

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



DISEÑO DE MEZCLAS EN CALIENTE MEDIANTE METODO SUPERPAVE CON Y SIN ADICIÓN DE RAP

Memoria de titulación presentada por

LUCIANO CORTÉS CALDERÓN

Como requisito para optar al título de

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

CARLOS WAHR DANIEL

ABRIL de 2019

RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del segundo gran proyecto del país en optar por el diseño de mezcla asfáltica a través de metodología Superior Performing Pavement (SUPERPAVE) denominado “Conservación mayor pista 17R-35L y rodajes asociados aeropuerto Arturo Merino Benítez, 2017-2018”, licitado por la Dirección de Aeropuertos (DAP); entidad perteneciente al Ministerio de Obras Públicas, se solicitó al Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obra (LEMCO) realizar el diseño de la mezcla a utilizar.

Una interrogante que surge habitualmente al incorporarse nuevas tecnologías, en este caso específico el diseño de mezclas mediante el método SUPERPAVE, es ¿cómo aprovechar sus características para incrementar la sustentabilidad de proyectos que utilicen asfalto? En este contexto, la presente investigación se enfoca en desarrollar una mezcla en caliente para pavimentos aeroportuarios, que a través de la metodología SUPERPAVE, sea capaz de cumplir con las especificaciones técnicas señaladas en el proyecto anteriormente mencionado. Además, pretende evaluar su desempeño y compararlo con dos mezclas realizadas con distintos porcentajes de “Reclaimed Asphalt Pavement” (RAP), las cuales también serán diseñadas utilizando el método SUPERPAVE.

Para que el desempeño de todas las mezclas sea comparable, se empleará la misma granulometría del proyecto original en el diseño de las mezclas realizadas con RAP. Se decide utilizar dos porcentajes de contenido de RAP, 15% y 25% respecto al peso total de la mezcla. Los ensayos de desempeño a desarrollar serán los siguientes: Rueda de Hamburgo mediante AASHTO T324-17, Fatiga para N500 mediante AASHTO T321-17 y TSR el cual es parte de la metodología SUPERPAVE mediante ASTM D4867 / D4867M - 09(2014). Además, se obtiene el módulo de rigidez mediante UNE-EN 12697-26.

Los resultados obtenidos indican que es posible utilizar mezclas con RAP en capas de rodadura, dado que se obtienen desempeños aceptables al utilizar mezclas realizadas con los porcentajes de RAP que se han indicado anteriormente indicados. En cuanto a los ensayos de desempeño es posible señalar que al utilizar RAP se presenta un aumento en el módulo de rigidez de la mezcla, lo que se observa en todos los ensayos realizados. En el ensayo de Rueda de Hamburgo, las mezclas con RAP tuvieron un desempeño superior en comparación a la mezcla del proyecto original. En el ensayo TSR se evidencia un leve aumento al utilizar RAP en las mezclas respecto de la mezcla con ligante virgen. En el ensayo de Fatiga para N500, las mezclas con RAP fueron claramente inferiores a la mezcla original.

Palabras Clave: Pavimentos aeroportuarios, mezcla en caliente, Superior Performing Pavement, Reclaimed Asphalt Pavement, ensayos de desempeño.

ABSTRACT

In the context of Chile's second project that chose the Superior Performing Pavement (SUPERPAVE) methodology for its design; named "Conservación mayor pista 17R-35L y rodajes asociados aeropuerto Arturo Merino Benítez, 2017-2018", Tendered by "Dirección de Aeropuertos" (DAP); entity belonging to the "Ministerio de Obras Públicas", and due to the high technical capacity of LEMCO (Laboratorio de Ensayo Materiales y Control de Obra), it was selected to develop the mix using the SUPERPAVE mix design method.

A question that arises with the incorporation of new technologies, in this case, the hot mix asphalt (HMA) design through SUPERPAVE method, is: how is it possible to take advantage of its characteristics in order to increase the sustainability of projects that use asphalt? With that question in mind, this investigation is focused on developing a hot mix asphalt for airport pavement surfacing, using the SUPERPAVE method, able to fulfill the technical standard of the aforementioned project. It also strives towards being able to evaluate its performance and compare it to two other HMA mixes that contain different amounts of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), which are also designed using the SUPERPAVE method.

For the performance of all the mixes to be comparable, the RAP mixes emulate the granulometry used in the previously mentioned project. There will be two different quantities of RAP, 15% and 25% of the total mix weight. The performance tests selected for the investigation are: Hamburg's Wheel in accordance with AASHTO T324-17, a Fatigue test is performed at N500 based on AASHTO T321-17 and Tensile Strength Ratio using ASTM D4867 / D4867M - 09(2014). Also, the rigidity module is calculated following the procedure of UNE-EN 12697-26.

The obtained results indicate that it is possible to use mixtures with RAP in the airport surface course obtaining an acceptable performance with the percentages of RAP used. Regarding the performance test, it is possible to observe that the rigidity module increases when adding RAP. Hamburg's Wheel test shows that the RAP mix performs better than the virgin HMA. TSR shows a small increase when adding RAP to the mix. Finally, the Fatigue test shows that RAP mix performance is greatly diminished in comparison to the original HMA.

GLOSARIO

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AMPT: Asphalt Mixture Performance Tester.

ASTM: American Society for Testing Materials.

BBR: Bending Beam Rheometer (Reómetro de Viga en Flexión).

DAP: Dirección de Aeropuertos.

DSR: Dynamic Shear Rheometer (Reómetro de Corte Dinámico).

DOT: Department of Transportation (Departamento de transportes de EE. UU.)

ESAL's: Equivalent Single Axles Loads (Ejes Simples Equivalentes Cargados)

FHWA: Federal Highway Administration.

G_b: Gravedad específica del ligante asfáltico.

G_{mb}: Gravedad específica bruta de la mezcla.

G_{mm}: Gravedad específica máxima.

G_{sa}: Gravedad específica aparente.

G_{se}: Gravedad específica efectiva.

G_{sb}: Gravedad específica bruta de agregados.

HPDR: Horno de Película Delgada Rotatorio (RTFO).

HMA: Mezcla de asfalto en caliente.

IRI: International Roughness Index (Índice de Regularidad Internación)

LEMCO: Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras.

LTPP: Long-Term Pavement Performance.

MAC: Mezcla Asfáltica en Caliente.

M.C: Manual de Carreteras.

NAPA: National Asphalt Pavement Association (Asociación Nacional de Pavimentos de Asfalto en EE. UU.).

NCAUPG: North Central Asphalt User/Producer Group.

NCHRP: National Cooperative Highway Research Program.

NEAUPG: North Central Asphalt User/Producer Group.

PAV: Pressure Aging Vassel (Envejecimiento en Cámara de Presión).

Pb: Porcentaje de Asfalto.

Ps: Porcentaje del Agregado.

RMAUPG: Rocky Mountains Asphalt User/Producer Group.

RV: Viscosímetro Rotacional.

RAP: Reclaimed Asphalt Pavement (Asfalto reciclado).

SEAUPG: South East Asphalt User/Producer Group

SGC: SUPERPAVE Gyratory Compactor.

SHRP: Strategic Highway Research Program.

SPS-5: Special Pavements Study—5

SUPERPAVE: Superior Performing Asphalt Pavements.

TSR: Ensayo de susceptibilidad a la humedad.

Va: Volumen de Vacíos de Aire.

Vba: Volumen absorbido Ligante Asfáltico.

Vbe: Volumen Ligante Asfáltico Efectivo.

VAM: Vacíos del Agregado Mineral.

VFA: Vacíos llenos con Asfalto.

WMA: Mezcla de asfalto en tibio.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1	ANTECEDENTES GENERALES.....	13
1.2	OBJETIVOS DE LA MEMORIA.....	13
1.2.1	Objetivos generales	13
1.2.2	Objetivos específicos.	13
1.3	ALCANCES DE LA MEMORIA.....	14
1.4	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	15
1.5	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	15
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	INTRODUCCIÓN.....	16
2.2	ESTADO DE LA PRÁCTICA EN ESTADOS UNIDOS.....	16
2.2.1	Producción a nivel país.	17
2.2.2	Producción histórica de RAP desde 2009.....	19
2.2.3	Cantidad de RAP utilizada por estado para mezclas HMA/WMA.....	20
2.3	ESTADO DE LA PRACTICA EN EUROPA.	21
2.3.1	Producción total de mezcla HMA/WMA.....	22
2.3.2	Producción de RAP disponible para ser utilizado	23
2.3.3	Porcentaje de RAP disponible para ser utilizado.....	25
2.3.4	Cantidad de RAP utilizado	26
2.4	DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS DE ASFALTO EN CALIENTE MEDIANTE MÉTODO SUPERPAVE.	27
2.4.1	Criterios para selección de materiales.....	27
2.4.1.1	Asfalto	27
2.4.1.2	Agregados	27
2.4.1.2.1	Propiedades de consenso.....	28
2.4.1.2.2	Propiedades de origen.....	28
2.4.1.2.3	Granulometría.....	28
2.4.1.3	Requisitos SUPERPAVE para mezcla.	29
2.4.2	Preparación de la muestra y compactación.....	30
2.4.3	Preparación de las mezclas.	30
2.4.4	Análisis de datos.....	31
2.4.4.1	Determinación de contenido de asfalto inicial.	31
2.4.4.2	Densidad seca estimada para probetas a distintos niveles de compactación.....	32
2.4.4.3	Densidad real corregida.....	33
2.4.4.4	Porcentaje de densidad con respecto a la máxima para los distintos niveles de compactación.	34
2.4.4.5	Vacios de aire.	34
2.4.4.6	Vacios en el agregado mineral.	34
2.4.4.7	Vacios llenos con asfalto.	35
2.4.4.8	Contenido de ligante asfáltico efectivo.	35
2.4.4.9	Proporción de polvo.	35
2.4.4.10	Propiedades estimadas.	36
2.4.4.10.1	Asfalto estimado.	36
2.4.4.10.2	Vacios en el agregado mineral.	36
2.4.4.10.3	Vacios llenos con asfalto.	36
2.4.4.10.4	Contenido de ligante asfáltico efectivo.	36
2.4.4.10.5	Proporción de polvo.....	37
2.4.4.10.6	G _{mm} estimado a giros iniciales.....	37
2.4.4.10.7	G _{mm} estimado a giros máximos.....	37
2.5	DISEÑO PARA MEZCLAS DE ASFALTO EN CALIENTE CON RAP.....	39
2.5.1	Determinación del contenido de asfalto del RAP.....	39
2.5.2	Gravedad específica del RAP	39
2.5.2.1	Método 1.....	39

2.5.2.2	Método 2.....	39
2.5.2.3	Determinar G_{mm} del RAP.....	39
2.5.2.4	Calcular G_{se} y G_{sb} del RAP.....	40
2.5.3	Propiedades de consenso de los agregados.....	40
2.5.4	Propiedades del ligante proveniente del RAP.....	40
2.5.5	Selección del ligante apropiado para la mezcla.....	41
2.5.6	Gráficos de mezclado y utilización de sistema PG.....	41
2.5.6.1	Determinación del ligante virgen cuando se conoce el grado objetivo y la cantidad de RAP.....	41
2.5.6.2	Determinación de cantidad de RAP cuando el grado del ligante y las propiedades del RAP son conocidas.....	42
2.5.7	Desarrollo de la mezcla.....	43
2.5.7.1	Determinación de la granulometría.....	43
2.5.7.2	Manejo del RAP y los agregados vírgenes en el proceso de mezcla.....	43
2.5.7.3	Cantidad de ligante virgen necesaria.....	44
2.6	ENSAYOS DE DESEMPEÑO A DESARROLLAR.....	45
2.6.1	Rueda de Hamburgo.....	45
2.6.1.1	Ensayo Rueda de Hamburgo.....	46
2.6.2	Tensile Strength Ratio (TSR).....	47
2.6.3	Fatiga.....	49
2.6.3.1	Ensayo flexión en cuatro puntos.....	49
2.6.3.2	Enfoque fenomenológico.....	51
2.6.3.3	Enfoque energía disipada.....	52
2.6.4	Rigidez.....	53
2.7	DESEMPEÑO DE MEZCLAS CON RAP.....	55
2.7.1	Efectos del RAP frente a distintos deterioros.....	55
2.7.1.1	Agrietamiento por Fatiga.....	56
2.7.1.2	Agrietamiento longitudinal.....	58
2.7.1.3	Agrietamiento transversal.....	60
2.7.1.4	Ahuellamiento.....	62
2.7.1.5	Regularidad.....	64
2.7.2	Sensibilidad a la humedad.....	66
2.7.2.1	Falla de adhesión entre el asfalto y el agregado.....	66
2.7.2.2	Falla de cohesión del asfalto.....	66
2.7.2.3	Falla de cohesión de los agregados.....	66
2.7.2.4	Emulsificación espontánea.....	66
2.7.2.5	Congelamiento.....	66
2.7.3	Efectos del RAP sobre ensayos a desarrollar.....	67
2.7.3.1	Efectos del RAP sobre el TSR.....	67
2.7.3.2	Efectos del RAP sobre la fatiga.....	69
2.8	EXPERIENCIA NACIONAL.....	70
2.8.1	Manual de carreteras.....	70
2.8.2	Tramos de prueba.....	70
3	TRABAJO EN LABORATORIO.....	72
3.1	DISEÑO SUPERPAVE PARA AEROPUERTO COMODORO ARTURO MERINO BENÍTEZ.....	72
3.1.1	Tamizado del material.....	72
3.1.2	Propiedades de origen y consenso.....	73
3.1.3	Propiedades del Ligante.....	74
3.1.4	Selección de combinaciones para mezclas de prueba.....	74
3.1.5	Límites SUPERPAVE para propiedades de origen y consenso referidas a la mezcla.....	75
3.1.6	Propiedades Volumétricas de las mezclas de prueba.....	75
3.1.7	Mezclas de diseño.....	78
3.1.7.1	Contenido de ligante.....	79
3.1.7.2	Densidades de las mezclas.....	79
3.1.7.3	Resultados de propiedades volumétricas para cada mezcla.....	79
3.2	DISEÑO SUPERPAVE DE MEZCLAS CON RAP.....	84
3.2.1	Tamizado del material.....	84
3.2.2	Propiedades de origen y consenso.....	85
3.2.3	Propiedades del Ligante.....	86
3.2.4	Mezclas de prueba.....	86

3.2.5	Limites SUPERPAVE para propiedades de origen y consenso referidas a la mezcla.	87
3.2.6	Propiedades Volumétricas de las mezclas de prueba.	87
3.2.7	Mezclas de diseño 15% de RAP	87
3.2.7.1	Contenido de ligante	88
3.2.7.2	Densidades de las mezclas	88
3.2.7.3	Resultados de propiedades volumétricas para cada mezcla	88
3.2.8	Mezclas de diseño 25% de RAP	92
3.2.8.1	Contenido de ligante	92
3.2.8.2	Densidades de las mezclas	92
3.2.8.3	Resultados de propiedades volumétricas para cada mezcla	93
3.3	TSR	97
3.3.1	Resultados TSR Aeropuerto (0% de RAP).	97
3.3.2	Resultados TSR 15% RAP	97
3.3.3	Resultados TSR 25% RAP	98
3.3.4	Comentario de Resultados.	98
3.4	RUEDA DE HAMBURGO	98
3.4.1	Resultados Hamburgo Aeropuerto (0% de RAP).	98
3.4.2	Resultados Hamburgo 15% de RAP	99
3.4.3	Resultados Hamburgo 25% de RAP	100
3.4.4	Comentario de Resultados.	101
3.5	RIGIDEZ	101
3.5.1	Resultados Rigidez Aeropuerto.	102
3.5.2	Resultados Rigidez 15% de RAP	102
3.5.3	Resultados Rigidez 25% de RAP	102
3.5.4	Comentario de resultados.	103
3.6	FATIGA	103
3.6.1	Fatiga Aeropuerto (0% de RAP).	103
3.6.2	Fatiga 15% de RAP	104
3.6.3	Fatiga 25% de RAP	104
3.6.4	Comentario de resultados.	104
4	ANALISIS DE RESULTADOS	105
4.1	TSR	105
4.2	RUEDA DE HAMBURGO	105
4.3	RIGIDEZ	106
4.4	FATIGA	107
5	CONCLUSIONES	108
6	BIBLIOGRAFIA	110
7	ANEXOS	112
7.1	TSR	112
7.1.1	TSR Aeropuerto	112
7.1.2	TSR 15%	113
	TSR 25%	114
7.2	RIGIDEZ	115
7.2.1	Diseño Aeropuerto	115
7.2.1.1	Probeta 1-1	115
7.2.1.2	Probeta 1-2	116
7.2.1.3	Probeta 2-1	117
7.2.1.4	Probeta 2-2	118
7.2.2	Diseño 15% de	119
7.2.2.1	Probeta 1-1	119

7.2.2.2	Probeta 1-2	120
7.2.2.3	Probeta 2-1	121
7.2.2.4	Probeta 2-2	122
7.2.3	Diseño 25%	123
7.2.3.1	Probeta 1-1	123
7.2.3.2	Probeta 1-2	124
7.2.3.3	Probeta 2-1	125
7.2.3.4	Probeta 2-2	126
7.3	RUEDA DE HAMBURGO	127
7.3.1	Diseño Aeropuerto	127
7.3.1.1	Probeta 1	127
7.3.1.2	Probeta 2	127
7.3.2	Diseño 15% de RAP	128
7.3.2.1	Probeta 1	128
7.3.2.2	Probeta 2	128
7.3.3	Diseño 25% de RAP	129
7.3.3.1	Probeta 1	129
7.3.3.2	Probeta 2	129
7.4	PARAMETROS VOLUMETRICOS MEZCLAS DE PRUEBA.....	130
7.4.1	Diseño 15% de RAP	130
7.4.2	Diseño 25% de RAP	131

