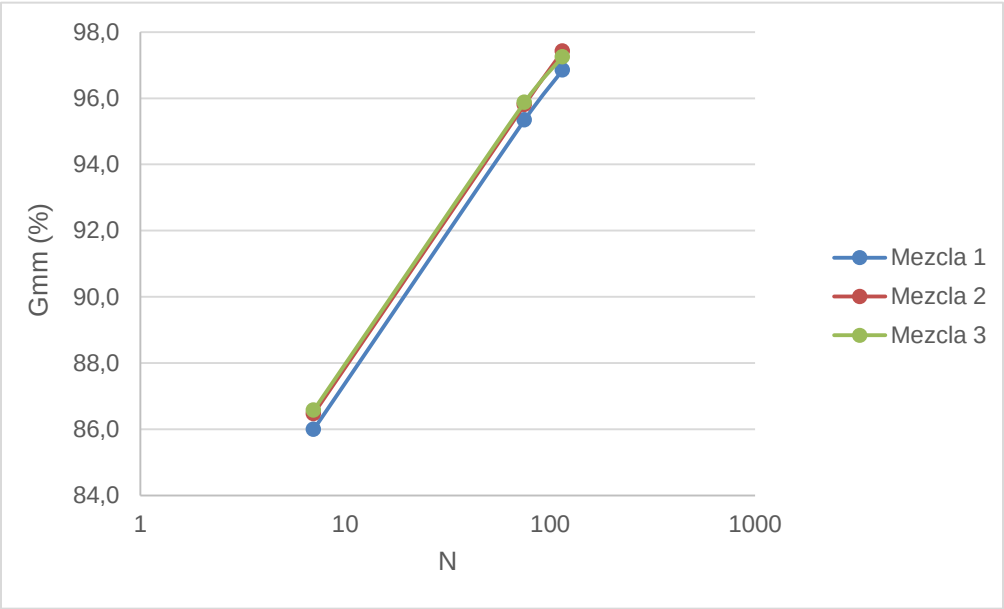


Gráfico 3-4: Curvas de Densificación para mezclas de prueba vírgenes.

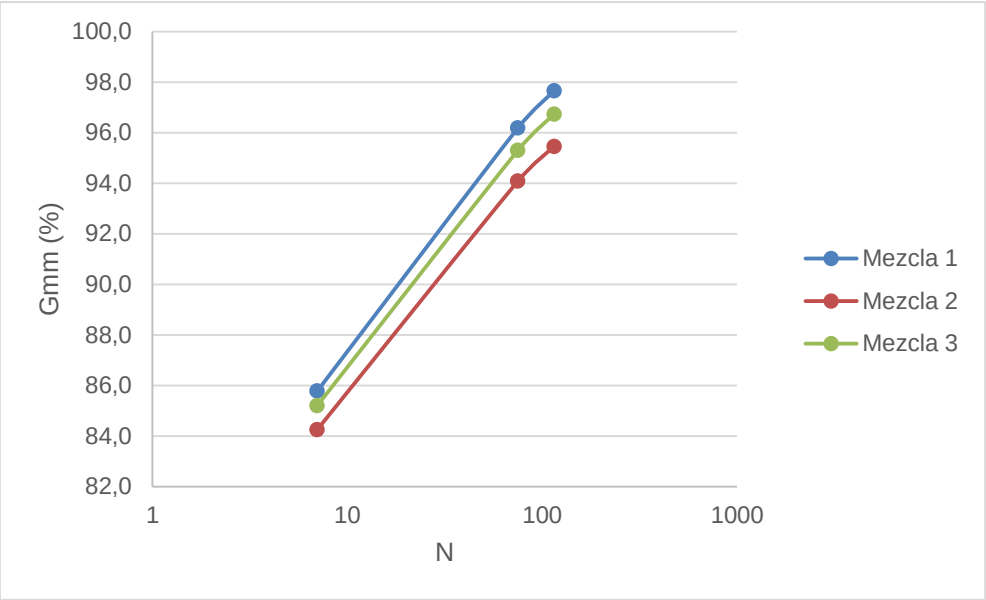


Gráfico 3-5: Curvas de Densificación para mezclas de prueba con 15% de RAP.

3.2.7 Parámetros volumétricos de las mezclas de prueba compactadas.

Terminada la densificación de las mezclas de prueba, se procede a determinar el contenido de vacíos de Aire para *N diseño* usando el contenido de asfalto inicial (Pbi) para cada mezcla de prueba.

Se determina el porcentaje de vacíos de aire (V_a) y Vacíos de Agregado Mineral (VAM) para $N_{diseño}$ de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$Va\ inicial = 100 - \%Gmm@Ndise\tilde{n}o$$

Ecuación 3-12: Porcentaje de Vacíos de aire en la mezcla de prueba. [14]

Luego, los vacíos en el agregado mineral se calculan de la siguiente forma:

$$VAM\ inicial = 100 - \frac{\%Gmm@Ndis * Gmm * Psi}{Gsb}$$

Ecuación 3-13: Determinación de Vacíos en el Agregado Mineral [14]

En la tabla 3-13 y 3-14 se resumen los valores de las propiedades volumétricas de las mezclas de prueba.

Tabla 3-13: Propiedades volumétricas de las mezclas de prueba vírgenes.

Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Contenido Asfalto de prueba	5,2	5,2	5,2
%Gmm @ Nini	86,0	86,5	86,6
%Gmm @ Ndis	95,3	95,8	95,9
%Gmm @ Nmáx	96,8	97,4	97,2
%Va inicial	**4,65**	**4,19**	**4,12**
%VAM inicial	15,47	14,81	14,70

Tabla 3-14: Propiedades volumétricas de las mezclas de prueba con 15% de RAP

Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Contenido Asfalto de prueba	5,3	5,3	5,3
%Gmm @ Nini	85,8	84,2	85,2
%Gmm @ Ndis	96,2	94,1	95,3
%Gmm @ Nmáx	97,6	95,5	96,7
%Va incial	**3,82**	**5,92**	**4,70**
%VAM inicial	13,63	16,41	14,96

El método Superpave estipula diseñar una mezcla con una densidad objetivo que permita alcanzar un 96% de G_{mm} o 4% de vacíos. Además, experiencias anteriores, han demostrado que los pavimentos que mantienen un nivel de vacíos alrededor de un 4% tienen un mejor desempeño a largo plazo. [14]

Bajo esta premisa, se puede observar en las tablas 3-13 y 3-14 que ninguna de las mezclas de prueba alcanzan exactamente los 4% de vacíos, por lo tanto, es necesario estimar un porcentaje de ligante asfáltico que permita alcanzar dicho porcentaje. [15]. Éste se calcula mediante la siguiente expresión:

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

Ecuación3-14: Determinación del contenido de ligante asfáltico estimado [14]

Donde:

$P_{b,\ estimado}$: porcentaje del ligante asfáltico estimado [%].
P_{bi}: porcentaje inicial de prueba del ligante asfáltico [%].

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

El VAM, VFA y las propiedades de compactación de la mezcla, se estiman para el contenido de ligante asfáltico estimado, usando las siguientes ecuaciones:

Para el VAM:

$$VAM\ estimado = VAM\ inicial + C * (4.0 - Va\ inicial)$$

Ecuación 3-15: Estimación del Vacío de Agregado Mineral para un 4% de Vacíos de Aire. [14]

Donde:

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

Para el VFA:

$$VFA\ estimado = 100 * \frac{(VAM\ estimado - 4.0)}{VAM\ estimado}$$

Ecuación 3-16: Estimación de los Vacíos Llenos de asfalto para un 4% de vacíos de aire [14]

Por último, se determina la proporción de polvo o filler (DP). El criterio más común para esta propiedad es el rango que varía entre 0,6 y 1,2, con las siguientes excepciones [15]

- Para mezclas de NMAS 4,75 [mm], el rango permitido es 0.9-2.0.
- Para mezclas gruesas, cuya granulometría pasa por debajo de la línea de máxima densidad, el rango incrementa a 0.8-1.6.

Como se puede apreciar en los gráficos 3-2 y 3-3, las granulometrías de las mezclas de prueba son gruesas, por lo que el criterio de aceptación se incrementa. Dicho criterio se debe cumplir para todos los niveles de tránsito. El factor se calcula como el porcentaje en peso del material que pasa el tamiz de 0.075 [mm], por vía húmeda, dividido por el contenido de ligante asfáltico efectivo.

Primero, se calcula contenido del ligante asfáltico efectivo, de la siguiente manera:

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

Ecuación 3-17: Estimación de ligante asfáltico efectivo a 4% de Va. [14]

Luego la proporción de polvo se calcula según:

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

Ecuación 3-18: Estimación de la proporción de Polvo para un 4% de Va. [14]

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

$$\%Gmm@Ninicial\ (est) = \%Gmm@Ninicial - (4\% - Pa\ inicial)$$

Ecuación3-19: Estimación % Gmm @N inicial para un 4% de vacíos de aire [14]

Para % Gmm para N máximo

$$\%Gmm@Nmaximo\ (est) = \%Gmm@Nmax - (4\% - Pa\ inicial)$$

Ecuación3-20: Estimación % Gmm @N máximo para un 4% de vacíos de aire [14]

En las tablas 3-15 y 3-16 se resumen los resultados de los pasos anteriores para cada una de las mezclas de prueba, comparándolos con requisitos Superpave para cada una de las propiedades volumétricas.

Tabla 3-15: Propiedades volumétricas corregidas para las MAC vírgenes.

Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Requisito Superpave
Pb estimado	5,43	5,27	5,25	-
%VAM (est)	15,34	14,77	14,67	>13
%VFM (est)	73,92	72,91	72,74	65-78
Pbe est	4,26	4,11	4,14	-
%Polvo/asfalto	1,57	1,20	1,13	0,8-1,6*
% Gmm N inicial (est)	86,64	86,66	86,69	≤ 90,5
% Gmm Nmax (est)	97,50	97,61	97,37	≤ 98,0

Tabla 3-16: Propiedades volumétricas corregidas para las MAC con 15% de RAP.

Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Requisito Superpave
Pb estimado	5,23	6,07	5,58	-
%VAM (est)	13,66	16,03	14,82	>13
%VFM (est)	70,72	75,04	73,01	65-75
Pbe est	4,10	5,37	4,71	-
%Polvo/asfalto	1,6	1,1	1,3	0,8-1,6
% Gmm N inicial (est)	85,59	86,17	85,90	≤ 89,0
% Gmm Nmax (est)	97,47	97,37	97,43	≤ 98,0

Para las MAC vírgenes todas las mezclas de prueba cumplen con los requerimientos Superpave, sin embargo, se selecciona la estructura de la mezcla 3 puesto que es una de las que arrojan menor contenido de asfalto estimado y es la que más se acerca al valor de 4% de vacíos.

Para las MAC con 15% de RAP se selecciona la mezcla 1 bajo el mismo criterio anterior.

3.3 SELECCIÓN DEL CONTENIDO DE ASFALTO DE DISEÑO.

Una vez seleccionada la estructura del agregado de diseño se compactan los especímenes con diferentes contenidos de ligante asfáltico, los cuales serán evaluados para determinar el porcentaje definitivo de diseño. Para el nivel 1 del sistema Superpave, basta con considerar sólo 4 contenidos de ligante asfáltico para el análisis.

En esta etapa, se deben confeccionar un mínimo de 2 especímenes para cada uno de los siguientes contenidos de asfalto:

- Contenido estimado del ligante.
- Contenido estimado de ligante ± 0.5% y
- Contenido estimado de ligante ± 1.0%

De esta forma, los porcentajes de ligante asfáltico para la mezcla 1 (MAC vigen) corresponden a: 4.75%, 5.25%, 5.75% y 6.25%. Por otra parte, los porcentajes de ligante asfáltico para la mezcla 3 (MAC con 15% de RAP) corresponden a: 4.7%, 5.2%, 5.7%y 6.2%.

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

Los resultados para la densificación de las mezclas de diseño para cada uno de los porcentajes mencionados se presentan en la tabla 3-17 y 3-18, respectivamente.

Tabla 3-17: Densificación de la mezcla de diseño virgen.

Altura probeta [mm]	M1		M2		M3		M4	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Nini	117	125,1	125,9	126,3	122,7	123,3	127,2	126,6
Ndis	113,2	112,9	113,9	114,2	110,9	111,1	114,5	114,2
Nmax	111,5	111,2	112,3	112,5	109,3	109,4	112,9	112,6
Área probeta [cm2]	176,71							
Peso total [g]	4636,2	4634,9	4629,9	4594,7	4624,8	4624,8	4804,1	4815,5
Gmb est @Nmax	2,353	2,359	2,333	2,311	2,394	2,392	2,408	2,420
Gmb est @Nini	2,242	2,097	2,081	2,059	2,133	2,123	2,137	2,152
Gmb est @Ndis	2,318	2,323	2,300	2,277	2,360	2,356	2,374	2,386
Gmb med @Nmax	2,430	2,425	2,415	2,434	2,447	2,434	2,437	2,439
C (factor de corrección)	1,033	1,028	1,035	1,053	1,022	1,017	1,012	1,008
Gmb corr @Nini	2,316	2,156	2,154	2,168	2,180	2,159	2,163	2,170
Gmb corr @Ndis	2,394	2,389	2,381	2,398	2,412	2,397	2,402	2,405

Tabla 3-18: Densificación de mezclas de diseño con 15% de RAP.

Altura probeta [mm]	M1		M2		M3		M4	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Nini	125,2	127,5	127	128,2	126,7	127,2	122,9	125,3
Ndis	112,1	113,7	113,9	114,8	112,7	113,8	110	111,3
Nmax	110,5	112	112,4	113,1	111	112,1	108,8	109,6
Área probeta [cm2]	176,71							
Peso total [g]	4647,2	4641,3	4656,3	4660,4	4653,3	4666,9	4804,1	4655,3
Gmb est @Nmax	2,380	2,345	2,344	2,332	2,372	2,356	2,499	2,404
Gmb est @Nini	2,100	2,060	2,075	2,057	2,078	2,076	2,212	2,102
Gmb est @Ndis	2,346	2,310	2,313	2,297	2,336	2,321	2,471	2,367
Gmb med @Nmax	2,431	2,448	2,427	2,429	2,436	2,429	2,437	2,436
C (factor de corrección)	1,021	1,044	1,035	1,042	1,027	1,031	0,975	1,013
Gmb corr @Nini	2,145	2,151	2,148	2,143	2,134	2,141	2,157	2,131
Gmb corr @Ndis	2,396	2,412	2,395	2,393	2,399	2,393	2,410	2,399

Las propiedades de la mezcla son evaluadas para la mezcla seleccionada con diferentes contenidos de ligante asfáltico, utilizando los valores de densificación más representativos para este diseño, como son $N_{inicial}$ (7 giros), $N_{diseño}$ (75 giros) y $N_{máximo}$ (115 giros).

En la Tabla 3-19 y 3-20 se presentan los valores de compactación para los distintos porcentajes de ligante asfáltico de cada una de las mezclas de diseño.

Tabla 3-19: Resultados para las Densidades Máximas de las mezclas de diseño virgen.

%Gmm	M1		M2		M3		M4	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Gmm	2,492	2,492	2,535	2,535	2,475	2,475	2,456	2,456
%Gmm@Nini	92,9	86,5	85,0	85,5	88,1	87,2	88,1	88,3
%Gmm promedio @Nini	89,7		85,2		87,7		88,2	
%Gmm@Ndis	96,1	95,9	93,9	94,6	97,5	96,8	97,8	97,9
%Gmm promedio @Ndis	96,0		94,3		97,1		97,9	
%Gmm@Nmax	97,5	97,3	95,3	96,0	98,9	98,3	99,2	99,3
%Gmm promedio @Nmax	97,4		95,6		98,6		99,3	

Tabla 3-20: Resultados para las Densidades Máximas de las mezclas de diseño con 15% de RAP

%Gmm	M1		M2		M3		M4	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Gmm	2,502	2,508	2,501	2,521	2,469	2,461	2,460	2,450
%Gmm@Nini	85,7	85,8	85,9	85,0	86,4	87,0	87,7	87,0
%Gmm promedio @Nini	85,7		85,5		86,7		87,3	
%Gmm@Ndis	95,8	96,2	95,8	94,9	97,2	97,2	98,0	97,9
%Gmm promedio @Ndis	96,0		95,4		97,2		97,9	
%Gmm@Nmax	97,1	97,6	97,1	96,4	98,6	98,7	99,0	99,4
%Gmm promedio @Nmax	97,4		96,7		98,7		99,2	

Luego, en los gráficos 3-6 y 3-7 se representan los resultados para las densificaciones de las mezclas diseño de las tablas 3-19 y 3-20.

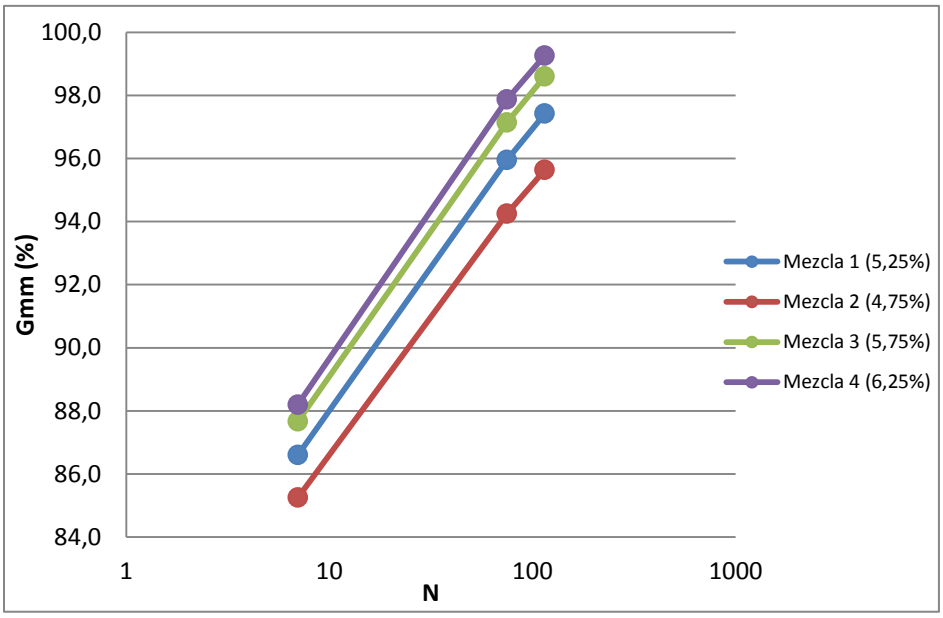


Gráfico 3-6: Curvas de densificación para las mezcla de diseño.

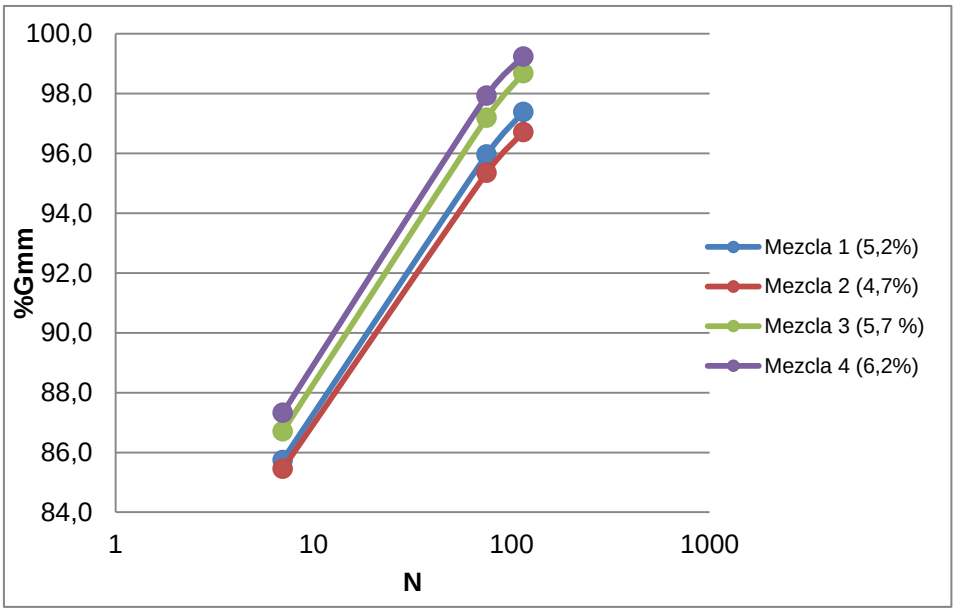


Gráfico 3-7: Curvas de densificación para las mezcla de diseño con 15% de RAP.

Se calculan las distintas propiedades volumétricas para $N_{diseño}$, con cada contenido de ligante asfáltico de prueba, presentados en las Tablas 3-21 y 3-22 para cada uno de los diseños de mezcla. Con estos datos, es posible generar las gráficas para los parámetros de contenido de vacíos de aire, VAM y VFA, en función del contenido de ligante asfáltico.

Tabla 3-21: Resumen de parámetros volumétricos para la mezcla de diseño.

Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Requerimiento Superpave
% Ligante	**5,3**	4,8	5,8	6,25	
Pa	4,0	5,7	2,9	2,1	
VMA	14,2	13,8	14,2	14,6	>13
VFA	71,5	58,4	79,8	85,5	65-78
Pbe	4,3	3,4	4,8	5,3	-
DP	1,6	2,0	1,5	1,3	0,8-1,6*
%Gmm@Nini	86,6	85,2	87,7	88,2	≤ 90,5
%Gmm@Ndis	96,0	94,3	97,1	97,9	≤ 98,0

Tabla 3-22: Resumen de parámetros volumétricos para la mezcla de diseño con 15% de RAP.

Propiedad	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Requerimiento Superpave
% Ligante	**5,2**	4,7	5,7	6,2	
Pa	4,0	4,6	2,8	2,1	
VMA	13,78	13,91	14,28	14,40	>13
VFA	70,70	66,63	80,37	85,67	65-75
Pbe	4,14	3,97	4,88	5,23	-
DP	1,7	1,8	1,4	1,3	0,8-1,6
%Gmm@Nini	85,7	85,5	86,7	87,3	≤ 89,0
%Gmm@Ndis	96,0	95,4	97,2	97,9	≤ 98,0

En la Tabla 3-21 se aprecia que la mezcla 1 requiere de un 5,3% de ligante asfáltico para cumplir con el 4% de vacíos, mientras que en la Tabla 3-22 la mezcla 3 alcanza el 4% de vacíos con un 5,2% de ligante asfáltico.

Las ETE exigen fijar un contenido de ligante asfáltico para un 3,5% de vacíos de aire (puesto que no existe compactación por tráfico en la pista). Dicho contenido de asfalto se interpola del gráfico de Vacíos de aire vs % ligante, siendo éste de 5,5% para la MAC virgen.

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

A partir de los resultados obtenidos, se generan los gráficos para analizar los cambios en las propiedades volumétricas en función del contenido de ligante asfáltico. Los parámetros graficados son:Vacíos de Aire, VAM, VFA, Proporción de polvo, %Gmm@Nini y %Gmm@Ndes. Además, se marcan los criterios exigidos según Superpave y las ETE.