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Tabla resumen de producción para años 2015-2016.....	19
Tabla 2-2. Producción y uso histórico de RAP, en millones de toneladas.	19
Tabla 2-3 Producción total de HMA/WMA (millones de toneladas).....	22
Tabla 2-4 Producción aceptada de RAP (millones de toneladas).	24
Tabla 2-5 Uso de RAP disponible.	26
Tabla 2-6. Puntos de control SUPERPAVE.....	29
Tabla 2-7. Límites SUPERPAVE.....	38
Tabla 2-8. Recomendación respecto a tipo de ligante por cantidad de RAP.....	41
Tabla 2-9 Parametros del tramo de prueba en la ruta F-50.	70
Tabla 3-1 Porcentaje de material que pasa por cada tamiz.	72
Tabla 3-2. Propiedades de origen pertenecientes a los agregados que se utilizaran en la confección de la mezcla.	74
Tabla 3-3. Propiedades de consenso pertenecientes a los agregados que se utilizaran en la confección de la mezcla.	74
Tabla 3-4. Datos de compactación y gravedades brutas estimadas.	76
Tabla 3-5. Gravedad específica bruta medida mediante ensayo.	76
Tabla 3-6. Gravedades específicas corregidas.	76
Tabla 3-7. Porcentaje de gravedad específica sobre el máximo teórico a distintos niveles de compactación.	77
Tabla 3-8. Vacíos de aire en las mezclas.	77
Tabla 3-9. Vacíos en el agregado mineral.....	77
Tabla 3-10. Vacíos llenos con asfalto.	78
Tabla 3-11. Asfalto estimado para alcanzar los vacíos de diseño.....	78
Tabla 3-12. Límites establecidos para la mezcla de acuerdo con el método SUPERPAVE.....	78
Tabla 3-13. Contenido de ligante de mezclas de diseño	79
Tabla 3-14. Densidades para cada mezcla de diseño.	79

Tabla 3-15. Requisitos SUPERPAVE.....	80
Tabla 3-16. Propiedades estimadas para 3,5% de vacíos de aire.	83
Tabla 3-17 Porcentaje de material que pasa por cada tamiz.	84
Tabla 3-18. Propiedades de origen pertenecientes a los agregados que se utilizaran en la confección de la mezcla.	85
Tabla 3-19. Propiedades de consenso pertenecientes a los agregados que se utilizaran en la confección de la mezcla.	86
Tabla 3-20. Contenido de ligante de mezclas de diseño	88
Tabla 3-21. Densidades para cada mezcla de diseño.	88
Tabla 3-22. Requisitos SUPERPAVE.....	88
Tabla 3-23. Propiedades estimadas para 3,5% de vacíos de aire.	92
Tabla 3-24. Contenido de ligante de mezclas de diseño	92
Tabla 3-25. Densidades para cada mezcla de diseño.	92
Tabla 3-26. Requisitos SUPERPAVE.....	93
Tabla 3-27 Propiedades estimadas para 4% de vacíos de aire.	93
Tabla 3-28. Propiedades estimadas para 3,5% de vacíos de aire.	97
Tabla 3-29. Resumen ensayo TSR Aeropuerto.	97
Tabla 3-30. Resumen ensayo TSR 15% de RAP.....	97
Tabla 3-31. Resumen ensayo TSR 15% de RAP.....	98
Tabla 3-32. Resumen de resultado para ensayo Rueda de Hamburgo mezcla aeropuerto.	98
Tabla 3-33. Resumen de resultado para ensayo Rueda de Hamburgo mezcla 15% RAP.	99
Tabla 3-34. Resumen de resultado para ensayo Rueda de Hamburgo mezcla 15% RAP.	100
Tabla 3-35. Módulo de rigidez aeropuerto a 15 [°C].....	102
Tabla 3-36. Módulo de rigidez aeropuerto a 32 [°C].....	102
Tabla 3-37. Módulo de rigidez 15% de RAP a 15 [°C].....	102
Tabla 3-38. Módulo de rigidez 25% de RAP a 15 [°C].....	102
Tabla 3-39. Parámetros de entrada para ensayo de fatiga.	103
Tabla 3-40. Fatiga Aeropuerto.	103
Tabla 3-41. Fatiga 15% de RAP.	104
Tabla 3-42. Fatiga 25% de RAP.	104
Tabla 4-1 Resultados de distintos ensayos TSR	105
Tabla 4-2. Resultados de distintos ensayos de Rueda de Hamburgo.	105
Tabla 4-3. Resultados de ensayo de rigidez.	106
Tabla 4-4. Resultados de ensayo de fatiga a 500 [µε].	107

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 2-1. Datos históricos de RAP en EE. UU. Fuente: Elaboración propia con datos de 7 th Annual Pavement Industry Survey.....	20
Gráfico 2-2. Producción total de HMA/WMA (millones de toneladas).	23
Gráfico 2-3. RAP disponible para ser utilizado por país.....	24
Gráfico 2-4. RAP con respecto al total de mezcla en caliente y mezcla tibia.	25
Gráfico 3-1. Carta granulométrica de los áridos que se utilizaran en el diseño de la mezcla.	73
Gráfico 3-2. Carta Granulométrica para mezclas de prueba.	75
Gráfico 3-3. Vacíos de aire a distintos contenidos de ligante.	80

Gráfico 3-4. Vacíos en el agregado mineral a distintos contenidos de ligante.	81
Gráfico 3-5. Vacíos llenos con asfalto a distintos contenidos de ligante.	81
Gráfico 3-6. Proporción de polvo a distintos contenidos de ligante.	82
Gráfico 3-7. Porcentaje de densidad máxima para giros iniciales a distintos contenidos de ligante.	82
Gráfico 3-8. Porcentaje de densidad máxima para giros máximos a distintos contenidos de ligante.	83
Gráfico 3-9. Carta granulométrica de los áridos que se utilizaran en el diseño de la mezcla.	85
Gráfico 3-10. Carta granulométrica para mezclas de prueba con 15% de RAP.	86
Gráfico 3-11. Carta granulométrica para mezclas de prueba con 25% de RAP.	87
Gráfico 3-12. Vacíos de aire a distintos contenidos de ligante.	89
Gráfico 3-13. Vacíos en el agregado mineral a distintos contenidos de ligante.	89
Gráfico 3-14. Vacíos llenos con asfalto a distintos contenidos de ligante.	90
Gráfico 3-15. Proporción de polvo a distintos contenidos de ligante.	90
Gráfico 3-16. Porcentaje de densidad máxima para giros iniciales a distintos contenidos de ligante.	91
Gráfico 3-17. Porcentaje de densidad máxima para giros máximos a distintos contenidos de ligante.	91
Gráfico 3-18. Vacíos de aire a distintos contenidos de ligante.	94
Gráfico 3-19. Vacíos en el agregado mineral a distintos contenidos de ligante.	94
Gráfico 3-20. Vacíos llenos con asfalto a distintos contenidos de ligante.	95
Gráfico 3-21. Proporción de polvo a distintos contenidos de ligante.	95
Gráfico 3-22. Porcentaje de densidad máxima para giros iniciales a distintos contenidos de ligante.	96
Gráfico 3-23. Porcentaje de densidad máxima para giros máximos a distintos contenidos de ligante.	96
Gráfico 3-24. Profundidad de ahuellamiento a lo largo del ensayo Rueda de Hamburgo mezcla aeropuerto.	99
Gráfico 3-25. Profundidad de ahuellamiento a lo largo del ensayo Rueda de Hamburgo mezcla aeropuerto.	100
Gráfico 3-26. Profundidad de ahuellamiento a lo largo del ensayo Rueda de Hamburgo mezcla aeropuerto.	101

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Plantas de producción que respondieron la encuesta por región y tonelaje promedio por planta, 2009-2016.	18
Figura 2-2 Evolución de uso de RAP en distintos estados de EE.UU.	21
Figura 2-3. Resultados comunes para el ensayo de Rueda de Hamburgo.	45
Figura 2-4. Diagrama molde rueda de Hamburgo.	46
Figura 2-5. Probetas puestas en el molde previo al ensayo.	47
Figura 2-6. Diagrama de carga ensayo tracción indirecta.	48
Figura 2-7. Diagrama ensayo de fatiga en cuatro puntos.	50
Figura 2-8. Diagrama de la carga aplicada a la probeta.	54
Figura 2-9. Agrietamiento por fatiga en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor.	56
Figura 2-10 Funciones de supervivencia de fatiga basados en los 18 sitios 5-SPS.	57
Figura 2-11. Agrietamiento por fatiga en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor.	58
Figura 2-12. Funciones de supervivencia de regularidad basados en los 18 sitios 5-SPS.	59
Figura 2-13. Agrietamiento por fatiga en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor.	60
Figura 2-14 Funciones de supervivencia de regularidad basados en los 18 sitios 5-SPS.	61
Figura 2-15. Agrietamiento por fatiga en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor.	62
Figura 2-16 Funciones de supervivencia de regularidad basados en los 18 sitios 5-SPS.	63

Figura 2-17 IRI en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor	64
Figura 2-18 Funciones de supervivencia de regularidad basados en los 18 sitios 5-SPS.	65
Figura 2-19. Resistencia a la tracción para probetas sin acondicionamiento.	67
Figura 2-20. Resistencia a la tracción para probetas acondicionamiento.	68
Figura 2-21. Razón entre resistencia a tracción de probetas acondicionadas sobre probetas secas.	68
Figura 2-22 Resultados de Fatiga para PG 64-22 y PG 70-28.	69

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

Durante los últimos años se ha comenzado a potenciar el diseño de mezclas SUPERPAVE en nuestro país, desarrollándose diversas memorias de título y proyectos, realizadas en Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO), perteneciente a la Universidad Técnica Federico Santa María, con el fin de mejorar y actualizar el diseño de pavimentos flexibles utilizado en Chile.

Entre ellos destaca el proyecto de estacionamiento para aeronaves desarrollado para la DAP (Dirección de Aeropuertos) en el Aeropuerto Comodoro Arturo Merino Benítez, el cual se llevó a cabo utilizando la metodología SUPERPAVE. Este proyecto obtuvo resultados muy favorables, lo que provocó la licitación de otro proyecto de diseño SUPERPAVE, el cual se desarrolla en la presente memoria.

El diseño SUPERPAVE presenta una caracterización más adecuada del ligante asfáltico, sus ensayos se enfocan en la obtención de propiedades, tanto de los componentes como de la mezcla. Estas propiedades pueden ser utilizadas junto a un método de diseño estructural adecuado, como Mechanistic-Empirical Pavement Design (MEPDG), logrando predecir deterioros debido a ahuellamiento, agrietamiento térmico y agrietamiento por fatiga, con una mayor precisión.

Esta memoria de título se enfoca en evaluar y comparar el desempeño entre una mezcla virgen, la cual será utilizada para un proyecto real, y una mezcla con RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), ambas diseñadas mediante el método SUPERPAVE.

1.2 OBJETIVOS DE LA MEMORIA

1.2.1 Objetivos generales

Incorporar la metodología de diseño de mezclas asfálticas SUPERPAVE al empleo de mezclas recicladas en aeropuertos, mediante la confección de tres mezclas asfálticas, la primera sin contenido de RAP y las siguientes con un 15% y 25% respectivamente.

1.2.2 Objetivos específicos.

Diseñar una mezcla en caliente con asfalto modificado mediante el método de diseño SUPERPAVE, que será utilizada para la construcción de carpetas asfálticas en el Aeropuerto Comodoro Arturo Merino Benítez, específicamente para el proyecto “Conservación mayor pista 17R-35L y rodajes asociados aeropuerto Arturo Merino Benítez, 2017-2018” desarrollado por Constructora Asfalcura S.A.

Diseñar mezclas asfálticas con dos contenidos de RAP (15% y 25%) desarrolladas mediante el método SUPERPAVE, considerando las diferencias especificadas al utilizar RAP, intentando replicar la granulometría del diseño utilizada en el proyecto anteriormente mencionado.

Comprobar si el desempeño de las mezclas con RAP es adecuado en contraste con el diseño original, mediante la ejecución de ensayos de Rueda de Hamburgo, Susceptibilidad a la Humedad, Fatiga y Rigidez, para establecer la factibilidad del empleo de mezclas recicladas en pavimentos aeroportuarios.

Comparar los resultados obtenidos en los ensayos anteriormente mencionados, con experiencias anteriores realizadas en la Universidad Técnica Federico Santa María, para comprobar como es el desempeño, de las mezclas diseñadas en el presente estudio, en relación con otros tipos de mezcla asfáltica.

1.3 ALCANCES DE LA MEMORIA

La presente memoria de título se enmarca dentro del proyecto “Conservación mayor pista 17R-35L y rodajes asociados aeropuerto Arturo Merino Benítez, 2017-2018”, ejecutado por la constructora Asfalcura S.A. con el apoyo técnico del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras.

Los temas desarrollados comprenden el diseño de una mezcla SUPERPAVE para pavimentos aeroportuarios utilizando exclusivamente ligante virgen, la cual será utilizada en el proyecto anteriormente mencionado. Adicionalmente se diseñan dos mezclas con distintos contenidos de RAP, ambas mediante el método SUPERPAVE, utilizando una granulometría similar a la del diseño original. Todas las mezclas se someten a cuatro ensayos: Rigidez, Fatiga, Rueda de Hamburgo y TSR, y luego se evalúa y compara el desempeño de cada una, con el objetivo de establecer la factibilidad del empleo de mezclas recicladas en pavimentos aeroportuarios.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

De manera general, la metodología de trabajo utilizada en el desarrollo de esta memoria para lograr alcanzar los objetivos propuestos consiste en:

- Realizar una revisión bibliográfica de documentos oficiales de distintos entes tales como: “MS-2 Asphalt Mix Design Methods”, normas AASHTO, normas ASTM relacionadas a la confección de mezclas asfálticas mediante el método SUPERPAVE.
- Estudiar y establecer las diferencias al utilizar RAP en el diseño de mezclas mediante el método SUPERPAVE.
- Realizar una revisión bibliográfica de ensayos de desempeño utilizados para predecir el comportamiento de las mezclas realizadas mediante el método SUPERPAVE.
- Confeccionar mezclas mediante el método SUPERPAVE enfocadas en pavimentos aeroportuarios.
- Confeccionar mezclas con distintos contenidos de RAP mediante el método SUPERPAVE enfocadas en pavimentos aeroportuarios.
- Realizar ensayos de desempeño elegidos en los casos anteriormente mencionados, analizar y comparar los resultados obtenidos de ambas experiencias
- Concluir y comentar sobre lo desarrollado en esta memoria.

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

- Capítulo 1: Introducción, objetivos, alcances y descripción general de la memoria.
- Capítulo 2: Recopilación bibliográfica del estado de la práctica de mezclas con RAP en Europa y EE. UU. Estudio del método de diseño SUPERPAVE para mezclas con y sin RAP. Desempeño de mezclas con RAP. Propiedades que ensayar.
- Capítulo 3: Se presenta el trabajo realizado en el laboratorio y un resumen de los resultados obtenidos.
- Capítulo 4: Análisis y comparación de datos obtenidos con experiencias anteriores.
- Capítulo 5: Conclusiones y comentarios finales.
- Bibliografía
- Anexo: Resultados completos.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta en forma resumida el estado de la práctica en EE. UU. y Europa respecto a mezclas que contienen RAP. A continuación, se analizan las diferencias que existen entre el método de diseño SUPERPAVE tradicional y cuando la mezcla contiene RAP. Además, se estudia el desempeño que las mezclas con RAP poseen frente a deterioros como: ahuellamiento, fatiga y agrietamiento longitudinal y transversal, por otra parte, es necesario establecer las diferencias en cuanto a las propiedades del material como lo son Módulo Dinámico, Rigidez, entre otras, al contener asfalto reciclado. Para finalizar, se revisa la experiencia en Chile utilizando RAP, el método de diseño Volumétrico a utilizar y las diferencias al incorporar RAP a la mezcla asfáltica.

2.2 ESTADO DE LA PRÁCTICA EN ESTADOS UNIDOS.

Las primeras experiencias utilizando asfalto reciclado en los Estados Unidos comienza alrededor del año 1977 en Texas y Nevada mediante el establecimiento de pistas de prueba. Transcurridos 19 años se realizó una encuesta a 12 estados donde se pudo comprobar que el 33% de las mezclas en caliente contenían asfalto reciclado. En el año 2001 el Departamento de Transporte de Illinois utilizó 623.000 Toneladas de RAP en construcción de autopistas y en aquel momento estimó que la cifra seguiría en aumento, entonces se postuló que el uso de RAP no solo sería una herramienta para alcanzar un beneficio económico, sino también una necesidad para asegurar que la competitividad de la empresa (Sullivan, 2006).

En este contexto en el año 2017 la National Asphalt Pavement Association (NAPA) realizó una encuesta denominada “Asphalt Pavement Mix Production survey” (National Asphalt Pavement Association, 2017) respecto del reciclaje del asfalto, cabe destacar que todos los datos recaudados al respecto fueron obtenidos a partir de esta encuesta, donde se destaca lo siguiente:

- Los productores de mezcla asfáltica son los recicladores más diligentes de EE. UU. logrando un reciclaje de más del 99% proveniente desde viejas construcciones.
- El total de toneladas estimadas de RAP utilizadas en mezclas asfálticas alcanzó 76,9 millones de toneladas en 2016. Este es un aumento del 3.6% con respecto a la temporada de construcción de 2015 y representa un aumento de más del 37% del total de toneladas estimadas de RAP utilizadas en 2009, año en que se realizó la primera encuesta a la industria. Durante el mismo periodo de tiempo, la producción total de la mezcla de asfalto aumentó solo 4.6%, esto demuestra el avance que ha tenido la utilización de RAP en los EE. UU.

- Se estima que el uso de RAP durante 2016 ahorró 3.8 millones de toneladas (21.5 millones de barriles) de asfalto y más de 73 millones de toneladas de agregado, con un valor total estimado de más de 2 mil millones de USD.
- Se estima que la cantidad total de RAP almacenada en todo EE.UU. al final de 2016 fue de aproximadamente 93,6 millones de toneladas.
- Gracias a los proyectos con RAP no se utilizaron 38 millones de metros cúbicos en vertederos.
- La producción estimada de WMA para 2016 fue de 116.8 millones de toneladas. Esto representa una disminución de 2.5% de los estimados 119.8 millones de toneladas de WMA en 2015. El uso de mezclas tibias tuvo un aumento de tonelaje en el sector comercial y residencial; sin embargo, esto fue insuficiente para compensar la disminución de la producción de mezcla en el sector del departamento de transportes (DOT).
- Las mezclas tibias representan el 31.2% del total producido en el 2016 en los EE. UU.

2.2.1 Producción a nivel país.

Para tener una noción más certera de la demanda y producción en EE. UU. se creó una división regional por usuario/grupo de producción (UPG por User/Producer group), a continuación, se muestra de manera gráfica esta subdivisión.

La Figura 2-1 muestra el número de plantas de producción por región, así como el promedio de toneladas producidas por planta, separado por región de producción. Los grupos North Central Asphalt User/Producer Group (NEAUPG) y Rocky Mountains Asphalt User/Producer Group (RMAUPG) presentan una gran variabilidad entre los años 2015 y 2016, con aumentos notables en la cantidad de plantas que respondieron la encuesta, por otra parte, se puede apreciar una disminución notable en North Central Asphalt User/Producer Group (NCAUPG). De manera similar hay variabilidad en la producción reportada para el 2016 en comparación con años anteriores, en NEAUPG se observa una disminución de cantidad producida, en cuanto a South East Asphalt User/Producer Group (SEAUPG) experimentó un gran aumento en el promedio de tonelaje anual.

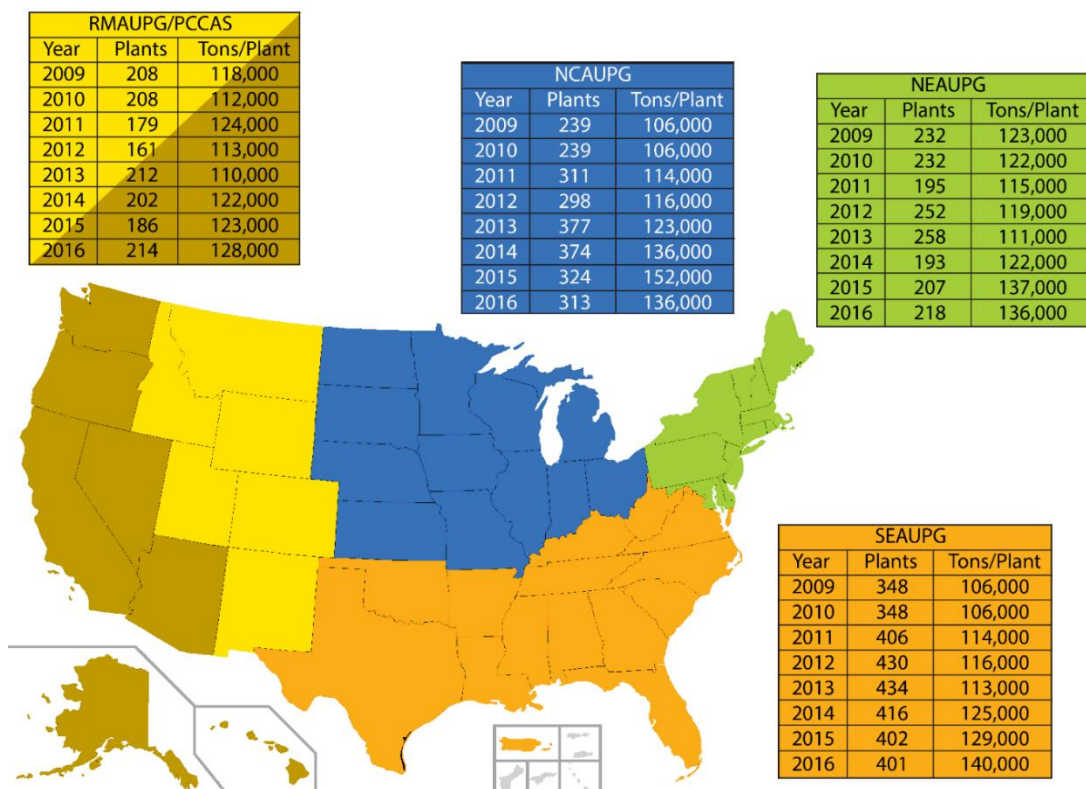


Figura 2-1 Plantas de producción que respondieron la encuesta por región y tonelaje promedio por planta, 2009-2016. Fuente: 7th Annual Pavement Industry Survey (National Asphalt Pavement Association, 2017).

La cantidad producida de asfalto por planta en promedio, para cada región, es similar independiente de en cual región se encuentre. Cabe destacar que esto representa la producción total de asfalto, a continuación, se revisará en detalle el porcentaje de RAP que corresponde a este valor.

La Tabla 2-1 muestra que la industria del RAP se mantiene en un estado muy adecuado, aumentando la cantidad aceptada en un 4,8%, además existen grandes reservas de este, si no existiera material para ser recuperado se podrían ejecutar los proyectos de un año promedio sin problemas. Se aprecia que el 20,5% de la producción total de HMA/WMA utiliza RAP.

Tabla 2-1: Tabla resumen de producción para años 2015-2016.

Producción total EE. UU.	Valores Estimados	
	2015	2016
Toneladas de HMAWMA Producidas	Millones de Toneladas	
Departamento de Transportes (DOT)	163.6	151.5
Otras agencias	95.5	102.1
Comercial y residencial	105.8	121.4
Total	364.9	374.9
RAP		
Aceptados	78	81.8
Usado en mezclas HMAWMA	74.2	76.9
Usado en agregados	5.5	3.7
Usado en mezclas frías	0.2	0.2
Usado en otros	1.6	0.4
Vertedero	1	0.1
Total, almacenado	85.13	93.59

Fuente: Elaboración propia con datos de 7th Annual Pavement Industry Survey (National Asphalt Pavement Association, 2017).

El RAP “aceptado” o “disponible” se refiere al total de asfalto recuperado de pavimentos viales existentes y está listo para ser reutilizado en construcciones nuevas de pavimento asfáltico. Esto no significa que todo se va a reutilizar, pero podría hacerse en caso de necesidad.

2.2.2 Producción histórica de RAP desde 2009.

Para apreciar mejor la evolución de la industria del RAP en los años más recientes se reunieron los datos entregados por la encuesta anteriormente mencionada y representados a través de una Tabla 2-2 y Gráfico 2-1.

Tabla 2-2. Producción y uso histórico de RAP, en millones de toneladas.

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
RAP Disponible	67.2	73.5	79.1	71.3	76.1	75.8	78	81.8
Usado en HMAWMA	56	62.1	66.7	68.3	67.8	71.9	74.2	76.9
Usado en agregado	6.2	7.3	4.9	3.6	4	8.5	5.5	3.7
Usado en mezclas frías	1.5	1.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Usado en otro	0.7	0.8	0.7	0.2	1.5	0.6	1.6	0.4
Vertedero	0.1	0	0.3	0.2	0.1	0.2	1	0.1

Fuente: Elaboración propia con datos de 7th Annual Pavement Industry Survey (National Asphalt Pavement Association, 2017).

El Gráfico 2-1, representa los datos de la Tabla 2-2, en rojo se muestra la evolución de la cantidad de RAP disponible para ser utilizado, mientras las barras muestran el total utilizado de este.

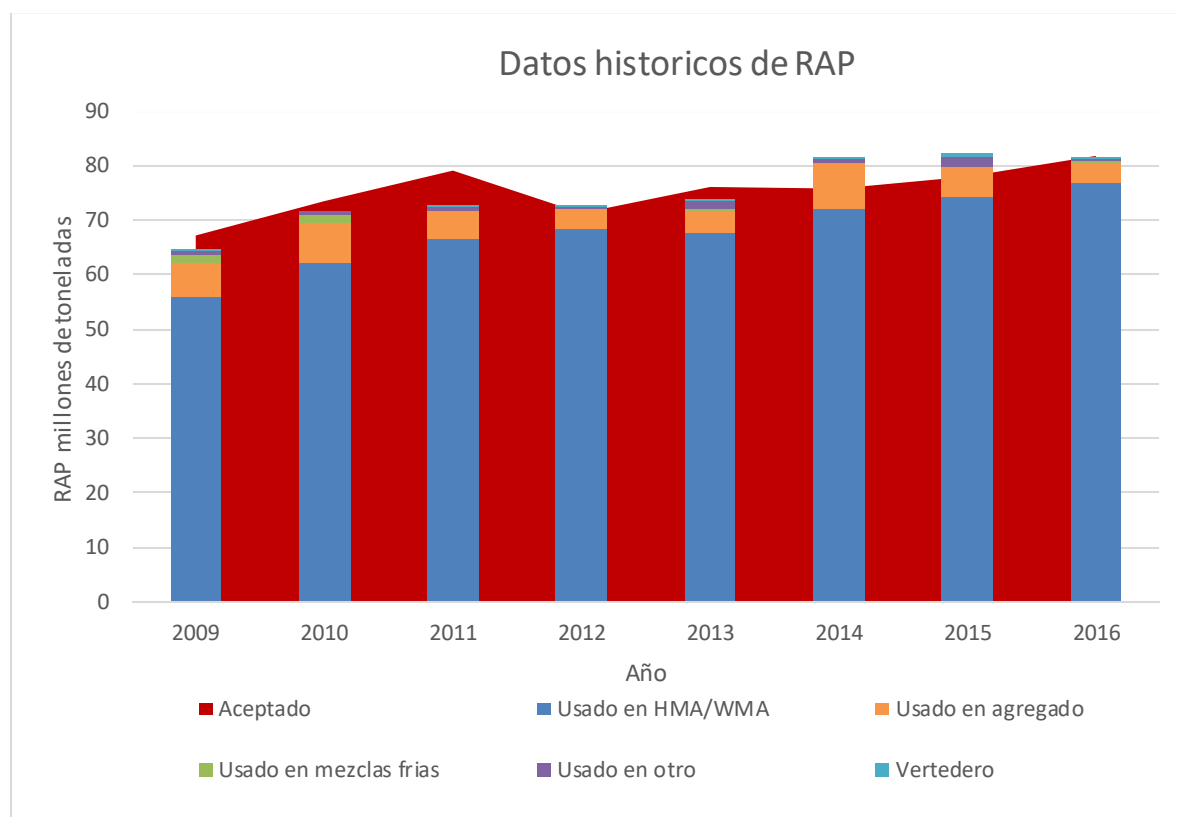


Gráfico 2-1. Datos históricos de RAP en EE. UU. Fuente: Elaboración propia con datos de 7th Annual Pavement Industry Survey (National Asphalt Pavement Association, 2017).

Lo primero que resalta del Gráfico 2-1 es que la cantidad de RAP aceptada es ligeramente mayor al total utilizado en el año, una de las ventajas de la industria es que este puede almacenarse para ser utilizado posteriormente sin necesidad de recurrir a vertederos cada vez que sobre.

2.2.3 Cantidad de RAP utilizada por estado para mezclas HMA/WMA.

Desde el año 2012 se tiene una base de datos bastante clara con respecto a la cantidad de RAP utilizada por estado. La situación inicial que se plantea es muy avanzada, con el paso del tiempo pese a altibajos sufridos en algunos estados, el promedio de uso aumenta, siendo mayor a un 20% para el 2016. Por otra parte, la cantidad de estados que superó el 20% en 2016 fueron 29, cuando se realizó la encuesta por primera vez en 2009 solo 10 estados superaban el 20%.

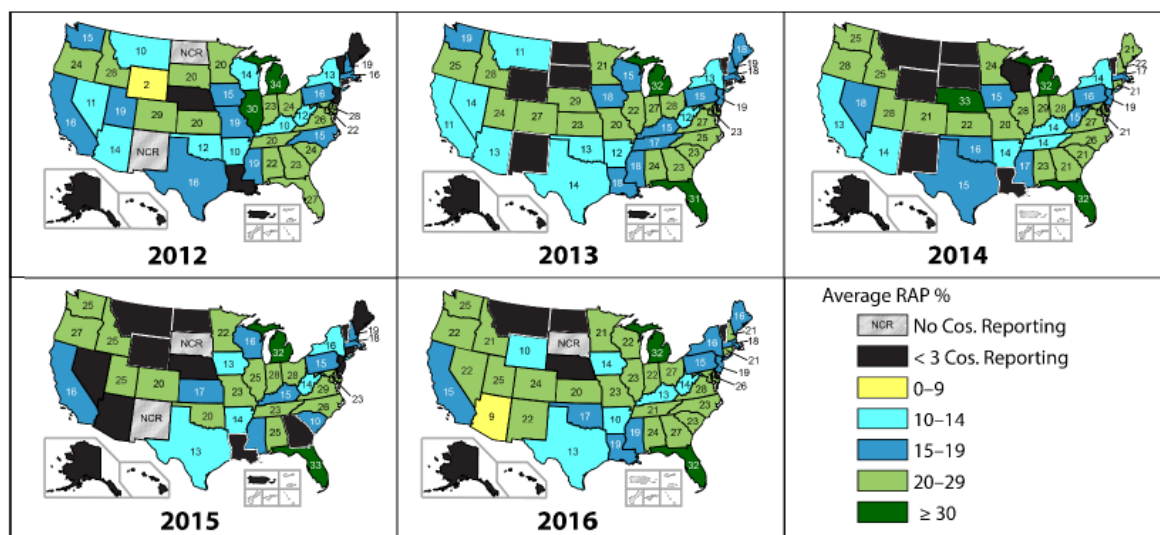


Figura 2-2 Evolución de uso de RAP en distintos estados de EE.UU. Fuente: 7th Annual Pavement Industry Survey (National Asphalt Pavement Association, 2017).

En la Figura 2-2 se puede observar la clara y sostenida evolución en cuanto a la cantidad utilizada de RAP por año, para los distintos estados de EE. UU.

2.3 ESTADO DE LA PRACTICA EN EUROPA.

El uso de RAP crece bastante en los años 70 en Europa, debido principalmente a los altos precios del crudo producto del embargo de petróleo árabe de 1973. El avance fue de tal magnitud que algunas de las practicas desarrolladas en ese entonces aún se ocupan y se han convertido en parte de la rutina de operaciones de pavimentación y rehabilitación de capas asfálticas.

Se debe señalar que los datos no comprenden el mismo nivel de detalle expuesto en la sección referida a EE. UU., debido a que se engloba a la Comunidad Europea y no todos los miembros son tan precisos al entregar información.

Los datos que se utilizan son proporcionados anualmente por European Asphalt Association (EAPA) en "Asphalt In figures" (European Asphalt Association, 2016) en particular lo referido a producción de mezclas HMA/WMA y utilización de RAP.

Para esto se seleccionaron a los países de mayor participación, que presentan más datos durante los años en los que se ha publicado dicho estudio (2001-2015), todos participantes de la EAPA, en este caso son: Dinamarca, Finlandia, Noruega, España, Francia, Alemania, Italia, Suiza, Suecia.

2.3.1 Producción total de mezcla HMA/WMA

Se estudiará la evolución de la producción total de mezclas HMA/WMA durante los últimos años para diferentes países de Europa. Se realizó una comparación de la producción de los países con el uso de asfalto reclamado disponible para ser utilizado en mezclas.

Tabla 2-3 Producción total de HMA/WMA (millones de toneladas)

País	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Dinamarca	2.8	2.8	2.9	3.6	3.2	3.4	3.3	3.1	2.7	3.2	4	3.6	3.7	3.7	3.7
Finlandia	3.6	3.9	4.9	5.6	6.2	5.5	5.9	6	5.2	4.9	5	4.5	4.5	4.7	5.4
Francia	40.5	39.4	38.7	40.5	40.1	41.5	42.3	41.8	40.1	38.8	39.2	35.3	35.3	31.9	31.5
Alemania	63	58	55	52	57	57	51	51	55	45	50	41	41	39	39
Gran Bretaña	26.5	27.8	27.8	26.9	27.9	25.7	25.7	25	20.5	21.5	22.4	18.5	18.5	20.6	21.9
Italia	39.8	39.9	42.4	46	40.1	39.9	35.1	36.5	34.9	29	28	23.2	23.2	22.3	23.1
Holanda	7.7	7.9	7.9	7.9	8.6	9.8	10.2	9.3	9.8	9.5	9.6	9.2	9.2	9	8
Noruega	4.1	3.9	4.1	4.5	5.1	5.1	5.9	5.7	6.5	5.9	6.7	6.3	6.3	7	6.9
España	30	30	42	38.9	41.5	43.4	49.9	42.3	39	34.4	29.3	19.5	19.5	14.5	16.4
Suecia	6.7	6.7	6.6	6.8	7.2	7.3	7.7	8.7	8.1	7.9	8.1	7.7	7.7	8.5	8.2
Suiza	5.1	5	4.8	4.6	4.7	5.4	5.2	5.3	5.4	5.3	5.4	4.8	4.8	6.5	6.5
Total	229.8	225.3	237.1	237.3	241.6	244	242.2	234.7	227.2	205.4	207.7	173.6	173.7	167.7	170.6

Fuente: Elaboración propia con datos de Asphalt in Figures 2001-2015 (European Asphalt Association, 2002-2016)

En la Tabla 2-3 se muestra la cantidad, en millones de toneladas, de mezcla HMA/WMA que se ha producido cada año. Es fácil observar la evolución de la producción total de asfalto, teniendo como valor total la suma de la cantidad producida por cada país.

Se puede observar que la producción se incrementó desde el 2001 hasta el 2006 para alcanzar 244 millones de toneladas, luego la producción disminuyó sostenidamente hasta el 2014, acumulando una reducción del 32% desde el 2006 para alcanzar un valor total de 167.7 millones de toneladas en 2014. El último año existió un leve crecimiento que refleja un 1.7% de aumento respecto de la producción total de mezcla HMA/WMA.

Dado que los datos globales tienden a entregar un aumento en la cantidad utilizada de asfalto, es preferible analizar a cada país de manera independiente debido a que hay factores como el porcentaje de vías asfaltadas, que en algunos casos llega a ser muy cercana al 100%, por lo que solo existen proyectos de expansión o mantenimiento, además la economía ha afectado a algunos de los países en estudio de manera diferenciada y más drástica que otros.

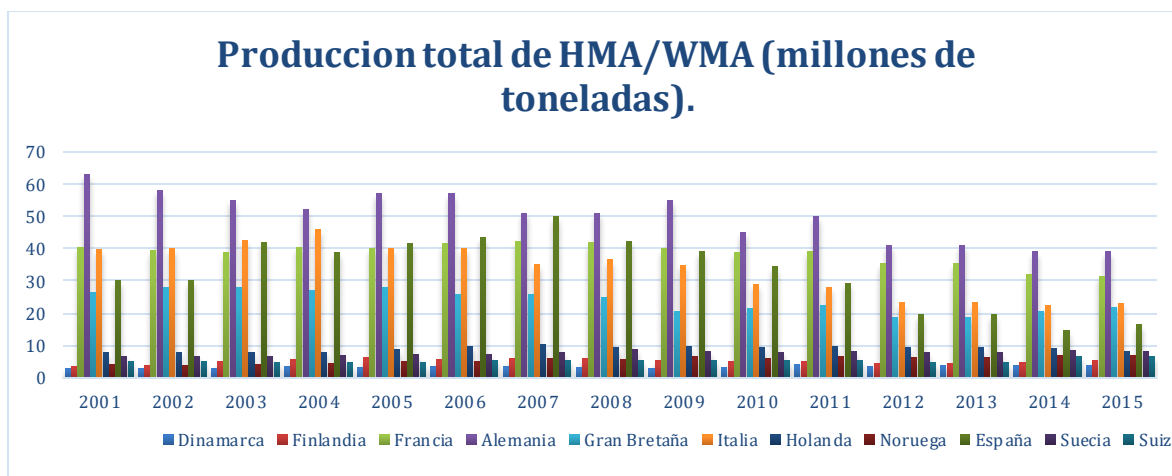


Gráfico 2-2. Producción total de HMA/WMA (millones de toneladas). Fuente: Elaboración propia con datos de Asphalt in Figures 2001-2015 (European Asphalt Association, 2002-2016)

En el Gráfico 2-2, se observa la producción anual de HMA/WMA (millones de toneladas) por país. Se destaca que Alemania ha sido a lo largo del periodo de estudio el país que más HMA/WMA ha producido, luego le siguen Italia y España, también es posible observar una sostenida disminución en la cantidad de mezcla producida por estos países, que a la vez son los mayores productores.