3.3.1 Parámetros volumétricos para la mezcla base y con 15% de RAP.

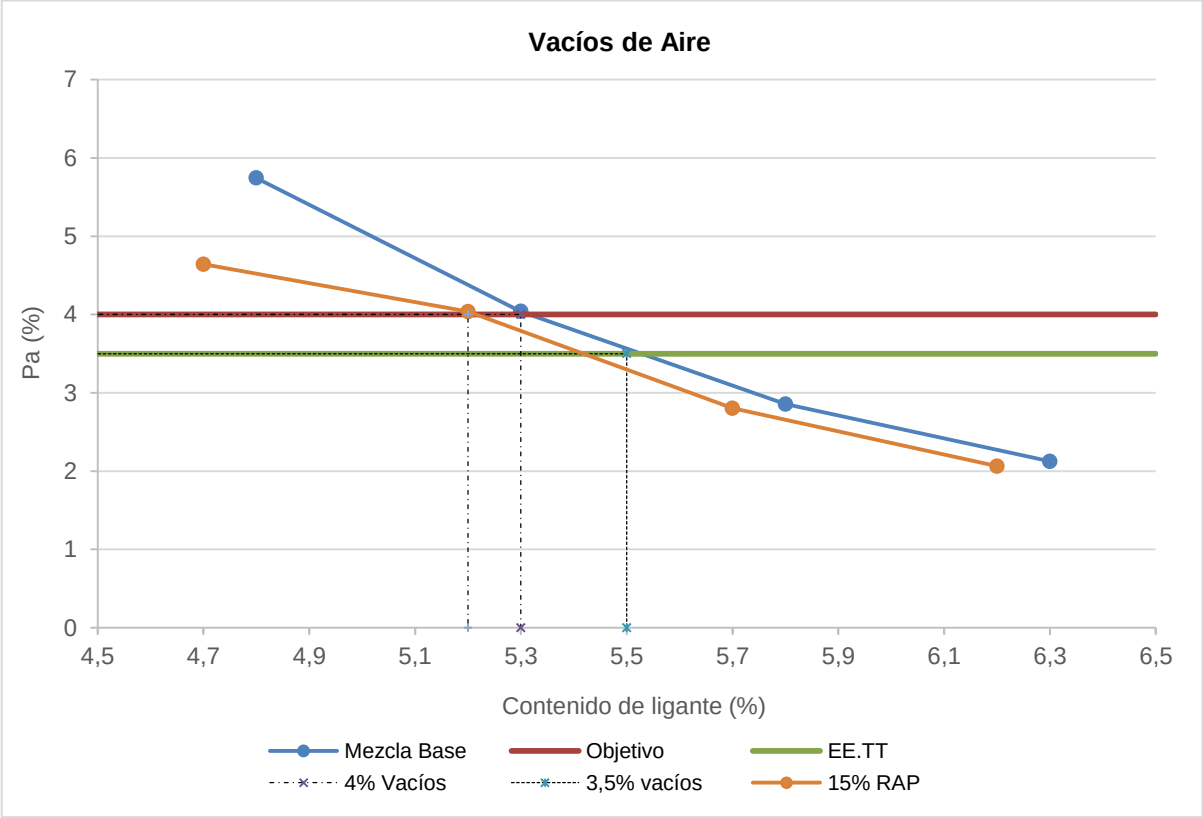


Gráfico 3-8: Cantidad de Vacíos de aire versus el contenido de ligante asfáltico.

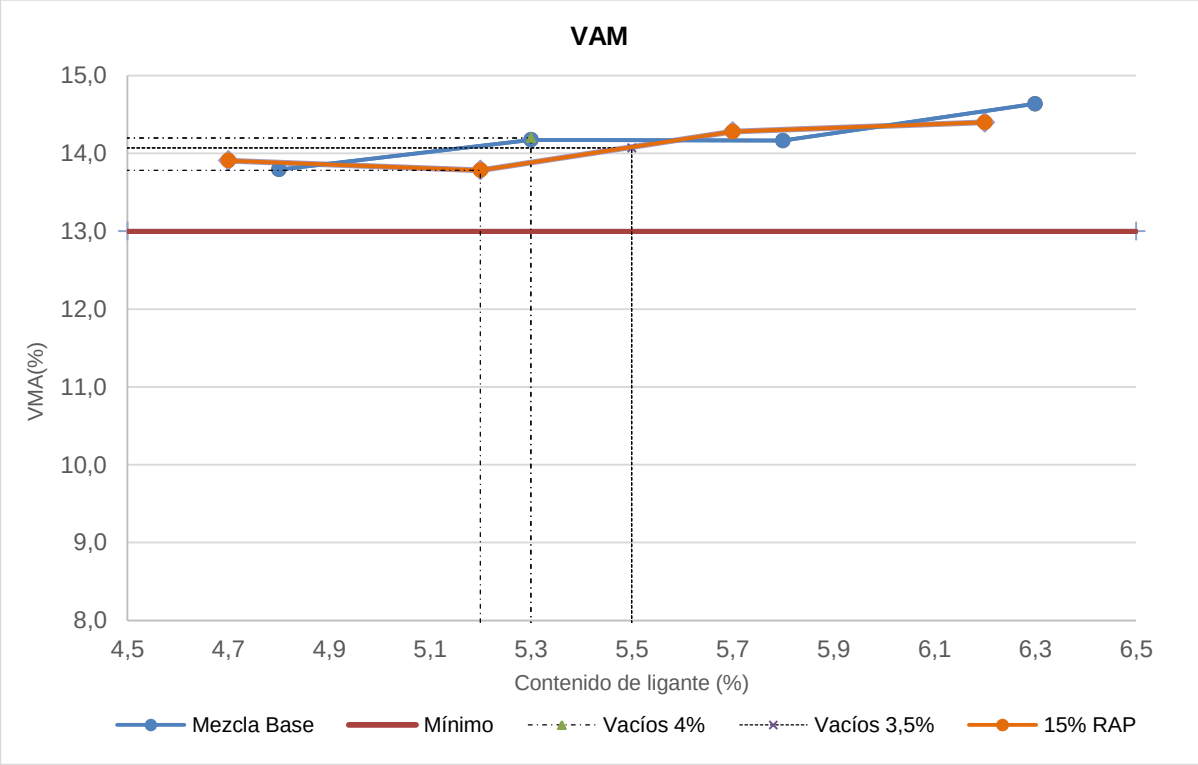


Gráfico 3-9: Vacíos en el agregado mineral versus el contenido de ligante asfáltico

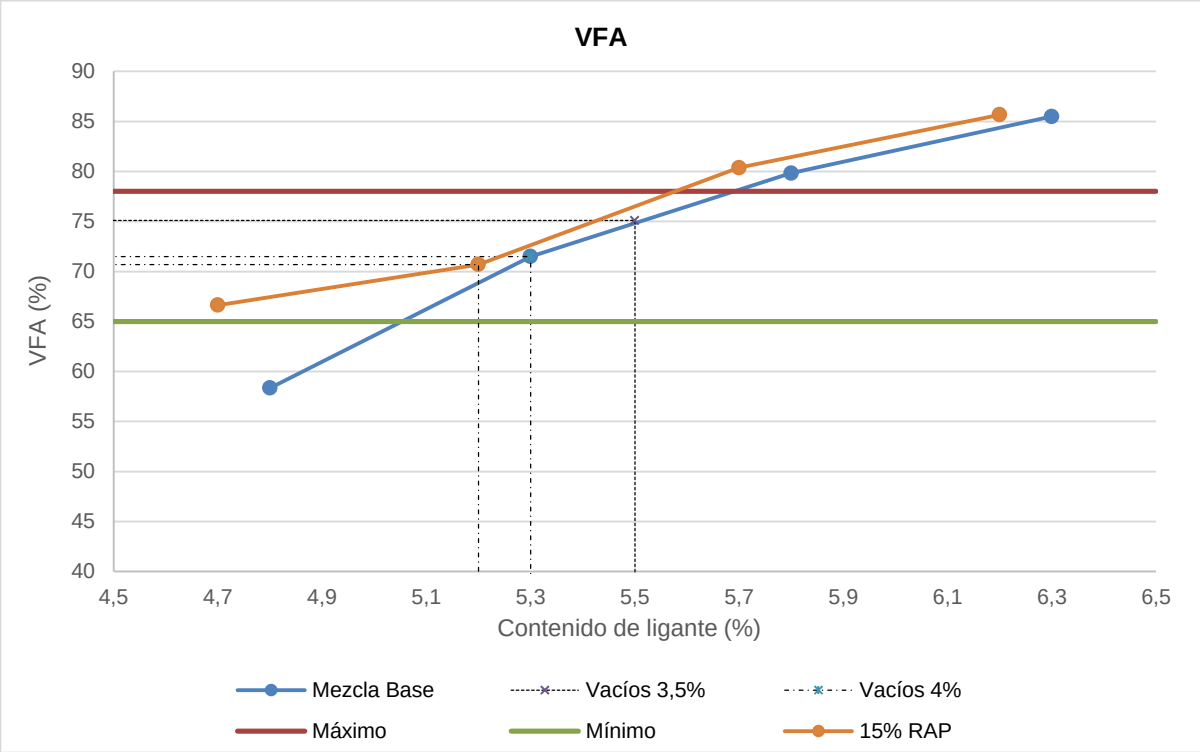


Gráfico 3-10: Vacíos llenos con asfalto versus contenido de ligante asfáltico.

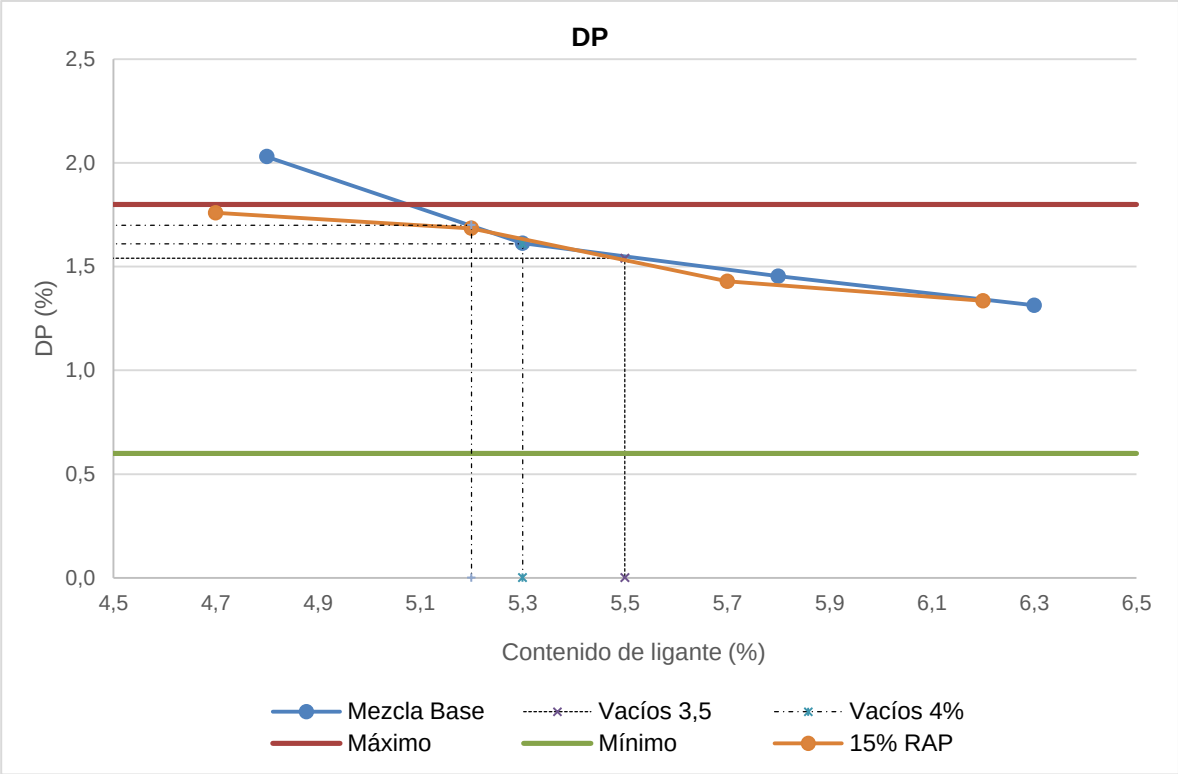


Gráfico 3-11: Proporción de Polvo versus contenido de ligante asfáltico.

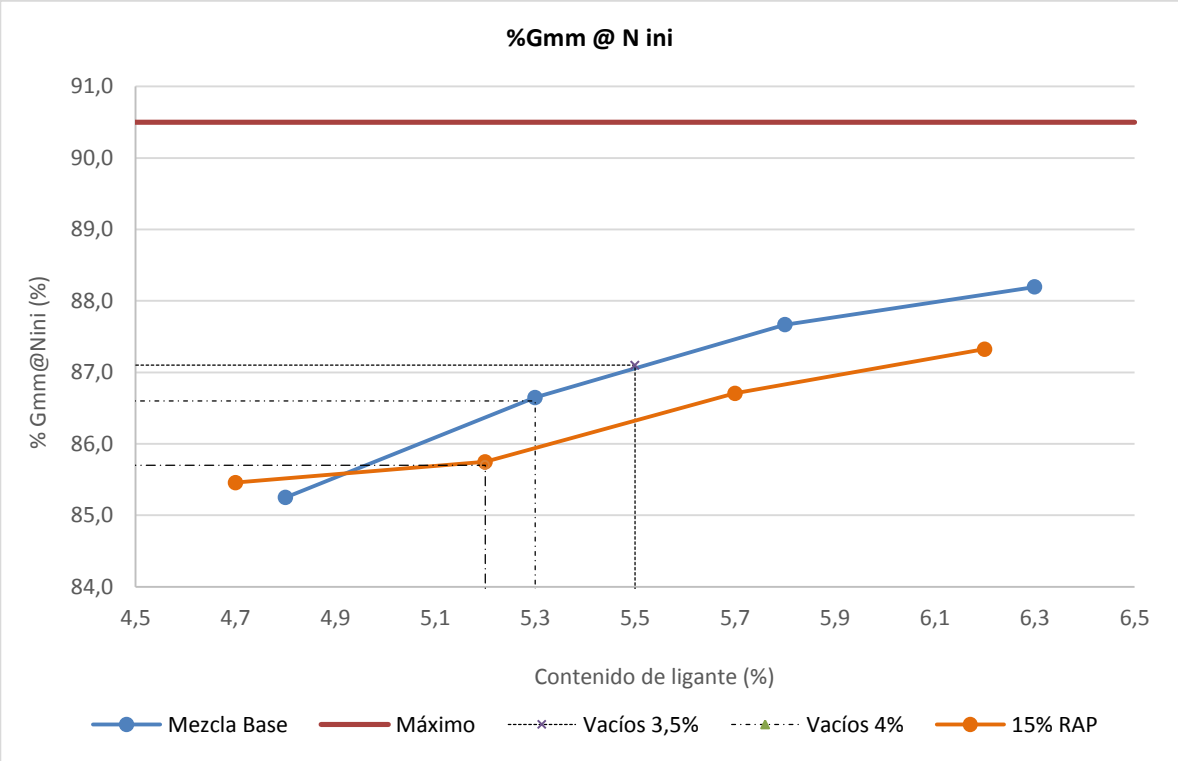


Gráfico 3-12: % Densidad máxima para giros iniciales versus contenido de ligante asfáltico.

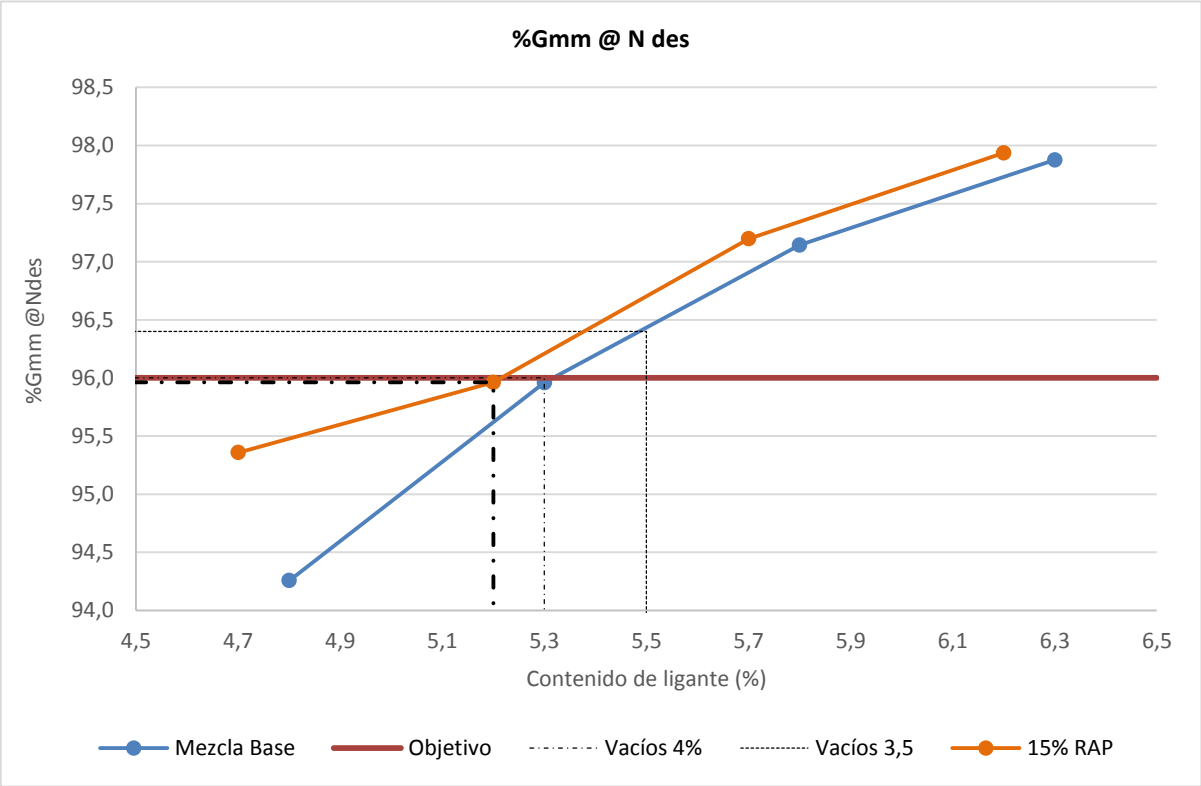


Gráfico 3-13: % Densidad máxima para giros iniciales versus contenido de ligante asfáltico.

3.4 SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD

El nivel 1 del diseño Superpave finaliza con la Evaluación de la Sensibilidad a la Humedad de la mezcla de diseño. Para efectos de este estudio, se utilizó la norma ASTM D4867. El ensayo consiste en evaluar la susceptibilidad a la humedad a través del ensayo de tensión indirecta (TSR). Para ello, se compactan 6 especímenes a un 7±1% de vacíos. Luego se dividen en dos grupos de aproximadamente el mismo promedio de contenido de vacíos. Se recomienda elaborar especímenes cuyo diámetro sea de 100 [mm] y un espesor de 62,5 [mm].

Un grupo se debe mantener en seco a 25[°C], mientras que el otro, se satura parcialmente con agua hasta alcanzar un grado de saturación entre un 55 y 80%. Luego éste último grupo se deben acondicionar por humedad a 60 ± 1.0 [°C].

Posteriormente se debe medir la resistencia a la tracción indirecta de cada espécimen. La susceptibilidad a la humedad es la relación de la resistencia promedio entre el grupo de probetas acondicionadas y el grupo sin acondicionar. La norma exige una relación mínima de 80%.

Dentro de los propósitos de este ensayo se tienen: identificar si una combinación de ligante asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua y medir la efectividad de aditivos mejoradores de adherencia, que para éste estudio no aplica éste caso.

$$TSR = \frac{2000 * P}{t * D * \pi}$$

Ecuación 3-21: Determinación de la tensión indirecta.

Donde:

TSR: Ensayo de tensión indirecta.

P: Carga máxima [N].

T: Espesor de la probeta [mm].

D: Diámetro de la probeta [mm].

Ilustración 3-11: Saturación de probeta a una presión de 20[in. Hg] durante un tiempo de 5 [min].

Ilustración 3-13: Acondicionamiento de probetas a 25[°C] por media hora previo a realizar ensayo de tracción indirecta.

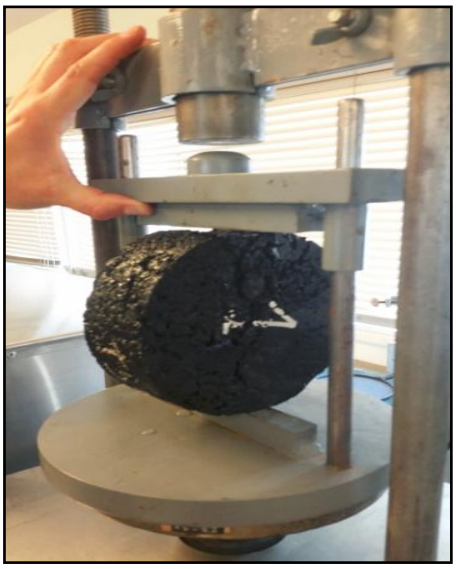


Ilustración 3-12: Aplicación de carga diametral a 50 [mm/min].

Ilustración 3-14: Inspección visual verificando desprendimiento de árido-ligante asfáltico en ambos grupos.

En la Tabla 3-23 se muestran los resultados para el ensayo de susceptibilidad a la humedad para las mezclas sin RAP y con 15% de RAP.

Tabla 3-23: Resultados para el ensayo de susceptibilidad a la humedad

Parámetros	Mezcla sin RAP						Mezclas con 15% de RAP					
	Probetas sin Acondicionar			Probetas Acondicionas			Probetas sin Acondicionar			Probetas Acondicionas		
Probetas	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Esfuerzo [Kpa]	602,0	615,2	589,1	513,9	527,4	519,8	715,1	639,7	643,8	610,5	616,9	590
Prom. Esfuerzo [Kpa]	602,1			520,4			666,2			605,8		
TSR	86,4						90,9					

3.5 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA.

Además de solicitar el diseño volumétrico de las MAC, las ETE N°1ª exigen realizar los ensayos de Rueda de Hamburgo y Módulo de Rigidez mediante las normas UNE-EN 12697-22 y UNE-EN 12697-26, respectivamente. El objetivo de esta sección es describir brevemente cada ensayo y entregar los resultados obtenidos en ambos diseños de mezclas.

3.5.1 Ensayo de rueda cargada de Hamburgo.

Éste ensayo evalúa la susceptibilidad de la MAC a deformarse cuando es sometida a condiciones bajo tránsito. Para ello, una rueda cargada realiza pasadas repetidas sobre una probeta, desarrollándose un perfil longitudinal de ahuellamiento. [16]

El ensayo se puede ejecutar a través de dos procedimientos: Método A y B.

El método A considera acondicionar las probetas en aire. Se mide la deformación inicial y luego cada 25±1 ciclos de carga, continuando hasta alcanzar los 2000 pasadas (1000 ciclos de carga) o una deformación de 15 mm, condición que se alcance primero.

El método B señala un acondicionamiento de las probetas en aire o agua. Se mide el desplazamiento vertical provocado por la rueda 6 o 7 veces la primera hora, y al menos una lectura cada 500 ciclos de carga. Se continúa el seguimiento hasta alcanzar las 20000 pasadas (10000 ciclos de carga) o hasta una profundidad de deformación de 20 mm, condición que se alcance primero. Para efectos de éste estudio, se utilizará el método B.

La tabla 3-24 resume la información obligatoria que exige la norma UNE-EN 12697-22 para el ensayo de rueda de Hamburgo. En ella se entregan los resultados para ambos diseños. Cabe señalar que se debe informar la profundidad de la huella para 10000 y 20000 pasadas o bien 5000 y 10000 ciclos de carga, entendiéndose que un ciclo de carga equivale a dos pasadas que realiza la rueda sobre las probetas.

En las fotos 3-14 y 3-15 se puede apreciar el estado de las probetas después de haber sido ensayadas.