Es posible que esta tendencia se deba a la crisis económica que comenzó el 2007, limitando la construcción no solo inmobiliaria sino también de nuevos caminos y pavimentación.

Los países que más disminuyeron en este aspecto fueron:

- **Francia:** 2001: 40.5M toneladas, 2015: 31.5M toneladas disminución del 22.2%
- **Alemania:** 2001: 63M toneladas, 2015: 39M toneladas disminución del 38.1%
- **Italia:** 2001: 39.8M toneladas, 2015: 23.1M toneladas disminución del 41.9%
- **España:** 2001: 30M toneladas, 2015: 16.4M toneladas disminución del 45.3%

2.3.2 Producción de RAP disponible para ser utilizado

Pese a que las dificultades técnicas se han superado, el desarrollo de estas técnicas se ha producido de manera muy desigual en Europa. Existen países europeos en los que todas las plantas de fabricación de pavimentos están perfectamente equipadas con sistemas de molienda y equipos para el reciclado de RAP, y otros que, por el contrario, existen muy pocas plantas destinadas al reciclaje.

El RAP "aceptado" es el total disponible recuperado de pavimentos viales existentes y está listo para ser reutilizado en construcciones nuevas de pavimento asfáltico. Esto no significa que todo se reutilizará, pero podría hacerse en caso de necesidad.

Tabla 2-4 Producción aceptada de RAP (millones de toneladas).

País	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Dinamarca	0.22	0.24	0.29	0.27	0.22	0.24	0.48	0.41	0.31	0.35	0.60	0.58	0.79	1.30	1.30
Finlandia	0.20	0.37	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.86	1.00	1.16
Francia	5.00	5.00	5.10	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	7.05	7.08	7.08	6.50	6.90	9.24	7.00
Alemania	15.00	15.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	11.50	11.50	10.90	11.00
Gran Bretaña	5.00	sin datos	5.00	5.00	4.50	5.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.50	4.50	4.50	3.35	3.50
Italia	13.00	13.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	13.00	12.00	11.00	11.00	10.00	10.00	9.00	9.00
Holanda	3.50	3.50	4.00	3.80	3.00	3.40	3.50	3.50	4.50	4.00	4.00	4.00	4.50	4.50	4.50
Noruega	0.52	0.47	0.26	0.29	0.41	0.59	0.62	0.72	0.76	0.75	0.73	0.79	0.69	0.84	0.93
España	sin datos	sin datos	sin datos	1.64	2.25	0.69	1.25	1.15	1.85	1.59	1.35	0.37	0.21	0.39	0.41
Suecia	1.00	0.90	0.75	0.80	0.75	0.65	0.90	1.00	1.00	1.10	1.10	1.00	0.90	1.20	1.60
Suiza	1.75	1.90	2.10	2.30	0.90	0.95	0.98	1.10	1.20	1.45	1.75	1.58	1.37	1.00	sin datos
Total	45.19	40.38	45.51	48.60	46.53	46.02	46.22	45.88	47.17	46.32	47.11	41.81	42.21	42.72	40.40

Fuente: Elaboración propia con datos de Asphalt in Figures 2001-2015 (European Asphalt Association, 2002-2016)

En la Tabla 2-4 observa que, desde 2001, no ha habido muchos cambios en la cantidad total de asfalto recuperado disponible. Al comparar la cantidad total de RAP aceptado, aproximadamente 40 millones de toneladas, con la cantidad total de asfalto producido, alrededor de 200 millones de toneladas se observa que el RAP corresponde al 20% de la producción total. Por otra parte, se puede observar una disminución en 2015 del RAP con respecto a años anteriores, sin embargo, no se cuenta con datos de Suiza, por lo que es posible que esto explique en alguna parte la baja.

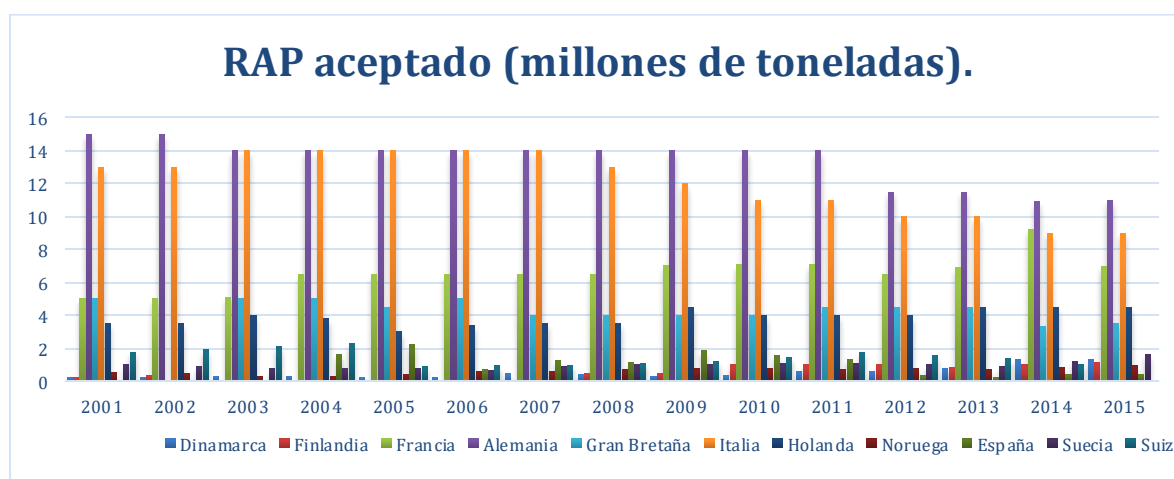


Gráfico 2-3. RAP disponible para ser utilizado por país. Fuente: Elaboración propia con datos de Asphalt in Figures 2001-2015 (European Asphalt Association, 2002-2016)

Del Gráfico 2-3 se observa que Alemania e Italia son los países con más RAP disponible que el resto, con más de 10 millones de toneladas en la mayoría de los años. También destacan: Francia, Gran Bretaña y Holanda, que tienen casi siempre más de 4 millones de toneladas de RAP disponible. Por otra

parte, España pese a producir una cantidad considerable de HMA/WMA tiene una gran deuda en cuanto al RAP producido.

En Alemania y Holanda, prácticamente el 100% de las plantas disponibles están listas para la incorporación de RAP. En Europa en 2012, había 3969 plantas fijas y 754 plantas móviles, lo que hace un total de 4723 plantas de producción de asfalto. De este número, solo 1946 están preparadas para incorporar RAP lo que corresponde a un 41.2%. Esta información refleja que el desarrollo con respecto al reciclaje no ha sido semejante entre los países que componen el estudio.

2.3.3 Porcentaje de RAP disponible para ser utilizado.

Se compara la cantidad de RAP disponible con la cantidad total de producción de mezcla HMA/WMA, dado que el RAP disponible es una pequeña porción del asfalto total producido se debe evaluar cómo se comporta el porcentaje total de RAP con respecto a la producción total de asfalto.

Para esto se consideró la suma del total de producción de HMA/WMA y el total de RAP producido por todos los países estudiados.

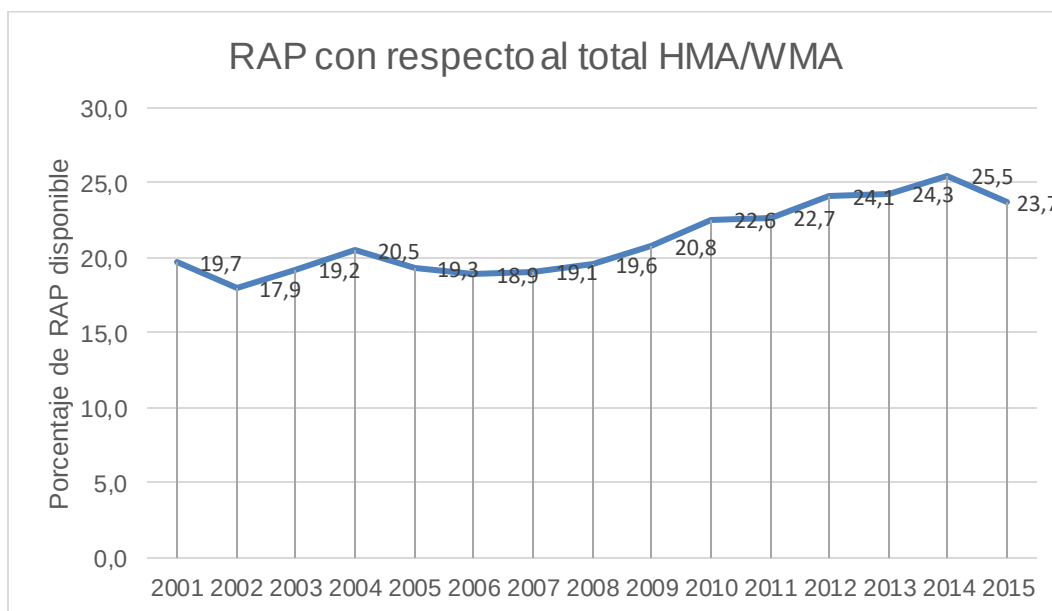


Gráfico 2-4. RAP con respecto al total de mezcla en caliente y mezcla tibia. Fuente: Elaboración propia con datos de Asphalt in Figures 2001-2015 (European Asphalt Association, 2002-2016)

En el Gráfico 2-4 se observa que el porcentaje total de RAP ha aumentado constantemente durante los años. Esto se considera un signo muy positivo, porque el uso del pavimento de asfalto reclamado es beneficioso para planeta, este no solo representa un beneficio económico sino también ambiental.

2.3.4 Cantidad de RAP utilizado

Durante más de 30 años, la técnica de reciclaje de pavimentos ha sido estudiada y ampliamente utilizada en muchos países superándose las principales dificultades técnicas que se presentan. Sin embargo, a juzgar por los datos proporcionados por la información de EAPA, también está claro que el desarrollo de estas técnicas ha tenido lugar de forma muy desigual en los diferentes países de Europa.

Más allá de los problemas técnicos, las causas que podría explicar la desigualdad en cuanto al desarrollo de pavimentos con RAP son principalmente la sensibilidad ambiental, escasez de recursos o aumento sustancial en los precios de materias primas para la fabricación de mezclas bituminosas.

Existen diferentes formas de reutilizar el asfalto recuperado, se pueda utilizar para hacer mezclas HMA/WMA, reciclado en frío o incluso puede reutilizarse en capas sin consolidar. Cada uno de estos tipos de reciclaje tiene su propósito en la reutilización del material, ya que las propiedades derivadas de estos procesos serán diversas.

Tabla 2-5 Uso de RAP disponible.

País	RAP Disponible	RAPD/P.Total.	Porcentaje de RAP disponible usado en					
			HMA	WMA	HWMA	Mezclas frías	Base	vertedero/otro
Dinamarca	1.3	35.1	52	0	0	0	10	35
Finlandia	1.16	21.5	100	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
Francia	7	22.2	68	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
Alemania	11	28.2	90	0	0	0	10	0
Gran Bretaña	3.5	16.0	85		0	15	0	0
Italia	9	39.0	20	0	0	30	20	30
Holanda	4.5	56.3	70	0	0	10	0	20
Noruega	0.93	13.5	38	sin datos	sin datos	sin datos	61	sin datos
España	0.41	2.5	94	2	2	0	1	0
Suecia	1.6	19.5	76	8	6	5	5	0

Fuente: Elaboración propia con datos de Asphalt in Figures 2001-2015 (European Asphalt Association, 2002-2016)

En la Tabla 2-5 se pueden observar los datos proporcionados por EAPA en "Asphalt in Figures 2015" sobre el reciclaje. En esta tabla se aprecia la información sobre cada país relacionada con el reciclaje del RAP entregando una idea de cómo cada país reutiliza el asfalto recuperado disponible.

Como se mencionó anteriormente es posible distinguir la diferencia de avance en cuanto a las técnicas para reciclar entre los países que componen el estudio. Al respecto es conveniente tener en consideración el ratio entre el RAP disponible y la producción total, así como su uso, ya que, en los países más avanzados en esta práctica, a corto plazo les permitirá casi prescindir del uso de vertederos.

2.4 DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS DE ASFALTO EN CALIENTE MEDIANTE MÉTODO SUPERPAVE.

En 1987 la FHWA comenzó un estudio de cinco años para mejorar el desempeño de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, el resultado de este estudio fue SUPERPAVE. Este sistema se desarrolló para darle a los ingenieros y contratistas las herramientas necesarias para mejorar el desempeño de pavimentos en caliente. El sistema SUPERPAVE consiste en dos elementos interrelacionados: una especificación para ligantes, y el sistema de diseño de mezclas asfálticas que especifica criterios para agregados y propiedades volumétricas.

A continuación, se resume el procedimiento especificado en MS-2 Asphalt Mix Design Methods (Asphalt Institute, 2014).

A modo de resumen se pueden enumerar las siguientes etapas:

- 1- Selección de asfalto y agregados que cumplan con los criterios de diseño.
- 2- Desarrollo de una combinación de agregados que cumpla los requisitos SUPERPAVE.
- 3- Mezclado y envejecimiento del asfalto y los áridos.
- 4- Compactación se mezcla utilizando el compactador giratorio de acuerdo con los niveles de tráfico esperados.
- 5- Análisis de las propiedades volumétricas de la mezcla
- 6- Selección de la mejor combinación de áridos y cantidad de asfalto óptima.
- 7- Ensayo TSR.

2.4.1 Criterios para selección de materiales.

2.4.1.1 *Asfalto*

El asfalto que se utilizará en la mezcla se elige en base a las condiciones climáticas y el nivel de tráfico esperado del sector donde será realizado el proyecto como se describe en el manual MS-26.

2.4.1.2 *Agregados*

Durante el desarrollo del método SUPERPAVE, los expertos acordaron que algunas características de los agregados eran esenciales para un diseño adecuado. Estas características se separaron en dos categorías: propiedades de consenso y propiedades de origen.

2.4.1.2.1 Propiedades de consenso

Las propiedades de consenso especificadas en el sistema SUPERPAVE son las siguientes:

- 1- Angularidad del agregado grueso.
- 2- Angularidad del agregado fino.
- 3- Partículas planas y alargadas.
- 4- Equivalente de arena.

Estos criterios se basan en niveles de tráfico y su posición en el pavimento, los materiales cerca de la superficie (≤ 100 [mm]) están sujetos a niveles de esfuerzo más altos por lo que requieren materiales de alta calidad.

2.4.1.2.2 Propiedades de origen

El sistema SUPERPAVE también caracteriza lo que se conoce como propiedades de origen. Estas propiedades son requisitos específicos para áreas locales dada la variedad de agregados existente en distintas áreas geográficas. Se busca limitar propiedades como:

- Desgaste de Los Ángeles.
- Desintegración por sulfatos.
- Materiales deletéreos.

2.4.1.2.3 Granulometría

El sistema SUPERPAVE establece ciertos puntos de control para la granulometría como se puede observar en la Tabla 2-6, es importante destacar que la banda es limitada comparada con especificaciones tradicionales, solo será útil si es que los agregados cumplen con las propiedades de consenso y origen.

Tabla 2-6. Puntos de control SUPERPAVE.

Puntos de control SUPERPAVE												
NMAS (mm)	37.5		25		19		12.5		9.5		4.75	
Malla (mm)	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
50	100											
37.5	90	100	100									
25		90	90	100	100							
19				90	90	100	100					
12.5						90	90	100	100		100	
9.5								90	90	100	95	100
4.75										90	90	100
2.36	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67		
1.18											30	55
0.6												
0.3												
0.15												
0.075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10	6	13

Fuente: MS-2 Asphalt Mix Design Methods (Asphalt Institute, 2014)

2.4.1.3 Requisitos SUPERPAVE para mezcla.

Previo al desarrollo del procedimiento para el diseño de mezclas mediante SUPERPAVE, los datos de compactación solo se tenían para las muestras compactadas con la densidad de diseño. Con la instrumentalización moderna y la habilidad de medir altura después de cada giro, es posible que el diseñador estime un G_{mb} a cada altura o número de giros para cualquier espécimen. AASHTO R35-17 designa tres niveles de compactación N_{ini} , N_{des} , N_{max} . Estos términos se refieren al número de giros estimado para lograr diferentes niveles de compactación, donde:

- Número de giros inicial (N_{ini}): es una medida de la compactibilidad de las mezclas y se basa en la densidad de campo estimada luego de que la pavimentadora ha asfaltado. Se especifica un rango de 89 a 91.5 por ciento del G_{mm} , dependiendo en el nivel de tráfico de diseño.
- Número de giros de diseño (N_{des}): es el número de giros para alcanzar la densidad objetivo de la mezcla, está basada en la densidad de campo estimada en la mitad de la vida útil del pavimento. AASHTO M323-12 especifica que la densidad objetivo debe ser el 96% del G_{mm} .
- Número de giros máximo (N_{max}): es un estimado de la densidad de campo final al término de la vida útil del pavimento, su límite es 98% para todos los niveles de tráfico.

2.4.2 Preparación de la muestra y compactación.

Para llevar a cabo el método SUPERPAVE se necesitan:

- Un mínimo de ocho especímenes para ser compactados a N_{des} si se compactan dos especímenes adicionales para verificar N_{max} de lo contrario compactar a N_{max} los ocho especímenes anteriormente mencionados.
- Dos especímenes para el ensayo de gravedad teórica máxima.
- Un mínimo de seis especímenes adicionales para ensayos de sensibilidad a la humedad.
- Adicionalmente es posible realizar un proceso previo, denominado como "mezclas de prueba" que consiste en compactar la cantidad de probetas, con el mismo porcentaje de asfalto, que se estime necesaria por el proyectista, Este proceso se utiliza para determinar cuál combinación de áridos es la más adecuada con el fin de lograr los objetivos determinados.