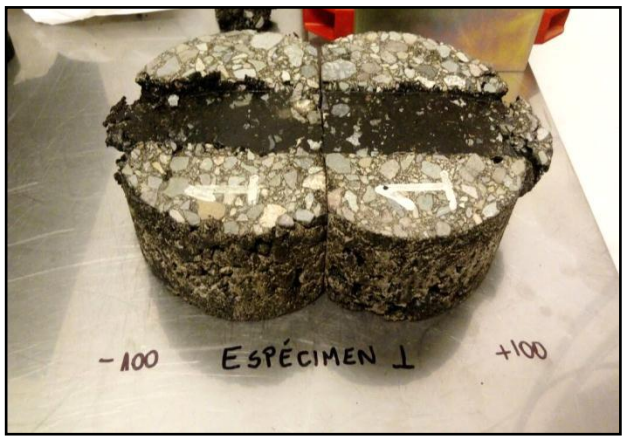


Ilustración 3-15: Espécimen ensayado sin RAP

Ilustración 3-16: Espécimen ensayado con 15% RAP.

Tabla 3-24: Resultados del ensayo de Rueda de Hamburgo.

Información Probetas	**Mezcla sin RAP**		**Mezcla con 15% de RAP**	
	Probeta #1	Probeta #2	Probeta #1	Probeta #2
Temperatura ensayo [°C]	50			
Espesor medio de las probetas [mm]	61,93	61,44	62,20	62,49
Densidad aparente [kg/m3]	2325	2337	2345	2333
INFORMACIÓN DEL ENSAYO				
N° de ciclos de falla de la probeta	10.000			
Profundidad de la rodadera en agua a los 10.000 ciclos [mm].	2,43	1,98	1,28	1,31
Profundidad media de la rodadera en agua a los 10.000 ciclos [mm].	**2,205**		**1,295**	
Profundidad de la rodadera en agua a los 5.000 ciclos [mm].	1,87	1,66	1,12	1,14
Pendiente de deformación en pista para 10.000 ciclos de carga [mm]	0,112	0,064	0,032	0,034
Pendiente media de deformación en pista para 10.000 ciclos de carga [mm]	0,088		0,033	
Porcentaje de la profundidad de la rodadera en agua [%], a los 10.000 ciclos.	3,99	3,15	2,11	2,09
Porcentaje de la profundidad media de la rodadera en agua [%], a los 10.000 ciclos	3,57		2,10	

3.5.2 Ensayo de Módulo de Rigidez.

El módulo de rigidez corresponde a una pendiente de la curva esfuerzo-deformación durante un determinado tiempo de carga. El procedimiento consiste en someter muestras de la mezcla asfáltica a deformación en su rango lineal, bajo cargas repetidas o pulsantes a una velocidad de deformación controlada. Se miden las amplitudes del esfuerzo y de la deformación, junto con la diferencia de fase entre ambos parámetros. [12]

Existen distintos métodos de ensayos para evaluar la rigidez de las mezclas asfálticas. Entre las pruebas que se realizan con cargas sinusoidales o pulsantes se tienen los siguientes ensayos: de flexión, de tracción indirecta y tracción directa uniaxial. Para cargas a velocidad de deformación controlada, la norma sólo especifica el ensayo de tracción directa uniaxial. Para cada ensayo se establecen condiciones de aplicación de la carga, amplitudes y frecuencias

Para el caso de éste estudio, se aplicará el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas, correspondiente al anexo C de la norma en cuestión. El procedimiento consiste en aplicar una carga a lo largo del diámetro vertical de la probeta a través de pletinas de carga, de tal manera de poder aplicar impulsos repetidos que se alternen con periodos de descanso.

La carga debe tener una forma de una onda de medio seno y ésta debe alcanzar su máximo valor a los 124 ± 4 [ms]; tiempo que simula una velocidad de 100 [km/hr]. Además, este valor de carga máxima se debe ajustar para alcanzar una deformación horizontal transitoria máxima de referencia del 0,005% del diámetro de la probeta.

Se especifica elaborar cuatro probetas cuyo espesor puede variar entre 30 y 75 [mm] y con un contenido de vacíos de 4 ± 0,5[%]. Sobre cada una se realizan dos mediciones del módulo de rigidez. Cada medición consiste en aplicar 5 pulsos sobre cada diámetro vertical. Además, el periodo de repetición de los impulsos debe ser de 3,0 ± 0,1 [s].

El ensayo entrega un valor del módulo de rigidez medido que debe ser corregido y que depende de los siguientes factores: la temperatura de la probeta, la magnitud de la carga vertical aplicada, la amplitud de la deformación horizontal obtenida para cada ciclo de carga, el espesor de la probeta y Coeficiente de Poisson, que si no está determinado, se asume un valor de 0,35 para todas las temperaturas.

En las Tablas 3-25 y 3-26 se entregan los resultados de los ensayo de módulo de rigidez para el diseño de la mezcla base. Por un lado se informan los valores para los módulos medidos y ajustados, mientras que por otro, la variación porcentual que presentan ambos.

Tabla 3-25: Resultados de Módulo Medido y Módulo Ajustado en cada diámetro aplicado.

Probeta	Ensayo aplicado en	Gmb [kg/m3]	Temperatura [°C]	Tiempo de carga [ms]	Deformación horizontal [um]	Módulo medido [MPa]	Módulo ajustado [MPa]
A1	1er diámetro	2396	15	122,8	6,9	6282	6364
	2do diámetro			120,6	7,0	6283	6312
A2	1er diámetro	2396		122,4	6,8	6470	6543
	2do diámetro			124,8	7,1	5868	5913
A3	1er diámetro	2401		124,8	6,9	6261	6359
	2do diámetro			125,6	7,0	6448	6469
A4	1er diámetro	2401		122,2	7,1	7061	7188
	2do diámetro			123,6	7,0	7221	7264

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

Tabla 3-26: Resultados para el módulo de Rigidez medido y ajustado.

Probeta	Ensayo aplicado en	Módulo Medido [Mpa]]	Variación Módulo Medido [%]	Módulo Ajustado [MPa]	Variación Módulo Ajustado [%]	Módulo de Rigidez [MPa]	Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]
A1	1er diámetro	6282	-0,02	6364	0,82	6283	6338
	2do diámetro	6283		6312			
A2	1er diámetro	6470	10,0	6543	10,0	6169	6228
	2do diámetro	5868		5913			
A3	1er diámetro	6261	-2,90	6359	-1,70	6355	6414
	2do diámetro	6448		6469			
A4	1er diámetro	7061	-2,22	7188	-1,05	7141	7226
	2do diámetro	7221		7264			

De igual forma, en las Tablas 3-27 y 3-28 se presentan los resultados de las rigideces para la mezcla de diseño con incorporación de 15% de RAP.

Tabla 3-27: Resultados de Módulo Medido y Módulo Ajustado en cada diámetro aplicado.

Probeta	Ensayo aplicado en	Gmb [kg/m3]	Temperatura [°C]	Tiempo de carga [ms]	Deformación horizontal [um]	Módulo medido [MPa]	Módulo ajustado [MPa]
A1	1^{er}diámetro	2383	15	122,8	6,9	8263	10419
	2do diámetro			120,6	7,0	8240	10395
A2	1er diámetro	2383		122,4	6,8	8988	9111
	2do diámetro			124,8	7,1	8682	8706
A3	1er diámetro	2375		124,8	6,9	9699	9788
	2do diámetro			125,6	7,0	9452	9461
A4	1er diámetro	2375		122,2	7,1	9376	9463
	2do diámetro			123,6	7,0	9154	9124

Tabla 3-28: Resultados de Módulo Medido y Módulo Ajustado en cada diámetro aplicado.

Probeta	Ensayo aplicado en	Módulo Medido [Mpa]]	Variación Módulo Medido [%]	Módulo Ajustado [MPa]	Variación Módulo Ajustado [%]	Módulo de Rigidez [MPa]	Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]
A1	1^{er}diámetro	8263	0,28	10419	0,23	8252	10407
	2do diámetro	8240		10395			
A2	1er diámetro	8988	3,40	9111	4,45	8835	8909
	2do diámetro	8682		8706			
A3	1er diámetro	9699	2,55	9788	3,34	9576	9625
	2do diámetro	9452		9461			
A4	1er diámetro	9376	2,37	9463	3,58	9265	9294
	2do diámetro	9154		9124			

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A continuación, se presenta el análisis de resultados para el diseño volumétrico de la mezcla con 15% de RAP y los ensayos de desempeño mencionados anteriormente.

4.1 DISEÑO VOLUMÉTRICO

De acuerdo a los resultados obtenidos para el diseño volumétrico de la MAC con 15% de RAP, se observa en los gráficos 3-14 al 3-19 que se cumple con los requerimientos del método Superpave para los parámetros volumétricos.

En la tabla 4-1 se puede apreciar que al incorporar un 15% de RAP, las propiedades volumétricas no sufren cambios significativos con respecto a los parámetros de la mezcla de diseño inicial. A continuación se señala la variación porcentual de los resultados obtenidos.

Los vacíos de agregado mineral, vacíos rellenos con asfalto y el asfalto efectivo disminuyen menos de un 5%, mientras que la proporción de polvo aumenta un 6,3%. El porcentaje de gravedad máxima teórica para los giros iniciales no alcanza a disminuir en un 1%.

El porcentaje de ligante asfáltico para alcanzar 4% de vacíos disminuye en un 1,9% para la mezcla con 15% de RAP. Existe un ahorro en ligante asfáltico virgen y agregado de un 0,6% y un 14,4%, respectivamente (ambos valores referidos al total de la mezcla).

Tabla 4-1: Propiedades volumétricas para las mezclas de diseño.

Propiedad	Mezcla sin RAP	Mezcla con 15% de RAP
% Ligante de diseño	5,3±0,3	5,2±0,3
% ligante en el RAP	4,3	
%ligante virgen a inyectar	**5,3**	**4,7**
%Agregado virgen	**94,7**	**80,3**
Pa	4,0	4,0
VMA	14,2	13,8
VFA	71,5	70,7
Pbe	4,3	4,1
DP	1,6	1,7
%Gmm@Nini	86,6	85,7
%Gmm@Ndis	96,0	96,0

4.1.1 Suceptibilidad a la humedad.

Se observa que al incorporar un 15% de RAP en la mezcla el promedio de tensiones de esfuerzo aumentan 10,6% para las probetas sin acondicionar y un 16,4% para las acondicionadas. Sin embargo, la diferencia entre estas tensiones en cada mezcla disminuye un 26,1%, con relación a la mezcla con 0% RAP. Esto hace que el valor del TSR de las mezclas con RAP aumente en un 5,2% respecto a las mezclas sin RAP.

Tabla 4-2: Variación porcentual para promedio de esfuerzos.

Probetas	0% RAP	15% RAP	%Δ
Sin Acondicionar	602,1	666,2	10,6
Acondicionadas	520,4	605,8	16,4
TSR	86,4	90,9	5,2

4.2 ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO.

Las dos diseños de mezcla cumplen con la condición de alcanzar primero las 20000 pasadas antes que una deformación de 20 [mm]. La mezcla sin RAP alcanza una deformación promedio de 2,2 [mm], mientras que la mezcla con 15% de RAP llega una profundidad promedio de 1,3 [mm]. Se puede apreciar que al incorporar un 15% de RAP en la mezcla asfáltica la deformación promedio disminuye un 41%, respecto a las mezclas con 0% de RAP.