Se utilizan tres tipos de agregados para confeccionar las probetas mediante el método de diseño SUPERPAVE. Las dimensiones requeridas para las probetas compactadas son de 150 [mm] de diámetro por 115 [mm] de ancho, y requiere dos muestras de aproximadamente 4700 [g] para cada contenido de asfalto o combinación de agregados, según sea el caso.

Un mínimo de dos muestras para la determinación de la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) deben ser preparados, de acuerdo con la especificación AASHTO T 209-12 / ASTM D 2041/D2041M-11, estos serán preparados al contenido de asfalto de diseño se haya determinado. Para las probetas de diseño se utilizará el contenido de asfalto inicial y 3 otros contenidos, se recomienda que los demás sean: -0.5%, +0.5% y +1% con respecto contenido de ligante de diseño.

2.4.3 Preparación de las mezclas.

La temperatura de mezclado y compactación deberá ser determinada de acuerdo con lo recomendado en National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 648 o informada por el proveedor.

Se deben precalentar los agregados a aproximadamente 15[°C] sobre la temperatura de mezclado, el asfalto se debe precalentar a la temperatura de mezclado, se debe tener cuidado de no exponer el ligante a temperaturas altas más de lo necesario ni por un tiempo prolongado.

Luego de mezclar se deben envejecer las muestras mediante un proceso determinado por el uso que se les vaya a dar, existen tres casos: diseño, acondicionamiento a corto plazo y acondicionamiento largo plazo, esto se logra de acuerdo con lo indicado en la norma ASHTOO R30-15.

Una vez terminado el proceso de acondicionamiento se procede a compactar las muestras a N_{des} o N_{max} de acuerdo con el método que se quiera utilizar.

2.4.4 Análisis de datos.

2.4.4.1 Determinación de contenido de asfalto inicial.

Para determinar el contenido de asfalto inicial es posible utilizar datos históricos o utilizar un método aproximado, como el que se expondrá a continuación.

A partir de los valores de gravedad específica aparente y gravedad específica bruta seca se puede determinar una aproximación a la gravedad específica efectiva como se señala en la (Ecuación 2-1):

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8 * (G_{sa} - G_{sb}) \quad (\text{Ecuación 2-1})$$

Donde:

G_{se} : Gravedad específica efectiva.

G_{sb} : Gravedad específica bruta de los agregados.

G_{sa} : Gravedad específica aparente.

Luego se deben calcular los valores correspondientes a V_{ba} y V_{be} mediante la (Ecuación 2-2 y (Ecuación 2-3):

$$V_{ba} = \frac{P_s * (1 - V_a)}{(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}})} * (\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}) \quad (\text{Ecuación 2-2})$$

Donde:

G_{se} : Gravedad específica efectiva.

G_b : Gravedad específica del ligante asfáltico.

G_{sa} : Gravedad específica aparente.

P_b : Porcentaje de asfalto con respecto al total de la mezcla.

P_s : Porcentaje de agregado con respecto al total de la mezcla.

V_a : Vacíos de aire.

V_{ba} : Volumen absorbido de ligante asfáltico.

$$V_{be} = 0.081 - 0.02931 * [\ln(S_n)]$$

(Ecuación 2-3)

Donde:

V_{be} : Volumen de ligante asfáltico efectivo.

S_n : Tamaño máximo del agregado en pulgadas.

Finalmente, mediante (Ecuación 2-4) se determina el contenido de ligante inicial.

$$P_{bi} = \frac{G_b * (V_{be} + V_{ba})}{G_b * (V_{be} + V_{ba}) + \frac{P_s * (1 - V_a)}{(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}})}} \quad (Ecuación 2-4)$$

Donde:

G_{se} : Gravedad específica efectiva.

G_b : Gravedad específica del ligante asfáltico.

P_{bi} : Porcentaje de ligante inicial.

V_{be} : Volumen absorbido de ligante asfáltico efectivo.

P_s : Porcentaje de agregado con respecto al total de la mezcla.

P_b : Porcentaje de asfalto con respecto al total de la mezcla.

V_{ba} : Volumen absorbido de ligante asfáltico.

Como se mencionó anteriormente existen distintas formas de calcular el contenido inicial, quien ejecute el diseño es libre de elegir como se aproximará a este punto.

2.4.4.2 Densidad seca estimada para probetas a distintos niveles de compactación.

En el proceso de compactación es necesario medir la altura de probeta a N_{ini} , N_{des} y N_{max} adicionalmente se estima una densidad real en base al volumen y la masa de la probeta compactada, esta densidad corresponde a $G_{mb,est.@Nmax}$.

A través de este valor y las alturas medidas es posible estimar la densidad real a distintos giros, la (Ecuación 2-5 ejemplifica esto.

$$G_{mb,est.@Nini/des} = G_{mb,est.@Nmax} * \frac{h_{@Nini/des}}{h_{@Nmax}} \quad (Ecuación 2-5)$$

Donde:

$G_{mb,est.@Nini/des}$: Gravedad específica bruta de la mezcla a giros iniciales o de diseño según corresponda.

$G_{mb,est.@Nmax}$: Gravedad específica bruta estimada de la mezcla a giros máximos.

$h_{@Nini/des}$: Altura de la probeta a giros iniciales o de diseño según corresponda.

$h_{@Nmax}$: Altura de la probeta a giros máximos.

Estos valores serán utilizados posteriormente para determinar los vacíos a distintos giros.

2.4.4.3 Densidad real corregida.

Las probetas compactadas son ensayadas para determinar la densidad real $G_{mb@Nmax}$, luego con este valor y el $G_{mb,est.@Nmax}$ se calcula un factor de corrección como se observa en la (Ecuación 2-6).

$$C = \frac{G_{mb@Nmax}}{G_{mb,est.@Nmax}} \quad (Ecuación 2-6)$$

Donde:

C: Factor de corrección

$G_{mb@Nmax}$: Gravedad específica bruta medida a giros máximos.

$G_{mb,est.@Nmax}$: Gravedad específica bruta estimada a giros máximos.

Luego se corrigen los valores de diseño e inicial.

$$G_{mb,cor.@Nini/des} = C * G_{mb,est.@Nini/des} \quad (Ecuación 2-7)$$

Donde:

$G_{mb,cor.@Nini/des}$: Gravedad específica bruta corregida a giros iniciales o de diseño según corresponda.

$G_{mb,est.@Nini/des}$: Gravedad específica bruta estimada a giros iniciales o de diseño según corresponda.

C: Factor de corrección

2.4.4.4 Porcentaje de densidad con respecto a la máxima para los distintos niveles de compactación.

Adicionalmente a la confección de probetas es necesario hacer mezcla para determinar la G_{mm} , y se calcula el porcentaje de densidad real con respecto a la máxima para cada nivel de giros como señala la (Ecuación 2-8).

$$\%G_{mm@Nini/des} = \frac{G_{mb,cor. @Nini/des}}{G_{mm}} \quad (Ecuación 2-8)$$

Donde:

$G_{mb,cor. @Nini/des}$: Gravedad específica bruta corregida a giros iniciales o de diseño según corresponda.

G_{mm} : Gravedad específica máxima.

$\%G_{mm@Nini/des}$: Gravedad específica máxima a giros iniciales o de diseño según corresponda.

Y en el caso del nivel máximo se utilizan los valores entregados por los ensayos como se aprecia en (Ecuación 2-9).

$$\%G_{mm@Nmax} = \frac{G_{mb@Nmax}}{G_{mm}} \quad (Ecuación 2-9)$$

2.4.4.5 Vacíos de aire.

Con el $\%G_{mm@Ndes}$ es posible calcular los vacíos de diseño de la siguiente forma:

$$V_a = 100 - \%G_{mm@Ndes} \quad (Ecuación 2-10)$$

Donde:

V_a : Vacíos de aire.

$\%G_{mm@Ndes}$: Gravedad específica bruta máxima a giros de diseño.

2.4.4.6 Vacíos en el agregado mineral.

$$VAM = 100 - \frac{\%G_{mm@Ndes} * G_{mm} * P_s}{G_{sb}} \quad (Ecuación 2-11)$$

Donde:

VAM: Vacíos en el agregado mineral.

$\%G_{mm@Ndes}$: Gravedad específica máxima a giros de diseño.

G_{mm} : Gravedad específica máxima.

P_s : Porcentaje de agregado con respecto al total de la mezcla.

G_{sb} : Gravedad específica bruta de los agregados.

2.4.4.7 Vacíos llenos con asfalto.

$$VFA = 100\% * \frac{VAM - V_a}{VAM} \quad (Ecuación 2-12)$$

Donde:

VAM: Vacíos en el agregado mineral.

VFA: Vacíos llenos con asfalto.

V_a : Vacíos de aire.

2.4.4.8 Contenido de ligante asfáltico efectivo.

$$P_{be} = -P_s * G_b * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} + P_b \quad (Ecuación 2-13)$$

Donde:

G_{se} : Gravedad específica efectiva.

G_b : Gravedad específica del ligante asfáltico.

P_{be} : Contenido de ligante efectivo.

P_s : Porcentaje de agregado con respecto al total de la mezcla.

P_b : Porcentaje de asfalto con respecto al total de la mezcla.

G_{sb} : Gravedad específica bruta de los agregados.

2.4.4.9 Proporción de polvo.

$$DP = \frac{P_{be}}{P_{0,075}} \quad (Ecuación 2-14)$$

Donde:

DP: Proporción de polvo

$P_{0,075}$: Porcentaje de árido bajo la malla #200.

P_{be} : Contenido de ligante efectivo.

2.4.4.10 Propiedades estimadas.

2.4.4.10.1 Asfalto estimado.

$$P_{b,est} = P_{bi} - [0,4 * (4 - V_a)] \quad (\text{Ecuación 2-15})$$

Donde:

$P_{b,est}$: Contenido de ligante estimado.

P_{bi} : Contenido de ligante inicial.

V_a : Vacíos de aire.

2.4.4.10.2 Vacíos en el agregado mineral.

$$VAM_{est} = VAM + C_v * (4 - V_a) \quad (\text{Ecuación 2-16})$$

Donde:

V_a : Vacíos de aire.

VAM: Vacíos en el agregado mineral iniciales.

VAM_{est} : Vacíos en el agregado mineral.

C_v : Constante que depende de los vacíos de aire.

2.4.4.10.3 Vacíos llenos con asfalto.

$$VFA_{est} = 100\% * \frac{VAM_{est} - V_a}{VAM_{est}} \quad (\text{Ecuación 2-17})$$

Donde:

VAM_{est} : Vacíos en el agregado mineral estimados.

VFA_{est} : Vacíos llenos con asfalto estimados.

V_a : Vacíos de aire.

2.4.4.10.4 Contenido de ligante asfáltico efectivo.

$$P_{be,estimado} = -P_s * G_b * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} + P_{b,estimado} \quad (\text{Ecuación 2-18})$$

Donde:

G_{se} : Gravedad específica efectiva.

G_b : Gravedad específica del ligante asfáltico.

$P_{be, estimado}$: Contenido de ligante efectivo estimado.

P_s : Porcentaje de agregado con respecto al total de la mezcla.

P_b : Porcentaje de asfalto con respecto al total de la mezcla.

G_{sb} : Gravedad específica bruta de los agregados.

2.4.4.10.5 Proporción de polvo.

$$DP_{estimado} = \frac{P_{be, estimado}}{P_{0,075}} \quad (Ecuación 2-19)$$

Donde:

DP: Proporción de polvo

$P_{0,075}$: Porcentaje de árido bajo la malla #200.

P_{be} : Contenido de ligante efectivo.

2.4.4.10.6 G_{mm} estimado a giros iniciales.

$$\%G_{mm \text{ est@ } N_{ini}} = \%G_{mm@N_{ini}} - (4 - V_a) \quad (Ecuación 2-20)$$

Donde:

$\%G_{mm \text{ est@ } N_{ini}}$: Porcentaje de gravedad máxima estimada a giros iniciales.

$\%G_{mm@N_{ini}}$: Porcentaje de gravedad máxima a giros iniciales.

V_a : Vacíos de aire.

2.4.4.10.7 G_{mm} estimado a giros máximos.

$$\%G_{mm \text{ est@ } N_{max}} = \%G_{mm@N_{max}} - (4 - V_a) \quad (Ecuación 2-21)$$

Donde:

$\%G_{mm \text{ est@ } N_{max}}$: Porcentaje de gravedad máxima estimada a giros máximos.

$\%G_{mm@N_{max}}$: Porcentaje de gravedad máxima a giros máximos.

V_a : Vacíos de aire.

Una vez obtenidos todos los parámetros es posible determinar cuál de las tres mezclas de prueba será la elegida para seguir el diseño, esto se logra utilizando la Tabla 2-7, que para este caso corresponde a un tráfico estimado entre 0.3 y 3 millones de ejes equivalentes (ESAls), también están especificados los parámetros para otros niveles de tráfico.

Tabla 2-7. Límites SUPERPAVE

Requisitos SUPERPAVE	
% Gmm @ Nini (máximo)	90.5
% Gmm @ Ndes (máximo)	96
% Gmm @ Nmax (máximo)	98
VMA (mínimo)	14
VFA	65-78
DP	0.6-1.2

Fuente: MS-2 Asphalt Mix Design Methods (Asphalt Institute, 2014).

Al verificar que los requisitos se cumplen se tiende a elegir la opción más adecuada para el objetivo a lograr.

Finalmente se repite el proceso antes mencionado utilizando la granulometría elegida y como base el porcentaje de ligante estimado con el que se obtendrá el 4% de vacíos, además se utilizan distintos porcentajes de asfalto se recomienda que estos sean: -0.5%, +0.5% y +1% con respecto contenido de ligante de diseño.

2.5 DISEÑO PARA MEZCLAS DE ASFALTO EN CALIENTE CON RAP.

A continuación, se presenta el proceso para desarrollar mezclas de asfalto con contenido de RAP mediante el método SUPERPAVE.

2.5.1 Determinación del contenido de asfalto del RAP.

Para poder determinar la cantidad de ligante que contiene el RAP se señalan dos métodos, el primero mediante la AASHTO T 308-13 denominado "Determining the Asphalt Binder Content of Hot-Mix Asphalt by the Ignition Method" y el procedimiento mediante solvente de acuerdo con AASHTO T 164-13 "Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot-Mix Asphalt". Al terminar el proceso el agregado recuperado deberá ser guardado para determinar la graduación mediante AASHTO T 30-15 "Mechanical Analysis of Extracted Aggregates".

Se debe utilizar el procedimiento mediante AASHTO T 164-13 si se deben determinar las propiedades del ligante, por otra parte, la utilización de un horno de ignición puede dañar los agregados, obteniéndose una granulometría más fina con respecto a la real.

2.5.2 Gravedad específica del RAP

Es importante determinar de manera precisa la gravedad específica del RAP, G_{sb} , dado que los VAM son muy sensibles a este parámetro a modo de ejemplo en una mezcla que contiene un 25% de RAP, un error de 0.04 en G_{sb} se traduce en un 0.5 % de diferencia en el VAM, esto puede determinar que una mezcla sea o no aceptable.

Existen dos formas principales para determinar la gravedad específica del RAP.

2.5.2.1 Método 1

Separa el agregado en dos fracciones, una gruesa y otra fina, y calcula la gravedad específica para cada una de las fracciones mediante pruebas clásicas, luego se combinan para obtener la gravedad total.

2.5.2.2 Método 2

Se utiliza el RAP para determinar la gravedad máxima teórica, luego se calcula la gravedad específica efectiva G_{se} este valor se ocupa como sustituto del G_{sb} .

2.5.2.3 Determinar G_{mm} del RAP

Antes de ejecutar el ensayo para determinar G_{mm} , se debe secar el RAP a masa constante en un horno a 110 grados, es importante mezclar fuertemente el RAP para permitir al ligante virgen cubrir las partículas sin asfalto. Para prevenir que el agua ingrese a la muestra se debe precalentar la mezcla como se haría

en un procedimiento normal, luego mezclar el ligante virgen con la muestra de RAP. La gravedad máxima teórica se calcula según AASHTO T 209-12.

2.5.2.4 Calcular G_{se} y G_{sb} del RAP

$$G_{se(RAP)} = \frac{100 - P_{b(RAP)}}{\frac{100}{G_{mm(RAP)}} - \frac{P_{b(RAP)}}{G_{b(RAP)}}} \quad (\text{Ecuación 2-22})$$

Donde:

$G_{se(RAP)}$: Gravedad específica efectiva del RAP.

$G_{mm(RAP)}$: Gravedad específica máxima del RAP.

$P_{b(RAP)}$: Porcentaje de asfalto con respecto al total de la mezcla.

Como se observó anteriormente el $G_{mm(RAP)}$ y el $P_{b(RAP)}$ se determinan mediante ensayos. El $G_{b(RAP)}$ puede ser determinado o asumir que tiene un valor de 1.04, esto debido a que mientras el asfalto envejece las fracciones livianas se disipan, aumentando la cantidad de asfaltenos en el ligante. Se debe notar que asumir este valor en vez de calcularlo presenta un error mínimo, por ejemplo, para una mezcla de 5.5 % de asfalto con un G_{mm} de 2.500 se tiene que un error de 0.02 en el $G_{b(RAP)}$ afectara aproximadamente en un 0.1 % al VMA asumiendo un porcentaje de RAP del 25%.

2.5.3 Propiedades de consenso de los agregados.

El agregado del RAP al igual que el virgen debe cumplir con los requisitos de AASHTO M323-12 (AASHTO, 2012), sin embargo, es importante señalar que la mezcla es la que debe satisfacer estas propiedades. Para realizar las pruebas se debe separar el material de RAP en una fracción gruesa y otra fina, en las mallas #4 y #8, el equivalente de arena no se ejecuta para el caso del RAP.

2.5.4 Propiedades del ligante proveniente del RAP.

En mezclas con alto nivel de RAP es necesario conocer las propiedades del ligante proveniente de este material y así elegir de manera correcta el grado PG que debe tener el asfalto virgen. Si es necesario conocerlas se deberá efectuar una extracción con solventes, usualmente se utiliza el método AASHTO T 164-13 y luego ASTM D5404/D5404M-12 o ASTM D7906-14. Luego de recuperar el ligante se deben efectuar las pruebas necesarias para obtener un PG completo, es decir DSR y BBR.

2.5.5 Selección del ligante apropiado para la mezcla

Una vez conocidas las propiedades del ligante del RAP, se debe elegir un ligante virgen apropiado para producir la cantidad de mezcla necesaria al grado PG que se desea obtener. Existe una recomendación para que no se calculen las propiedades del ligante del RAP, estas son:

Tabla 2-8. Recomendación respecto a tipo de ligante por cantidad de RAP.

Grado PG de ligante recomendado	Porcentaje de RAP
Sin cambio con respecto al grado final	< 15
Un grado más bajo del que se quiere lograr	15 – 25
Recomendaciones de los gráficos de mezclado	>25

Fuente: MS-2 Asphalt Mix Design Methods (Asphalt Institute, 2014).

Es importante recalcar que en la tabla Tabla 2-8 “Porcentaje de RAP” hace referencia a la cantidad de ligante asfáltico que será reemplazado mediante RAP en la mezcla final, no al porcentaje total de RAP a incorporar (ligante y agregados). Es decir, si el contenido de betún asfáltico objetivo de la mezcla y el porcentaje de ligante asfáltico del RAP son iguales, el valor “Porcentaje de RAP” será igual que la cantidad total de RAP a utilizar porcentualmente.

2.5.6 Gráficos de mezclado y utilización de sistema PG

La mayoría de los expertos en asfalto concuerda en que al mezclar RAP con ligante virgen existe un cierto grado de combinación de ambos ligantes, es decir el RAP no se comporta simplemente como un agregado, sin embargo, esto no quiere decir que todo el ligante proveniente del RAP se separe de la roca y mezcle completamente con el nuevo asfalto virgen.

Existen distintos métodos para determinar las características que debe tener la mezcla para lograr el desempeño requerido las cuales se revisaran a continuación.

2.5.6.1 Determinación del ligante virgen cuando se conoce el grado objetivo y la cantidad de RAP.

Si el desempeño PG objetivo es conocido además de las propiedades y la cantidad de RAP a utilizar, es posible determinar las propiedades del grado PG que deberá presentar el ligante virgen para alcanzar lo proyectado.

Para esto se utiliza la Ecuación 2-23:

$$T_{\text{virgen}} = \frac{T_{\text{mezcla}} - (\text{RPBR} * T_{\text{RAP}})}{(1 - \text{RPBR})} \quad (\text{Ecuación 2-24})$$

Donde:

T_{virgen} : Temperatura crítica del ligante virgen.

T_{mezcla} : Temperatura Objetivo.

T_{RAP} : Temperatura crítica del ligante RAP

RPBR.: Porcentaje de asfalto aportado por el RAP sobre el total de la mezcla.

De esta forma se obtiene el Grado PG mínimo para lograr el desempeño deseado, es importante notar que el procedimiento se debe efectuar tanto para la temperatura alta como la baja.

2.5.6.2 *Determinación de cantidad de RAP cuando el grado del ligante y las propiedades del RAP son conocidas.*

Mediante la Ecuación 2-25 se puede calcular el porcentaje de RAP mínimo para obtener el desempeño deseado, al igual que en el caso anterior esto se debe hacer independientemente para la temperatura alta como para la baja.

$$\text{RPBR} = \frac{T_{\text{mezcla}} - T_{\text{virgen}}}{T_{\text{RAP}} - T_{\text{virgen}}} \quad (\text{Ecuación 2-26})$$

Donde:

T_{virgen} : Temperatura crítica del ligante virgen.

T_{mezcla} : Temperatura Objetivo.

T_{RAP} : Temperatura crítica del ligante RAP

RPBR.: Porcentaje de asfalto aportado por el RAP sobre el total de la mezcla.

Además, mediante la misma ecuación se puede calcular la cantidad máxima de RAP para asegurar que el asfalto no supere algún grado en particular, también se puede utilizar para calcular el grado en temperaturas bajas e intermedias.

2.5.7 Desarrollo de la mezcla.

Una vez que se conoce la cantidad y grado de ligante virgen a utilizar junto con el porcentaje de RAP, se procede a desarrollar la mezcla asfáltica de la manera usual mediante el método SUPERPAVE, con cambios menores.

2.5.7.1 Determinación de la granulometría.

El RAP se trata como cualquier otro agregado al determinar la combinación de estos, dado que contiene asfalto la cantidad considera será menor que el total de RAP utilizado, mediante la Ecuación 2-27 es posible obtener la cantidad equivalente.

$$\text{RAP}_{\text{agregado}} = \text{RAP}_{\text{mezcla}} * \left(1 - \frac{P_{b,\text{RAP}}}{100}\right) \quad (\text{Ecuación 2-28})$$

Donde:

$\text{RAP}_{\text{agregado}}$: Cantidad de RAP reemplazada como agregado.

$\text{RAP}_{\text{mezcla}}$: Cantidad total de RAP utilizado en la mezcla

$P_{b,\text{RAP}}$: Cantidad de asfalto reemplazada en la mezcla.

Este valor se utiliza para calcular la granulometría combinada de la mezcla.

2.5.7.2 Manejo del RAP y los agregados vírgenes en el proceso de mezcla.

Normalmente los agregados se eligen, pesan y combinan para luego ponerlos en el horno a la temperatura de mezclado por una noche, desafortunadamente dado que el RAP contiene ligante, este no puede ser calentado de la misma forma sin afectar sus propiedades. Se recomienda apilarse por separado, en menos de dos kilogramos, y precalentado por no más de dos horas a 110 [°C]. Esto es suficiente para remover la humedad del material.

Para compensar que el RAP entre a menor temperatura se deben calentar los demás agregados 0.5 [°C] por cada porcentaje de RAP utilizado en la mezcla.

El procedimiento de mezclado es exactamente igual al normal, se procede a hacer un cráter en los agregados calientes y derramar el ligante virgen, luego mezclar hasta que no queden piedras libres de ligante.

2.5.7.3 Cantidad de ligante virgen necesaria.

Dado que el RAP contiene asfalto se debe calcular la cantidad de ligante virgen que se debe agregar para obtener el porcentaje total necesario en la mezcla, esto se logra mediante la Ecuación 2-29.

$$PLV = \text{Peso de agregados} * \left(\frac{P_b}{P_s} \right) - \text{Peso total de RAP} - \text{Peso de RAP}_{\text{agregado}} \quad (\text{Ecuación 2-30})$$

Donde:

Pb: Contenido de asfalto total de la mezcla expresado en porcentaje.

Ps: Contenido de agregados total de la mezcla expresado en porcentaje.

PLV: Peso ligante virgen.

2.6 ENSAYOS DE DESEMPEÑO A DESARROLLAR.

2.6.1 Rueda de Hamburgo

En el ensayo de rueda de Hamburgo se creó alrededor de 1970, su función principal es medir la sensibilidad a la humedad, sin embargo, la prueba también es capaz de reflejar el comportamiento frente al ahuellamiento a altas temperaturas debido a los ciclos de carga generados por el tráfico vehicular.

Es importante distinguir los efectos de la sensibilidad a la humedad y el ahuellamiento al interpretar los resultados entregados por el ensayo, para ello se recurre a la Figura 2-3 donde se observa que desde el "Stripping Point" hacia adelante se aprecian los efectos del agua dentro del material, por lo que el ahuellamiento aumenta al verse afectado por este factor. Cuando el efecto de la sensibilidad a la humedad es muy pequeño, se aprecian curvas que se comportan como la situación presentada a la izquierda del "Stripping Point" hasta los 10000 ciclos, Gráfico 2-3.

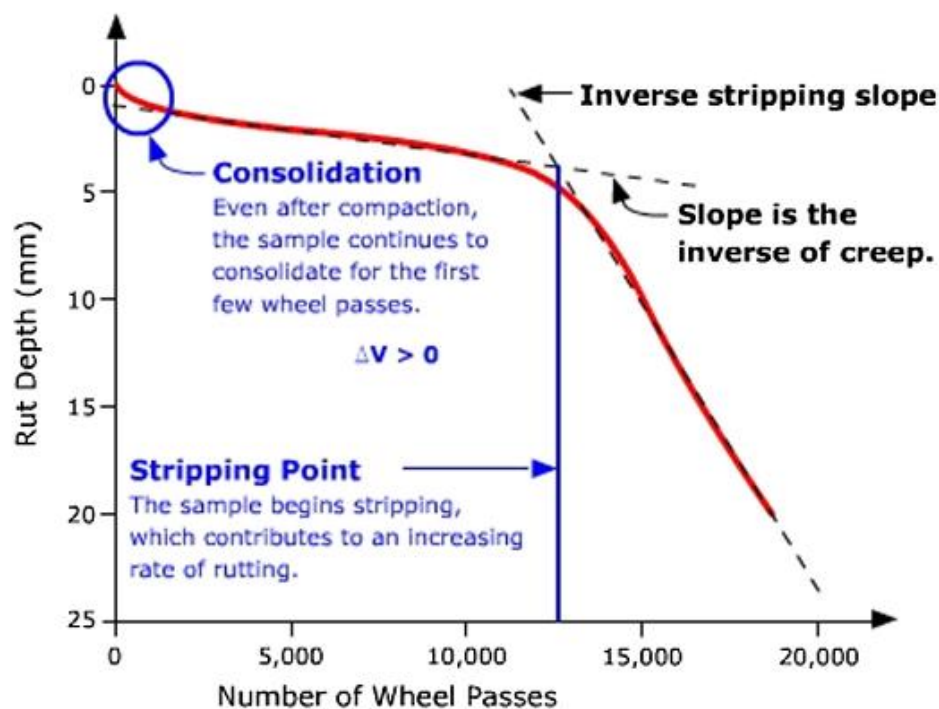


Figura 2-3. Resultados comunes para el ensayo de Rueda de Hamburgo. Fuente: MS-2 Asphalt Mix Design Methods (Asphalt Institute, 2014).

2.6.1.1 Ensayo Rueda de Hamburgo

El ensayo se lleva a cabo en base a la norma AASHTO 324-17

Para este ensayo son necesarias 4 probetas de $7 \pm 1\%$ cortadas como se puede apreciar en la Figura 2-5.

El ensayo rueda de Hamburgo consiste en pasar una rueda de acero con una carga determinada por sobre la longitud de las probetas, las cuales se encuentran sumergidas en agua a $50[^\circ\text{C}]$. Este proceso se repite las veces que se estime conveniente, usualmente se utilizan 10.000 ciclos o 20 [mm] de ahuellamiento.

Previo a comenzar el ensayo se debe calibrar la presión bajo la rueda a 705 [N] en el centro del nivel de la parte superior de la posición del molde.

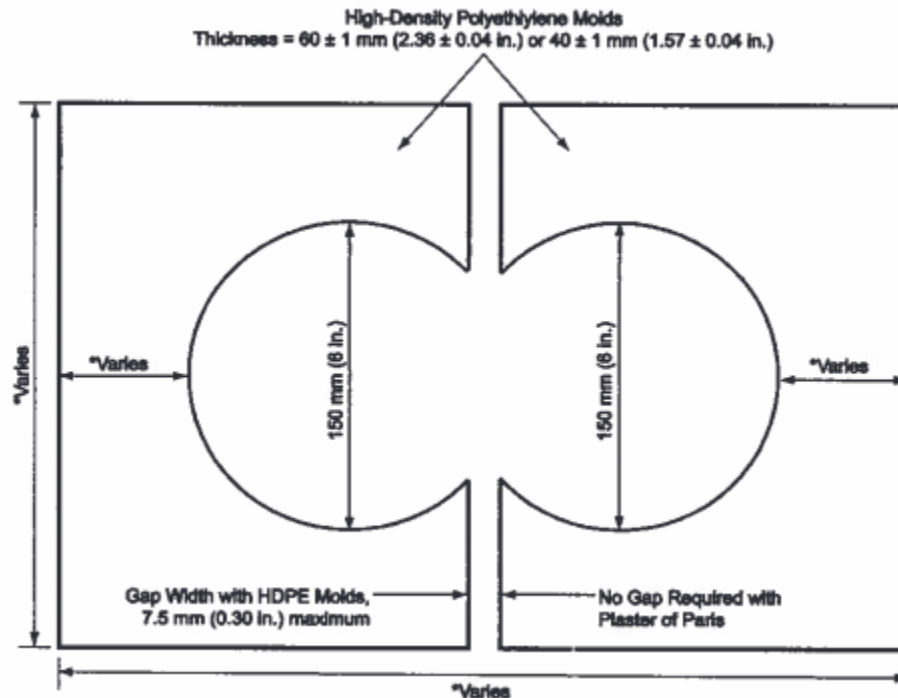


Figura 2-4. Diagrama molde rueda de Hamburgo. Fuente: Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures (AASHTO, 2017)

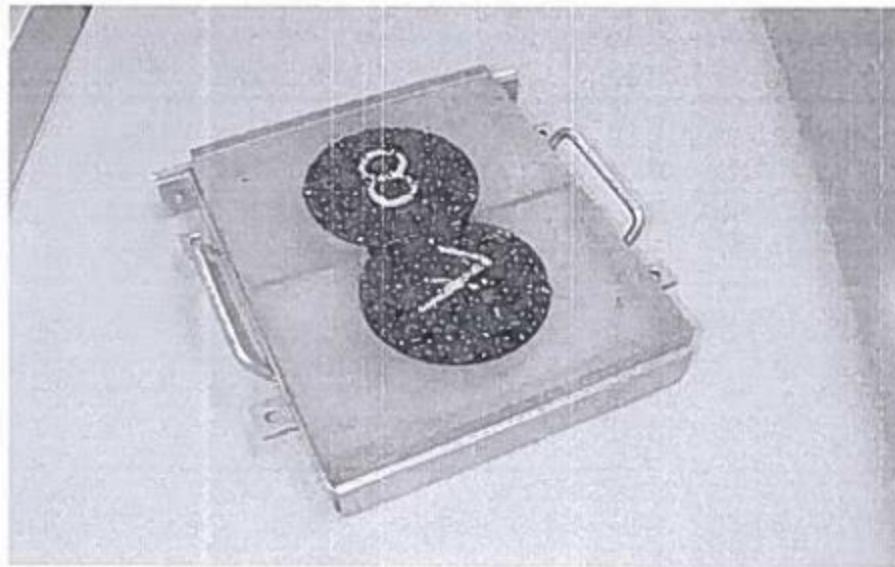


Figura 2-5. Probetas puestas en el molde previo al ensayo. Fuente: Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures (AASHTO, 2017)

Usualmente se considera adecuado un resultado menor a 12.5 [mm] (Asphalt Institute, 2014).

2.6.2 Tensile Strength Ratio (TSR)

El ensayo se lleva a cabo en base a la norma ASTM D4867 / D4867M - 09(2014).

Este consiste en someter 2 grupos de probetas con las mismas características a un ensayo de tracción indirecta. Dicho ensayo consiste en cargar una muestra cilíndrica con una carga de compresión diametral como se muestra en la Figura 2-6 a lo largo de dos generatrices opuestas. Este tipo de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

Para esto son necesarias 6 probetas con un porcentaje de vacíos de $7 \pm 1\%$. Estas se separan en dos grupos de tres probetas cada uno, la cantidad de vacíos no puede variar más de un $\pm 0.2\%$ con respecto al promedio. Se mide la resistencia a tracción de ambos grupos, uno será sometido a acondicionamiento, saturando la probeta en agua, el otro no, luego se cargan a una deformación constante de 5 [cm] por minuto.



Figura 2-6. Diagrama de carga ensayo tracción indirecta. Fuente: Elaboración propia.

Se determina la resistencia a la tracción indirecta (ITS), tanto para probetas secas como húmedas, aplicando la siguiente fórmula:

$$ITS = \frac{2P}{\pi * D * H} \quad (Ecuación 2-31)$$

Donde:

P: Carga máxima [kN].

D: Diámetro de la probeta [mm].

H: Altura de la probeta [mm].

ITS: Resistencia a la tracción indirecta.

Con los valores promedio de ITS de cada grupo de probetas, se calcula la razón de resistencia a la tracción indirecta (ITSR) mediante la siguiente ecuación:

$$TSR = \frac{ITS \text{ condicionado}}{ITS \text{ secas}} * 100\%$$

(Ecuación 2-32)

Donde:

ITS: Resistencia a la tracción indirecta.

TSR: Razón de tracción indirecta.

Usualmente se considera aceptable un resultado mayor a 0,8 (Asphalt Institute, 2014).

2.6.3 Fatiga

2.6.3.1 Ensayo flexión en cuatro puntos.

El ensayo se lleva a cabo en base a la norma AASHTO T 321-14.

El ensayo de fatiga por flexión en cuatro puntos se realiza colocando una viga de mezcla asfáltica ante una carga repetitiva aplicada en cuatro puntos, a un nivel de deformación constante. En el modo de carga a deformación controlada, la probeta es sometida a ciclos de carga con deformación constante y el esfuerzo disminuye por cada ciclo. Se considera que se ha producido la falla por fatiga cuando el módulo de rigidez inicial se ve reducido a la mitad.

Durante la prueba, la viga se mantiene en su lugar mediante cuatro pinzas y se aplica una carga de carga repetida (sinusoidal) a las dos pinzas internas, mientras que las pinzas externas proporcionan una carga de reacción (Figura 2-7). La velocidad de carga puede ser variable, pero normalmente se establece en 1 a 10 Hz. Esta configuración produce un momento de flexión constante en la parte central de la viga (entre las dos abrazaderas internas). La deflexión causada por la carga se mide en el centro de la viga. El número de ciclos de carga hasta el fallo puede dar una estimación de la vida útil de la mezcla asfáltica. Otro valor importante que puede obtenerse de la prueba de fatiga del haz es la energía disipada de la muestra. La energía disipada es una medida de la energía que se pierde en el material o se altera a través del trabajo mecánico, la generación de calor o el daño a la muestra.

Este ensayo también sirve para determinar la rigidez de la mezcla. Los vacíos que utilizar quedan a criterio del ingeniero, para este caso se utilizó $6,5 \pm 0,5\%$.