En el gráfico 4-1 se observan las curvas de profundidad de la huella v/s número de pasadas para ambas mezclas. Se puede apreciar que en ninguna se produce un punto de inflexión, dado por la aparición del fenómeno de *"stripping"*, entendiéndose como la separación del agregado pétreo del ligante debido a la presencia de agua en la mezcla asfáltica, lo que disminuye su resistencia a los efectos de la humedad

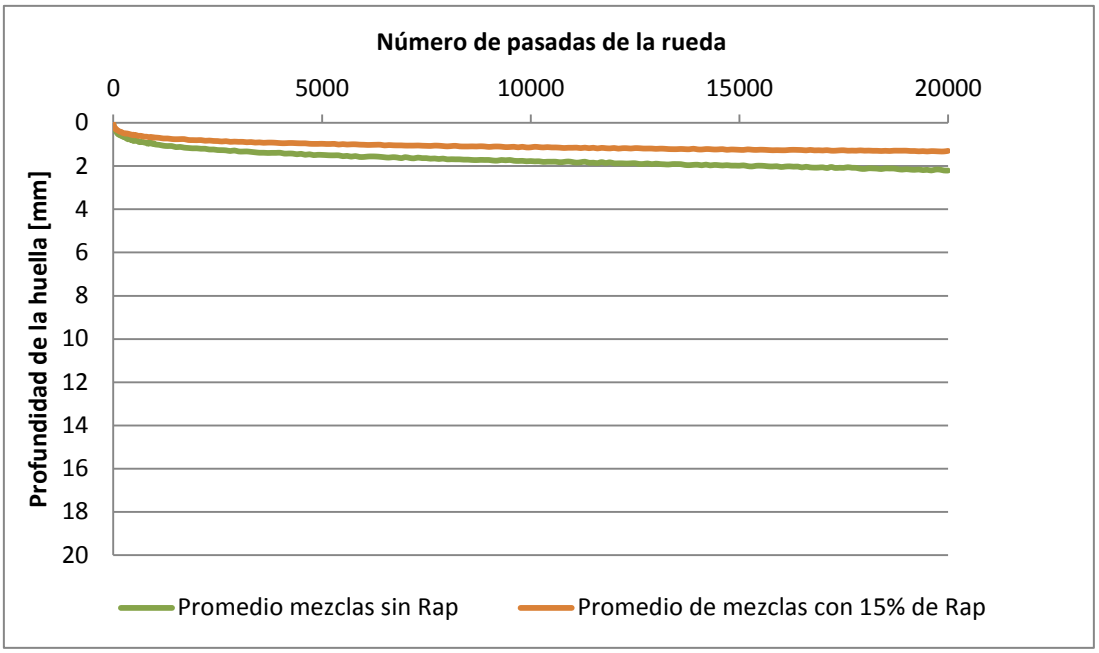


Gráfico 4-1: Profundidad de la huella v/s N° de pasadas

4.3 MÓDULO DE RIGIDEZ.

Los valores de la tensión vertical deben ser mayor que 0,5 [kN], de lo contrario, significa que la temperatura del ensayo o el método de ensayo no son adecuados. La menor tensión vertical ejercida es de 4,46 [kN] durante los ensayos sobre cada diámetro de las probetas, por lo que todas las probetas ensayadas cumplen con la fuerza vertical mínima.

La variación porcentual del Módulo de Rigidez Medido y Ajustado, deben encontrarse en el rango de +10 % a -20 % respecto al valor registrado para el primer ensayo en de cada probeta. De acuerdo a las tablas 3-26 y 3-28, cada probeta ensayada cumple con éste criterio.

En el gráfico 4-2 se puede observar los valores promedios del Módulo de Rigidez Ajustado para ambos diseños de mezcla. En relación a los resultados obtenidos en cada probeta, la rigidez de la mezcla con 15% de RAP aumenta en promedio un 46,5 %, respecto a la rigidez de la mezcla base.

Con respecto a las limitaciones de éste ensayo, no se pueden obtener conclusiones del valor del Módulo de Rigidez respecto a la variación de frecuencias o velocidad de carga. Además, se presenta un menor rango de temperatura de estudio en las altas temperaturas, presentándose un máximo 40 [°C]. Es por esta razón, que se recomienda someter las probetas a ensayo de

módulo dinámico, puesto que se controlan mejor los parámetros de temperatura, frecuencia de carga o velocidad de carga.

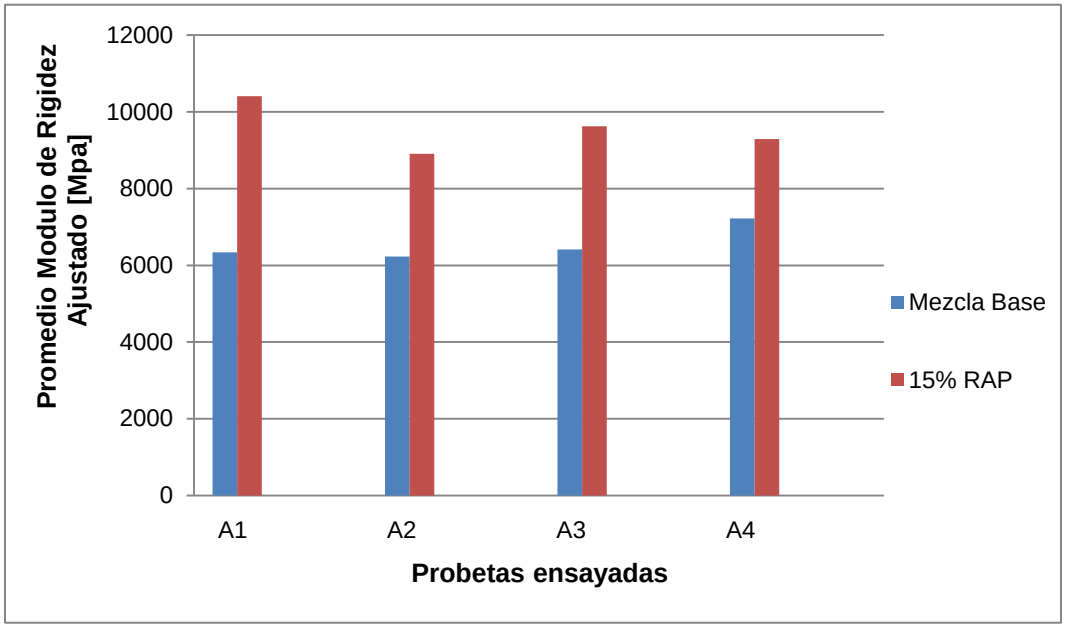


Gráfico 4-2:. Valor promedio del Módulo de Rigidez ajustado para ambos diseños.

Para finalizar, se realiza un breve análisis de precios unitarios con el fin de valorar el ahorro producido en cuanto a ligante asfáltico y Agregado en la elaboración de mezclas con 15% de RAP. Para ello, se cotizan precios de venta de los acopios en la empresa *BITUMIX* y para ligante asfáltico en OILMALAL, S.A.

En la Tabla 5-1 se presentan los precios unitarios para cada acopio y los porcentajes utilizados para cada una de las mezclas diseñadas.

Tabla 5-3: Precios Unitarios para cada Material y los Porcentajes utilizados en cada mezcla.

Material	P.U [$/M3]	Mezcla sin RAP	Mezcla con RAP
Grava ¾	9700	15%	25%
Gravilla ½	9000	35%	23%
Polvo Roca	9000	50%	37%
RAP	13000	-	15%
% Ligante asfáltico de diseño	24504	5,3%	5,2%
% Ligante asfáltico RAP	-	-	4,1%

En la tabla 4-2, se presenta el análisis realizado de acuerdo a los precios anteriores. Se concluye que existe un 5,5 % de ahorro solamente en ligante y agregado en las mezclas con 15% de RAP.

Tabla 5-4: Economía de Ahorro para las mezclas con 15% de RAP

Material	0% RAP	15% RAP
% Asfalto virgen a inyectar	5,30%	4,59%
% Agregado Virgen	94,70%	80,58%
Agregado	8622	6305
Asfalto	1299	1124
RAP	0	1950
Total	9921	9379
Ahorro	5420	
%Ahorro	**5,5**	

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se realizó el diseño volumétrico de una mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Superpave correspondiente al proyecto “Conservación mayor pista 17 R / 35 L Aeropuerto Arturo Merino Benítez 2017-2018”. Posteriormente se homologó dicha mezcla, adicionando un 15% de RAP. Luego, se verificó si se cumplen con los requerimientos Superpave para los parámetros volumétricos y, finalmente, se evaluó la resistencia al ahuellamiento y el módulo de rigidez para ambos diseños. De manera general, se puede decir que se lograron todos los objetivos planteados al inicio de esta Memoria.

A continuación, se detallan los comentarios y las conclusiones obtenidas al finalizar la etapa de revisión bibliográfica y trabajo en laboratorio:

- Al incorporar un 15% de RAP en la mezcla asfáltica los parámetros volumétricos se mantienen prácticamente inalterables con respecto a los resultados obtenidos inicialmente en la mezcla base. Además, se corrobora el aumento en el valor del TSR al aumentar la rigidez en las mezclas con RAP, de acuerdo a lo revisado en la revisión de la literatura.
- Se logró homologar el diseño de una mezcla asfáltica adicionando un 15% de RAP. La mezcla elaborada consiguió cumplir con los criterios de aceptabilidad Superpave y las especificaciones técnicas del proyecto.
- La mezcla resultante evidenció una mejora en la resistencia al ahuellamiento y un incremento en el Módulo de Rigidez, tal como señalaban los resultados que entregaba la literatura.
- Se demostró que el agregado lavado producto de la recuperación del ligante asfáltico también cumple con las especificaciones Superpave para las propiedades de consenso.
- Respecto al ligante asfáltico virgen utilizado, éste corresponde a un asfalto modificado con polímeros con un grado de desempeño PG76-28, el cual cumplió con el grado especificado por el proyecto (PG76-22) y, además, con los valores de cada parámetro definido para clasificación Superpave.

- La estructura del agregado de la mezcla de diseño cumple con la siguiente proporción: 15% de agregado ¾”, 35% agregado ½” y 50% polvo roca. Para determinar el contenido de asfalto óptimo se elaboraron 2 probetas para cada uno de los porcentajes requeridos, es decir, con 4.8%, 5.3%, 5.8% y 6.3% de ligante asfáltico. De acuerdo a los resultados obtenidos, se determinó que la cantidad óptima de ligante asfáltico fue de 5,3% para un 4% de vacíos. De esta forma, se puede revalidar la efectividad del compactador giratorio SGC para alcanzar un determinado porcentaje de vacíos teórico en los especímenes compactados.
- En lo que se refiere al procedimiento Superpave para mezclas con RAP, del mismo modo que la mezcla anterior, se selecciona la estructura del agregado y el contenido de asfalto óptimo. Para el primer caso la proporción de agregados queda como sigue: 25% de agregado ¾”, 23% de agregado ½”, 37% polvo roca y 15% RAP. Para el segundo, se determina un contenido de 5,2% de ligante asfáltico óptimo.
- En relación a la manipulación del RAP en el laboratorio, se ratifica que éste no debe ser envejecido por más de 2 [hr] a no más de 110[°C] puesto que se alteran los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.
- En cuanto homologar la mezcla de Aeropuerto incorporando un 15% de RAP, se utilizó la recomendación de la norma AASHTO M323, que establece mantener el grado de ligante asfáltico virgen a usar en la mezcla para porcentajes menores a 15% de RAP. Esta consideración se usa siempre cuando el contenido de ligante asfáltico en el RAP sea similar al contenido de asfalto en la mezcla de diseño (4-6%). En este caso fue posible porque el RAP contenía un 4,3% de ligante asfáltico, mientras que el contenido de asfalto óptimo de la mezcla de diseño es de un 5,3%.
- Con el objetivo de obtener una aproximación más consistente, se intentó realizar una clasificación PG al ligante extraído del RAP, sin embargo, no se pudo ensayar a temperatura intermedia y baja debido a la alta rigidez del asfalto.

Recomendaciones

- Los ensayos para calcular la gravedad teórica máxima y la gravedad específica de las mezclas compactadas son muy variables y dependen exclusivamente del operador que lo realice.
- Se recomienda considerar los ensayos de Módulo Dinámico, Flow Number y Fatiga para completar el análisis de desempeño de las mezclas con 15% de RAP. Asímismo, se sugiere seguir aumentando los porcentajes de RAP en la mezcla con el fin de estudiar el desempeño de éstas.
- Idealmente es conveniente conocer la procedencia del acopio RAP antes de comenzar con el diseño. Asimismo, poder realizar una clasificación por grados de desempeño al ligante asfáltico extraído del RAP puesto que otorgaría una aproximación más consistente ya que se caracterizaría las propiedades del ligante del RAP y el virgen. En caso de no ser así, se propone realizar una clasificación PG a la mezcla resultante de ligantes (RAP y virgen), corroborando si dicha mezcla cumple con el grado especificado en el proyecto, o con la recomendación de la norma AASHTO M323.
- Con el fin de obtener una mejor aproximación de la gravedad específica bruta de los especímenes compactados, se recomienda realizar el diseño Superpave compactando 6 especímenes a los giros de diseño y 2 a giros máximos. [14]

REFERENCIAS

[1] Asphalt Institute, «Recycled Asphalt Materials in the Mix Design Process,» de *MS-2; Asphalt Mix Design Methods*, 7 ed., 2014.