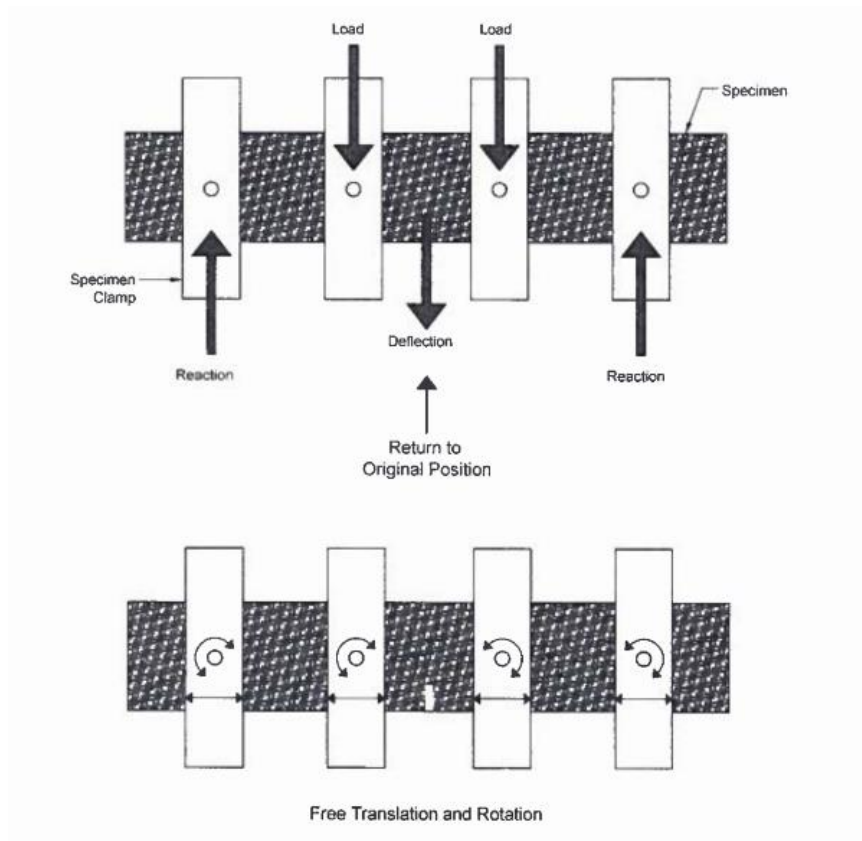


Figura 2-8. Diagrama ensayo de fatiga en cuatro puntos. Fuente: AASHTO T321-17 (AASHTO, 2017)

Los ensayos se llevan a cabo según la normativa ASSHTO T 321-17, la cual establece las siguientes relaciones para la obtención de datos por ciclos de carga:

$$\sigma_t = \frac{0.357 * P}{b * h^2} \quad (\text{Ecuación 2-33})$$

Donde:

σ_t : Esfuerzo máximo tracción, [Pa]

P: Carga aplicada por el actuador, [N].

b: Ancho promedio de la probeta, [m].

h: Altura promedio de la probeta, [m].

$$\epsilon_t = \frac{12 * \delta * h}{3L^2 - 4a^2} \quad (\text{Ecuación 2-34})$$

Donde:

ϵ_t : Deformación máxima de tracción, [m/m]:

δ : Deflexión máxima al centro de la viga, [m].

a: Espacio entre abrazaderas internas, [m].

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

$$S = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (\text{Ecuación 2-35})$$

Donde:

S=Rigidez flexural, [Pa].

$$\varphi = 360 * f * s \quad (\text{Ecuación 2-36})$$

Donde:

φ : ángulo de fase.

f: Frecuencia de carga, [Hz].

s: Tiempo transcurrido entre $P_{\max}$ y $\delta_{\max}$, [s].

Existen dos tipos de enfoque para interpretar los resultados los cuales se presentan a continuación:

2.6.3.2 Enfoque fenomenológico.

Para el desarrollo del análisis se utilizará el enfoque fenomenológico, el cual es uno de los modelos más utilizados para la predicción del agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas. Este modelo entrega una relación empírica basada en ensayos de laboratorio y calibraciones. El enfoque fenomenológico relaciona el esfuerzo o deformación producido en la carpeta asfáltica, con el número de ciclos que causa la falla del material. Además, cabe señalar que esta relación no es derivada del análisis mecánico de los pavimentos, este modelo es una combinación de lo observado y de los datos tabulados de laboratorio provenientes de ensayos de fatiga.

Los resultados del ensayo a fatiga dependen del modo de carga, es decir, varían según si se realizan a tensión o deformación constante. Dado que se trabajó con deformación controlada se presenta la ecuación del caso.

$$N_f = k_1 * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{k_2} \quad (\text{Ecuación 2-37})$$

Donde:

$k_{1,2}$: Constantes de ajuste exponencial, que dependen del material.

N_f : Ciclos de carga para falla con una deformación

ϵ_t : Deformación por tracción.

Este modelo, el cual puede ser de esfuerzo o deformación controlados no incorpora la temperatura, módulo de la mezcla asfáltica y la frecuencia de carga.

Los coeficientes k_1 y k_2 son determinados por medio del ajuste de una regresión potencial en escala logarítmica de los datos obtenidos en un ensayo de fatiga, en el caso de este estudio, debido a que solo se cuenta con un solo punto de deformación, no será posible establecer la relación requerida.

Esta ecuación puede ser calibrada para tomar en cuenta las demás propiedades de la mezcla, estos modelos son conocidos como funciones de transferencia.

2.6.3.3 Enfoque energía disipada.

Dado que los parámetros del enfoque fenomenológico son dependientes del tipo de material, modo de carga, frecuencia y temperatura, se ha desarrollado el enfoque de energía disipada, modelo alternativo, el cual se basa en la energía representada como el área bajo la curva de la relación esfuerzo – deformación cuando un material es sometido a alguna carga externa.

La energía disipada es una medida de la energía que es perdida por el material a través de trabajo mecánico, generación de calor o daño de la muestra. Cuando la aplicación de carga y descarga se repite en el rango elástico del material, es decir, comienza y termina en el mismo punto sin ocasionar deformación permanente, la energía se recupera. Por otro lado, cuando se producen deformaciones remanentes en el rango inelástico del material, parte de esta energía no se conserva y se disipa.

El daño por fatiga en un pavimento asfáltico es la cantidad de energía que es disipada por el espécimen durante prueba.

$$D = \pi * \sigma_t * \varepsilon_t * \sin(\varphi) \quad (\text{Ecuación 2-38})$$

Donde:

D: Energía disipada.

Energía disipada acumulada [J/m3]:

$$\sum_{i=1}^{i=n} D_i \quad (\text{Ecuación 2-39})$$

Donde:

D_i : Energía disipada en el ciclo de carga i.

2.6.4 Rigidez

El ensayo se lleva a cabo en base a la norma UNE-EN 12697-26 (AENOR, 2012). Mediante el ensayo de Tracción Indirecta se busca reproducir el estado de tensiones críticas en la zona de tracción, presentes en la fibra inferior de la capa asfáltica.

El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión diametral, de corta duración, a una probeta cilíndrica, en este caso, de diámetro 150[mm] con un espesor de 65[mm], fabricadas en laboratorio. Esta carga se aplica en dos generatrices opuestas: dos diámetros trazados a 90°. Esta carga de compresión provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, en la Figura 2-9 se puede observar la posición de la probeta al momento del ensayo.

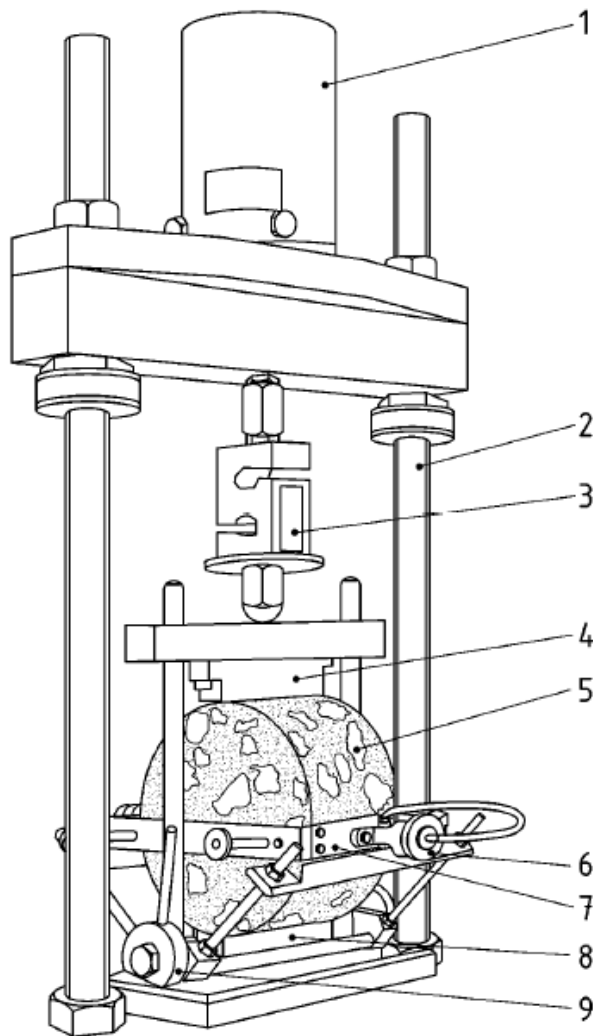


Figura 2-9. Diagrama de la carga aplicada a la probeta. Fuente: UNE-EN 112697-26 Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. (AENOR, 2012)

La temperatura utilizada en el ensayo se especifica en los resultados de la presente memoria.

En este caso se aplica un pulso de carga sobre el manto lateral de una probeta, y se mide la deformación axial que sufre en cada ciclo. Cuando se deja de aplicar el pulso de carga la tracción pasa a ser cero. El tiempo de duración del pulso de carga dependerá de la velocidad del vehículo, para este estudio se aplicará un pulso con un tiempo de duración de carga de 124 ± 4 [ms] equivalente a una velocidad de 100[Km/hr] con una frecuencia de 0.33[Hz].

Es importante señalar que este ensayo no es capaz de representar de la mejor forma el comportamiento reológico del asfalto, dado que este es un material viscoelástico, y el módulo de rigidez

solo representa la parte elástica del material, por lo que es preferible caracterizar el asfalto a través del módulo dinámico, parámetro que cuantifica tanto la componente viscosa como la elástica y junto a otros es utilizado para predecir la vida útil proyectada de un pavimento asfáltico. Por último, en esta memoria se desarrolló este ensayo dado que era parte de las especificaciones técnicas requeridas para el proyecto denominado “Conservación mayor pista 17R-35L y rodajes asociados aeropuerto Arturo Merino Benítez, 2017-2018”.

2.7 DESEMPEÑO DE MEZCLAS CON RAP.

Luego de una recopilación bibliográfica de distintas fuentes, se estudiará cómo se comporta el RAP frente a distintos tipos de deterioros como también como afecta este a las propiedades reológicas de la mezcla.

2.7.1 Efectos del RAP frente a distintos deterioros.

Como parte de la revisión bibliográfica se estudió el texto “The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays” (Wang, 2016) para predecir el desempeño de pavimentos que contienen RAP a largo plazo.

El estudio se enfoca en el desempeño de capas de rodadura frente a los deterioros mencionados anteriormente, para ello se decidió utilizar una mezcla HMA con 30% de RAP. Los datos fueron extraídos de los 18 sitios SPS-5 construidos como parte del programa LTPP en los EE. UU. y Canadá, en cada sitio se construyeron 8 secciones adyacentes de 152.4[m] x 3.66[m], de las cuales la mitad fue utilizada para evaluar mezclas con RAP y las demás con asfalto virgen.

Los sitios que se expondrán son los que corresponden a California (6-50X), Florida(12-50X), Nuevo México(35-50X) y Alberta (81-50X). De aquí en adelante las series XX-502 representaran las pistas con mezclas que contengan 30% de RAP, mientras las XX-505 representaran las mezclas con asfalto virgen.

2.7.1.1 Agrietamiento por Fatiga

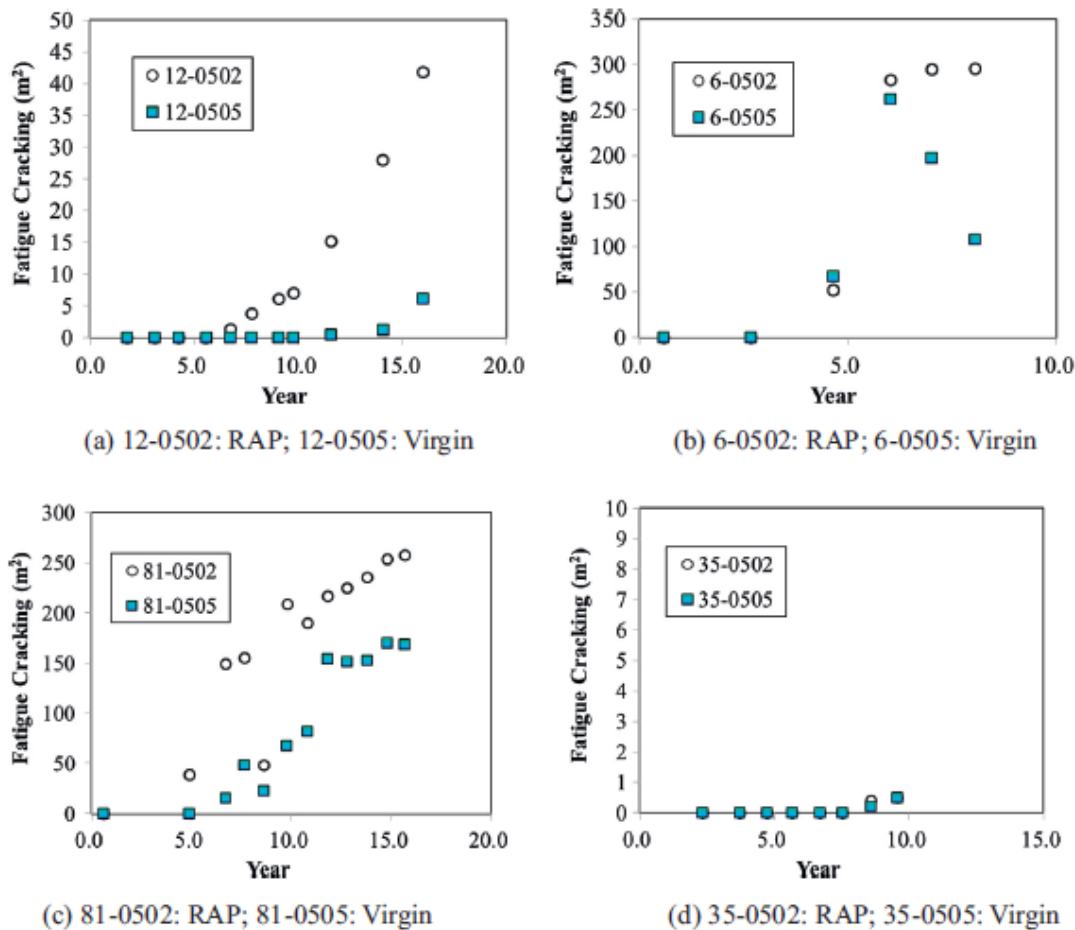
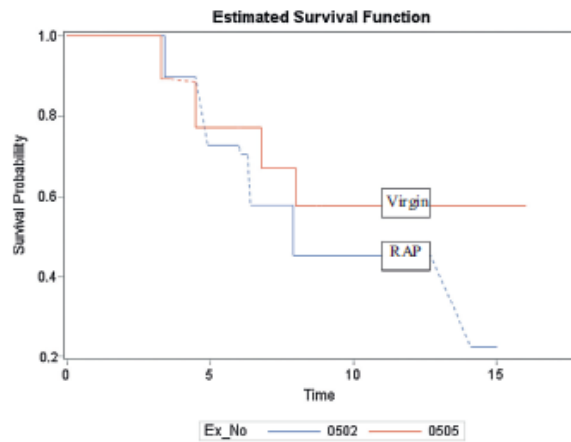


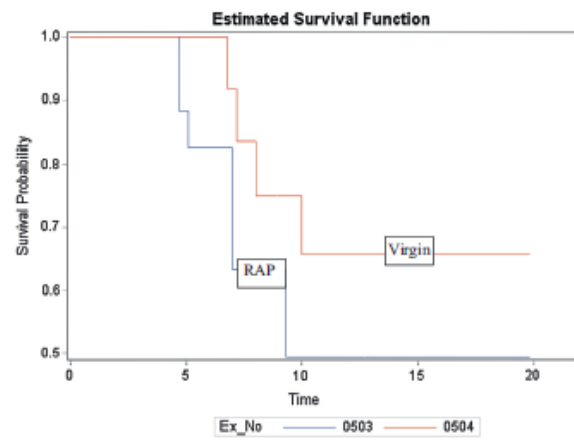
Figura 2-10. Agrietamiento por fatiga en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor. Fuente: *The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays* (Wang, 2016).

Se observa que en la Figura 2-10 los pavimentos muestran diferencias notables en algunos sitios, en Florida y Alberta, el agrietamiento por fatiga se desarrolló más rápidamente y con mayor severidad en las secciones de RAP, en comparación con las secciones que utilizan mezclas vírgenes.

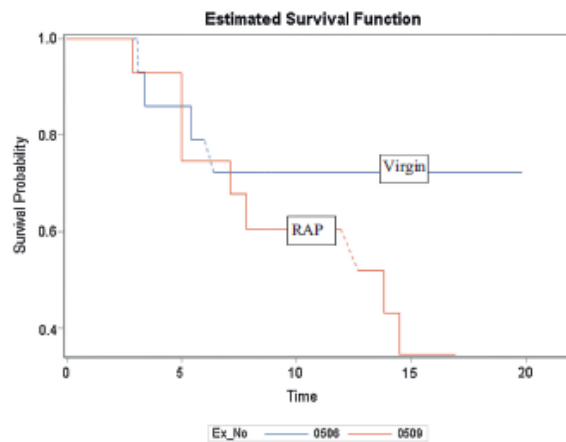
En California, el agrietamiento por fatiga de las dos secciones se desarrolló inicialmente a la misma velocidad, pero la sección que usaba RAP mostró más agrietamiento por fatiga a largo plazo. En Nuevo México, el agrietamiento por fatiga se desarrolló lentamente en ambas secciones.



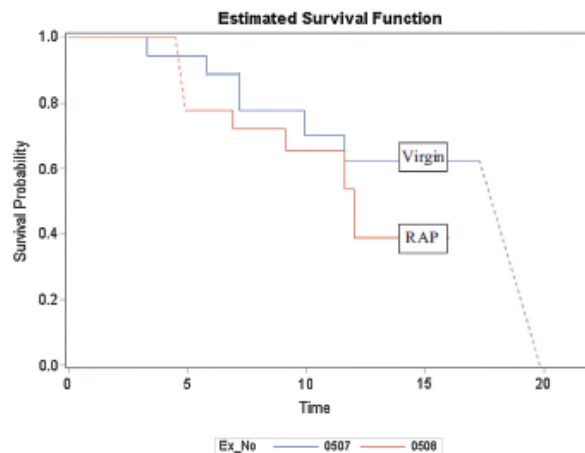
(a) 51 mm overlay with minimal pre-overlay treatment (0502: RAP; 0505: Virgin)



(c) 127 mm overlay with minimal pre-overlay treatment (0503: RAP; 0504: Virgin)



(b) 51 mm overlay with intensive pre-overlay treatment (0509: RAP; 0506: Virgin)



(d) 127 mm overlay with extensive pre-overlay treatment (0508: RAP; 0507: Virgin)

Figura 2-11 Funciones de supervivencia de fatiga basados en los 18 sitios 5-SPS. Fuente: *The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays* (Wang, 2016).