[2] National Asphalt Pavement Association, «Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage,» 2016.

[3] European Asphalt Pavemente Association , «The European Asphalt Pavement Industry's Position Statement on the use of secondary materials,» 2017.

[4] Manual de Carreteras, «Mezclas Asfálticas con RAP,» vol. 5, 2017.

[5] National Cooperative Highway Research Program, «Mini-Experiments; Efects of RAP Handling,» de *Reecommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method; Project D9-12*, 2000.

[6] Laboratorio Nacional de Vialidad, «Mezcla asfáltica en caliente con pavimento asfáltico reciclado,» 2016.

[7] National Cooperative Highway Research Program, «Examples of Performance Test Result,» de *Use of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Asphalt Mixtures*, 2016.

[8] Illinois Center of Transportation, Impact of High RAP Content on Structural and Performance properties of Asphalt Mixtures, 2012.

[9] G. V. A. M. Miró Rodrigo, Evaluation of high modulus mixture behavior wih high reclaimed asphalt pavement (RAP) percentages for sustanaible road construction, 2011.

[10] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 752. , «Moisture Damage Susceptibility Results,» de *Improved Mix Design, Evaluation and Materials Managment Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content*, 2013.

[11] Laboratorio Nacional, «Investigación y Desarrollo de nuevos pavimentos asfálticos

sostenibles de baja temperatura y recicladas,» 2018.

[12] Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. , Mezclas Bituminosas; Métodos de Ensayo para mezclas bituminosas en caliente; Parte26: Rigidez., Madrid, 2012.

[13] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO M323., Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design.

[14] Asphalt Institute, «Volumetric Properties of Compacted Paving Mixtures,» de *MS-2; Asphalt Mix Design Methods*, 2014.

[15] Asphalt Institute, «Specimen Preparation and Compaction,» de *MS-2; Asphalt Mix Design Methods*, 2014.

[16] Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR., Mezclas bituminosas;Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente;Parte 22: Ensayo de Rodadura., Madrid, 2008.

ANEXOS.

7.1 ANEXO A.

Éste anexo incluye el informe emitido por el laboratorio LEMCO respecto a los resultados para cada una de las probetas con 15% de RAP donde se evaluó el Módulo de Rigidez.

Se realizan dos mediciones en cada probeta las cuales consisten en emitir 5 cargas pulsantes sobre cada diámetro vertical.

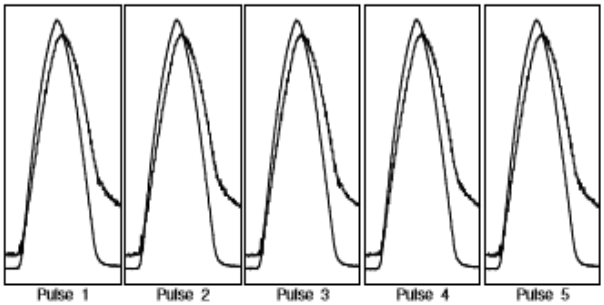
A continuación se presenta el informe emitido para cada una de las probetas ensayadas.

- ***Probeta 1.***

Date & time of test :	25:abr:2018 13:10	Client name :	Diseño Superpave

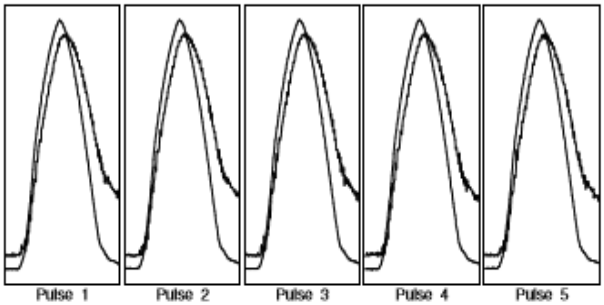
Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 15% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26-2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20°C
Bulk density determination method:	Densidad aparente

Test along 1st diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,27	6,31	6,30
Horizontal stress (kPa)		405,5	408,0	407,2
Load-area factor	0.60	0,60	0,62	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,2	7,2	7,2
Load (rise) time (ms):	124	126,0	128,0	126,6
Measured stiffness modulus (MPa)		8225	8299	8263
Adjusted stiffness modulus (MPa)		10355	10492	10419

Test along 2nd diameter



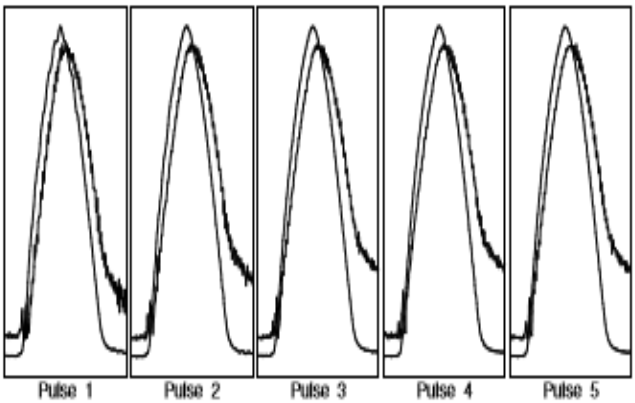
Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,11	6,15	6,13
Horizontal stress (kPa)		395,4	397,7	396,4
Load-area factor	0.60	0,60	0,61	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,0	7,1	7,0
Load (rise) time (ms):	124	125,0	127,0	126,0
Measured stiffness modulus (MPa)		8139	8308	8240
Adjusted stiffness modulus (MPa)		10310	10477	10395

- ***Probeta 2.***

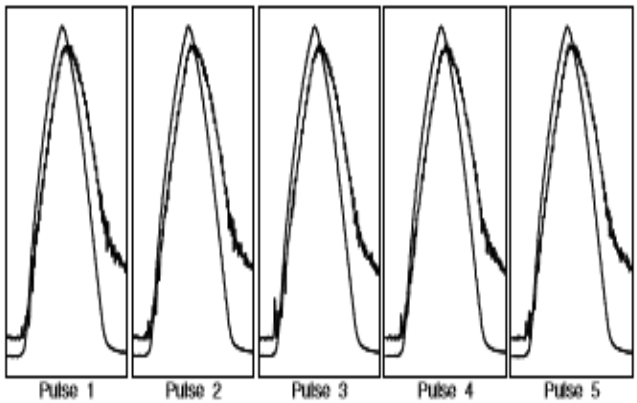
Date & time of test :	25:abr:2018 13:54	Client name :	Diseño Superpave

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 15% 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)		6,45	6,53	6,48
Horizontal stress (kPa)		417,4	422,8	419,1
Load-area factor	0.60	0,61	0,63	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,2	7,1	6,8
Load (rise) time (ms):	124	123,0	128,0	125,6
Measured stiffness modulus (MPa)		8650	9927	8988
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8748	10018	9111

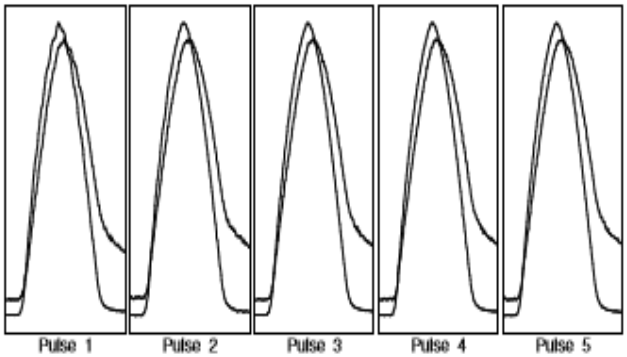
Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,30	6,34	6,32
Horizontal stress (kPa)		407,5	410,0	409,2
Load-area factor	0.60	0,60	0,61	0,60
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	6,9	6,9
Load (rise) time (ms):	124	124,0	127,0	125,4
Measured stiffness modulus (MPa)		8624	8723	8682
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8641	8771	8706

- ***Probeta 3***

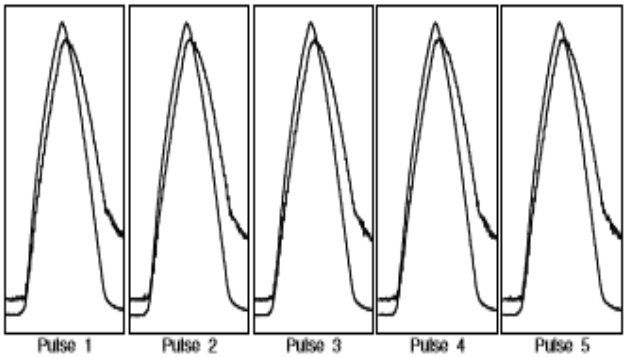
Date & time of test :	25:abr:2018 15:08	Client name :	Diseño Superpave

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 15% 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)		7,41	7,46	7,43
Horizontal stress (kPa)		479,4	482,8	480,4
Load-area factor	0.60	0,60	0,62	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,0	7,4	7,2
Load (rise) time (ms):	124	120,0	126,0	123,6
Measured stiffness modulus (MPa)		9454	10105	9699
Adjusted stiffness modulus (MPa)		9555	10133	9788

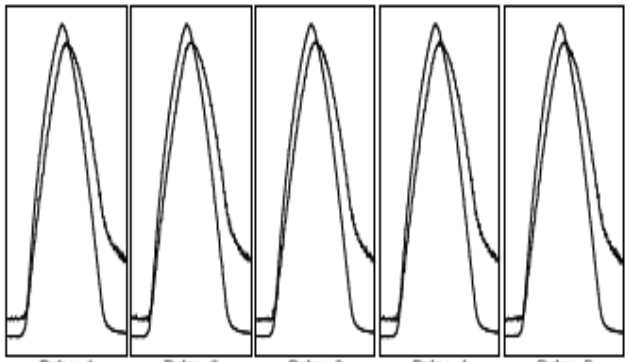
Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,70	6,72	6,71
Horizontal stress (kPa)		433,2	434,8	434,1
Load-area factor	0.60	0,59	0,61	0,60
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,6	6,8	6,7
Load (rise) time (ms):	124	126,0	129,0	127,2
Measured stiffness modulus (MPa)		9347	9524	9452
Adjusted stiffness modulus (MPa)		9423	9500	9461

- ***Probeta 4.***

Date & time of test :	26:abr:2018 07:53	Client name :	Diseño Superpave

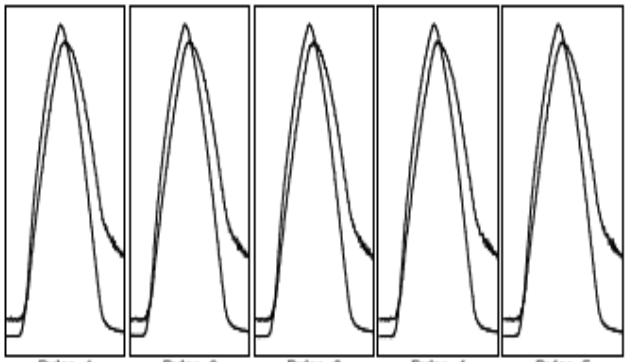
Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 15% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26-2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20°C
Bulk density determination method:	Densidad aparente

Test along 1st diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,92	6,95	6,94
Horizontal stress (kPa)		447,7	449,4	448,9
Load-area factor	0.60	0,61	0,62	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	7,1	7,0
Load (rise) time (ms):	124	123,0	127,0	125,8
Measured stiffness modulus (MPa)		9288	9427	9376
Adjusted stiffness modulus (MPa)		9397	9536	9463

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,79	6,81	6,80
Horizontal stress (kPa)		439,3	440,5	439,8
Load-area factor	0.60	0,58	0,61	0,60
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,0	7,1	7,0
Load (rise) time (ms):	124	126,0	129,0	128,0
Measured stiffness modulus (MPa)		9053	9185	9154
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8995	9221	9124

7.2 ANEXO B.

En éste anexo entrega el informe que emite el LEMCO para ensayo de Rueda de Hamburgo correspondiente a las mezclas con 15% de RAP.

INFORME DE ENSAYO

RUEDA DE HAMBURGO - MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE SUPERPAVE

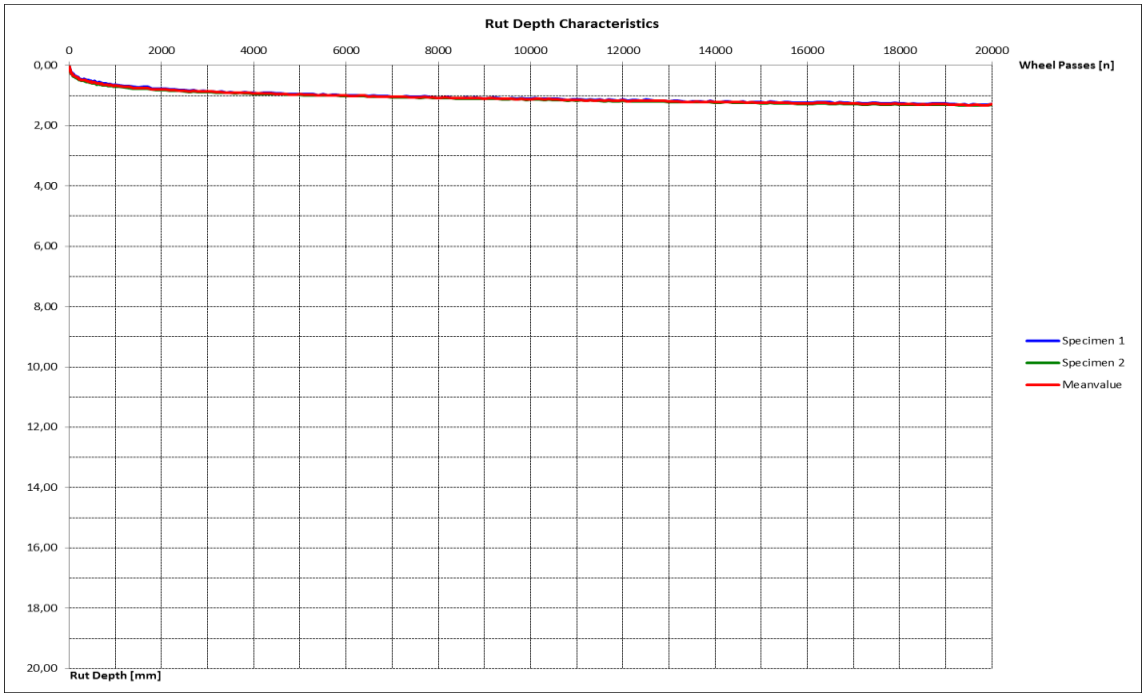
2. ANTECEDENTES DE PROBETAS:

Tipo de mezcla bituminosa	Diseño Superpave, 15% RAP
Fecha de Fabricación	10-01-2018
Edad de las Probetas [días]	8
Transporte y Conservación	Conservadas y transportadas a una T° no superior a los 25[°C], con la superficie de ensayo en posición horizontal.
Número de Probetas de la misma composición	2
Método de compactación	Compactador giratorio Troxler, modelo 5850

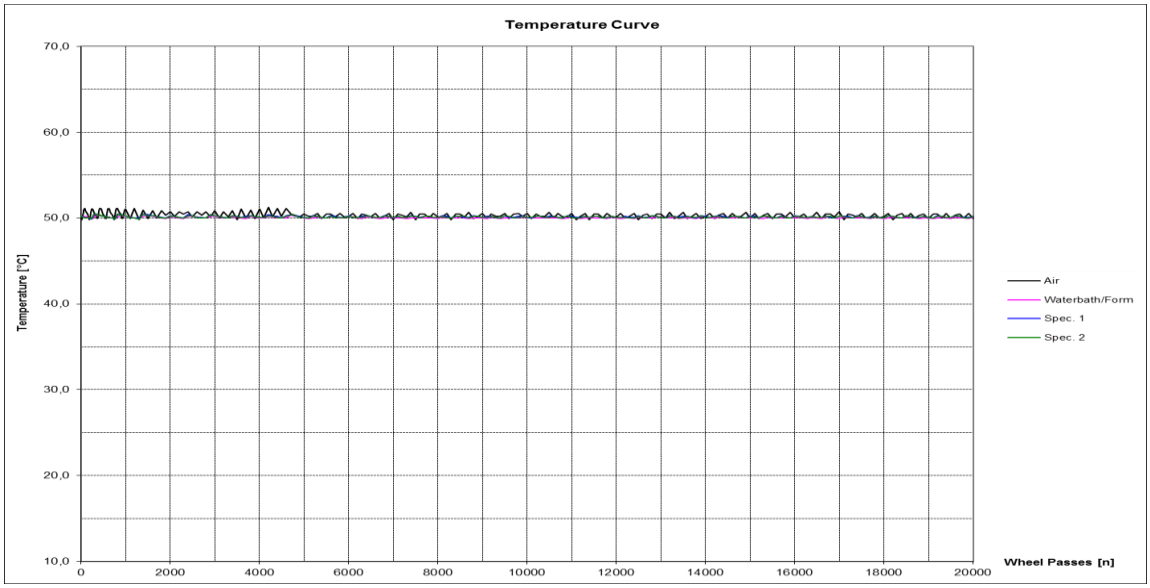
3. ANTECEDENTES DEL ENSAYO

Muestra Nº	**Probeta 1**	**Probeta 2**
Temperatura del ensayo según especificación [°C]	50	
Espesor Medio de las Probetas [mm]	62,20	62,49
Densidad aparente de las Probetas [kg/m3], obtenida según 8.302.38 (MC-V8, 2014)	2345	2333
Norma Utilizada	UNE-EN 12697-22:2008+A1, Marzo 2008.	
Dispositivo y Procedimiento Utilizado	Dispositivo de tamaño pequeño, procedimiento B en agua, 20.000 pasadas, carga 700 [N]	

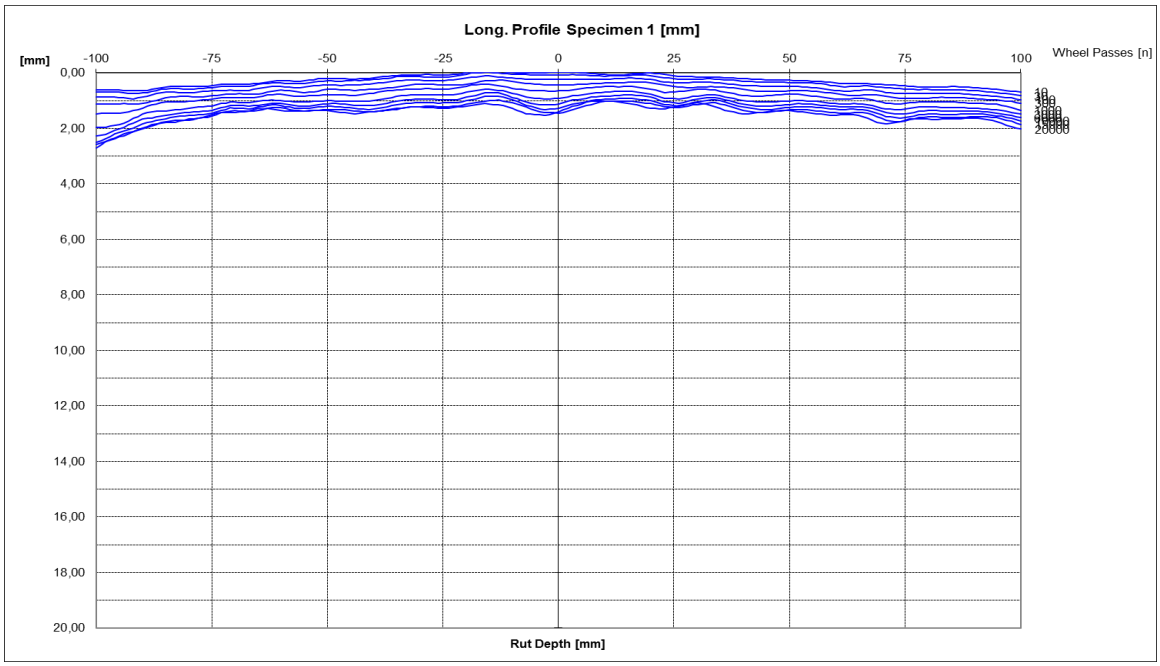
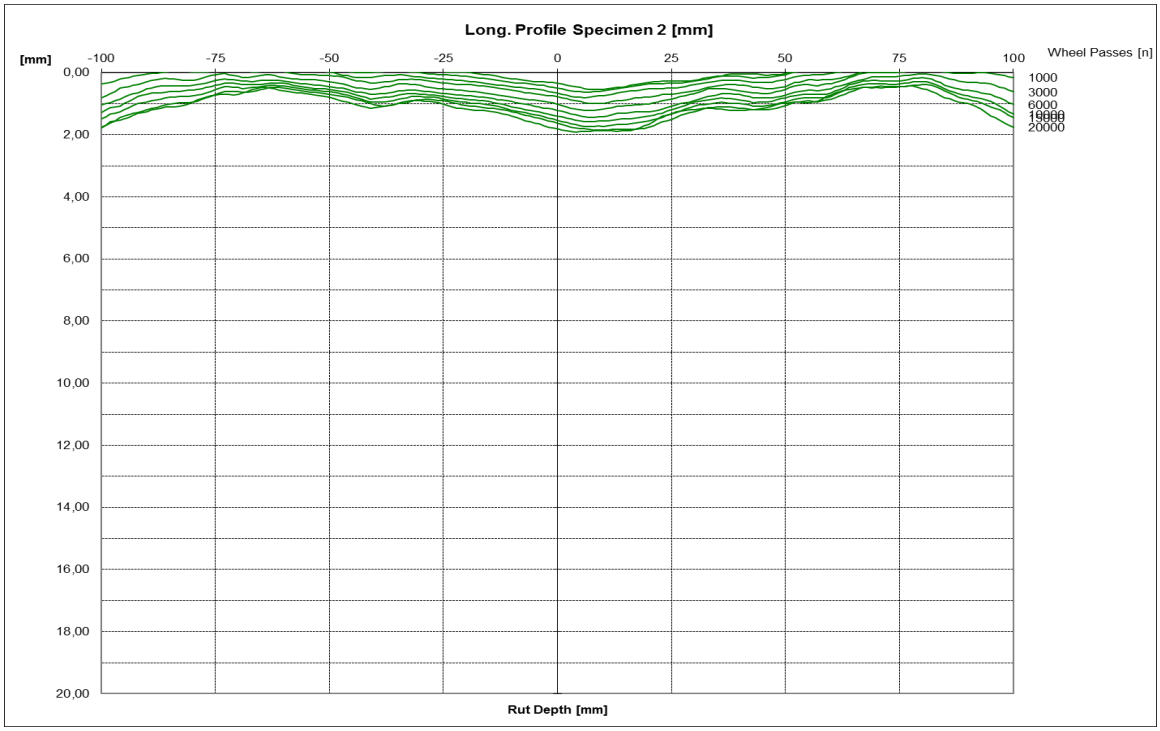
- ***Profundidad de la Huella v/s Pasadas.***



- ***Curva de Temperatura.***



-***Perfil Longitudinal de la Probeta 1 [mm].***



- ***Perfil Longitudinal de la Probeta 2 [mm]***