En la Figura 2-11 se observa que las secciones que utilizan material virgen, en general, logran un mejor desempeño frente a la fatiga.

En general las áreas de agrietamiento por fatiga de las secciones con mezcla virgen son significativamente menores que las secciones RAP, excepto por las capas gruesas con tratamiento intensivo, donde el nivel general de fisuración por fatiga es muy bajo.

2.7.1.2 Agrietamiento longitudinal

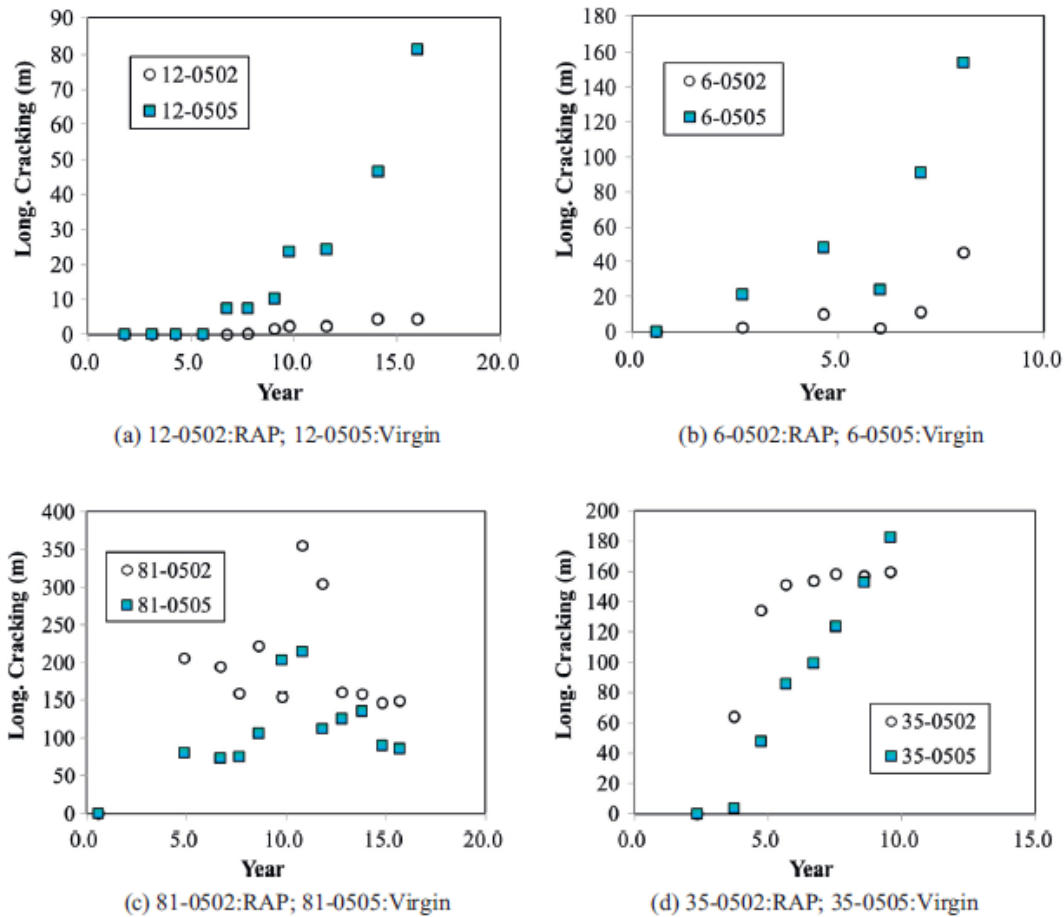


Figura 2-12. Agrietamiento longitudinal en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor. Fuente: The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays (Wang, 2016).

En la Figura 2-12 se puede notar que, a diferencia del agrietamiento por fatiga, el agrietamiento longitudinal de las secciones usando RAP en Florida y California es incluso menos severo que aquellos que usan mezclas vírgenes.

En Alberta el grado de agrietamiento longitudinal de la sección usando RAP parece más alto que el de mezcla virgen, pero la diferencia no es tan apreciable como en el agrietamiento por fatiga. En el sitio de Nuevo México, la extensión del agrietamiento longitudinal de la sección que usa RAP es inicialmente mayor que la de la mezcla virgen, pero se redujo al final del período de monitoreo. Los cuatro sitios, que representan cuatro condiciones climáticas extremas, indican que las tendencias de desarrollo de agrietamiento longitudinal pueden ser diferentes a las tendencias de agrietamiento por fatiga.

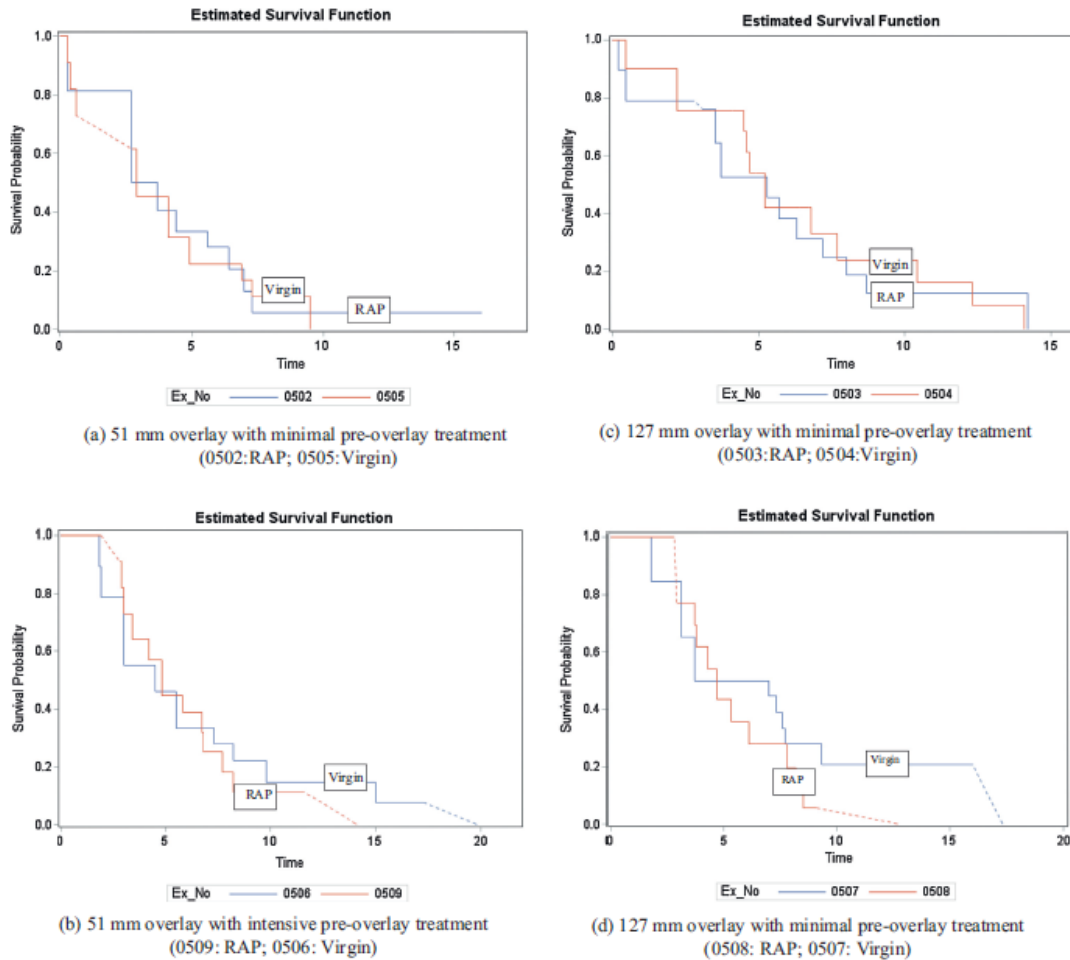


Figura 2-13. Funciones de supervivencia de agrietamiento longitudinal basados en los 18 sitios 5-SPS. Fuente: *The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays* (Wang, 2016).

En la Figura 2-13 se aprecian las funciones de supervivencia de las secciones que usan RAP en comparación con las que usan asfalto virgen. El comportamiento que exhiben es bastante similar, excepto las de (d), donde las secciones que usan mezclas vírgenes muestran mayores probabilidades de supervivencia después de 5 años.

Se deben tomar precauciones para interpretar la insignificante diferencia en el agrietamiento longitudinal, ya que esto no implica necesariamente que las mezclas de RAP funcionen tan bien como las mezclas vírgenes para resistir este deterioro. Una explicación más plausible es que una vez que surgen grietas longitudinales en las secciones que usan RAP, evolucionan rápidamente a grietas por fatiga y no se desarrollan como longitudinales.

2.7.1.3 Agrietamiento transversal

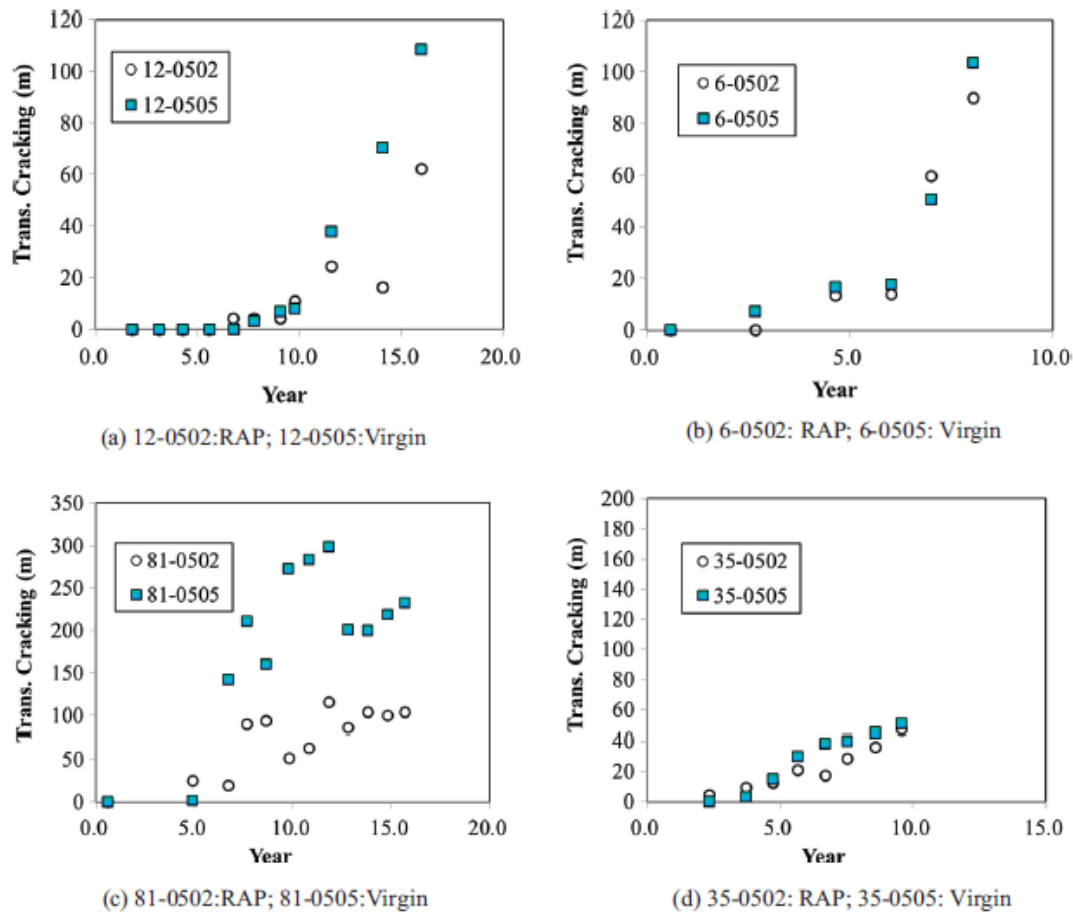


Figura 2-14. Agrietamiento transversal en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor. Fuente: The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays (Wang, 2016).

El agrietamiento transversal está típicamente relacionado con las propiedades térmicas de las mezclas de asfalto. En la Figura 2-14, para el sitio en Florida, se observa que la longitud total de las grietas transversales de la sección usando la mezcla con RAP es inicialmente similar al de la sección que usa la mezcla virgen, pero se vuelve relativamente menor hacia el final del período de monitoreo. En California y Nuevo México, el agrietamiento transversal de ambas mezclas parece ser similar. En Alberta, la extensión del agrietamiento transversal de la sección que contiene RAP es menor que la mezcla virgen. Las tendencias de desarrollo de agrietamiento transversal de los cuatro sitios parecen ser diferentes a las tendencias de agrietamiento por fatiga y grietas longitudinales.

Las posibles diferencias en el agrietamiento transversal de las secciones de pavimento usando RAP frente a mezclas vírgenes se examinan adicionalmente a partir de las funciones de supervivencia. El umbral de falla se elige para que sea de 20 [m], lo que se obtiene sumando el largo de todas las grietas transversales. Este umbral usualmente coincide con el salto repentino en las curvas de desarrollo de grietas transversales, como se muestra en la Figura 2-15.

Para los dos casos de superposición delgada, la Figura 2-15 revela que las funciones de supervivencia de las secciones que usan mezclas que contienen RAP son similares a las que usan mezclas vírgenes. Sin embargo, para los dos experimentos de superposición gruesa, las probabilidades de supervivencia de las secciones que usan materiales vírgenes parecen ser más altas dentro del período de monitoreo.

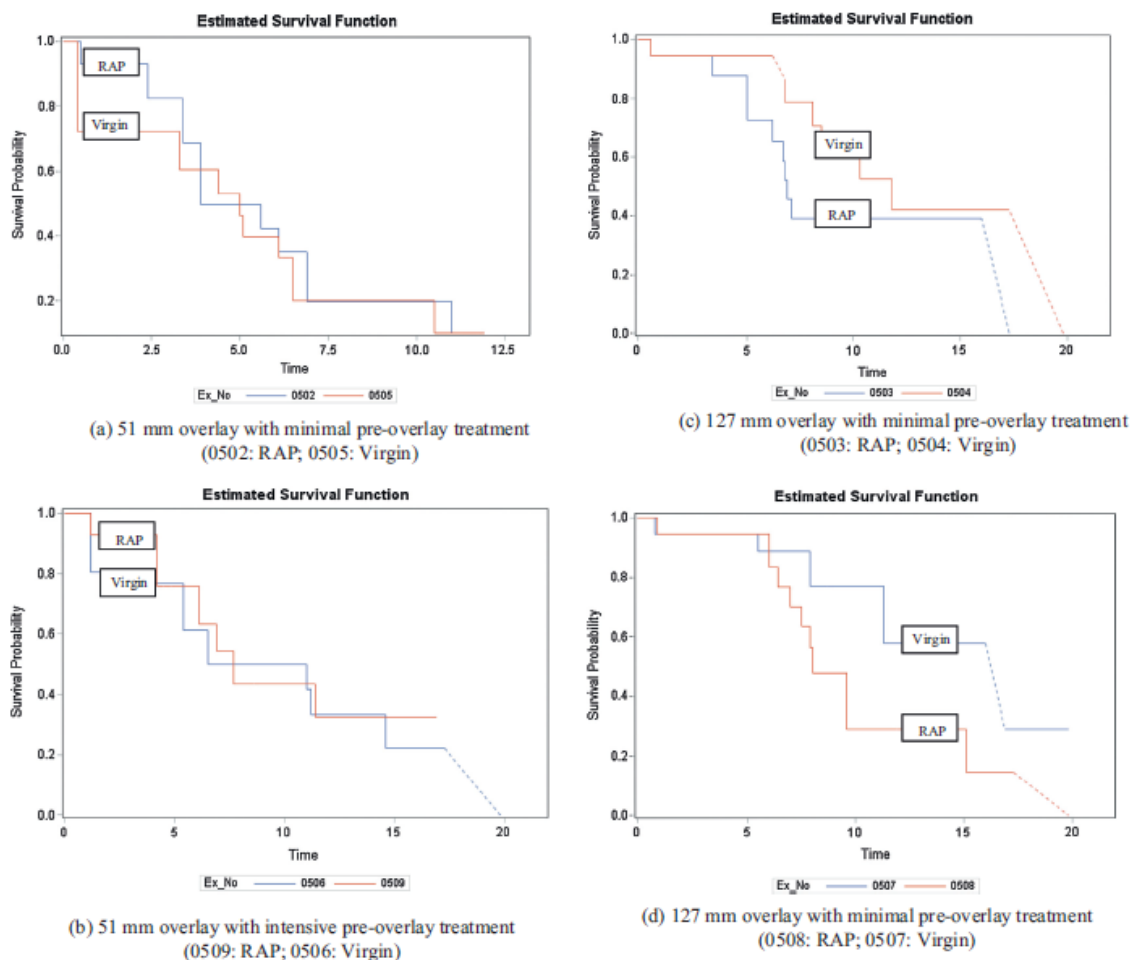


Figura 2-15 Funciones de supervivencia de agrietamiento transversal basados en los 18 sitios 5-SPS. Fuente: *The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays* (Wang, 2016).

Al igual que en el caso del agrietamiento longitudinal se debe tener cuidado al interpretar el agrietamiento transversal, que este sea pequeño en las secciones de recubrimiento relativamente delgadas, no implica necesariamente que la mezcla que contiene RAP se comporte tan bien como la mezcla virgen. Una explicación más plausible es que las grietas por fatiga en el recorrido de la rueda pueden haberse superpuesto con las grietas transversales desarrolladas previamente disminuyendo así la longitud total de la grieta transversal.

2.7.1.4 Ahuellamiento

En climas húmedos, la formación de baches aumenta el riesgo de deslizamiento sobre agua del vehículo y la pérdida de roce, lo que puede causar graves accidentes. Una revisión exhaustiva de la literatura sugiere que una profundidad de ahuellamiento de 5,1[mm] puede causar el riesgo de hidroplaneo. Además, se han desarrollado criterios para la evaluación de la seguridad de los vehículos, con diferentes velocidades y distancia de frenado, para ahuellamientos entre 5 [mm] y 25 [mm]. En el documento que se revisó se considera una profundidad de 5,5[mm] como límite para el análisis de supervivencia.

El ahuellamiento puede ser causado por diferentes mecanismos, incluido el corte en el concreto asfáltico, la pérdida de materiales superficiales o la deformación permanente de las capas base.

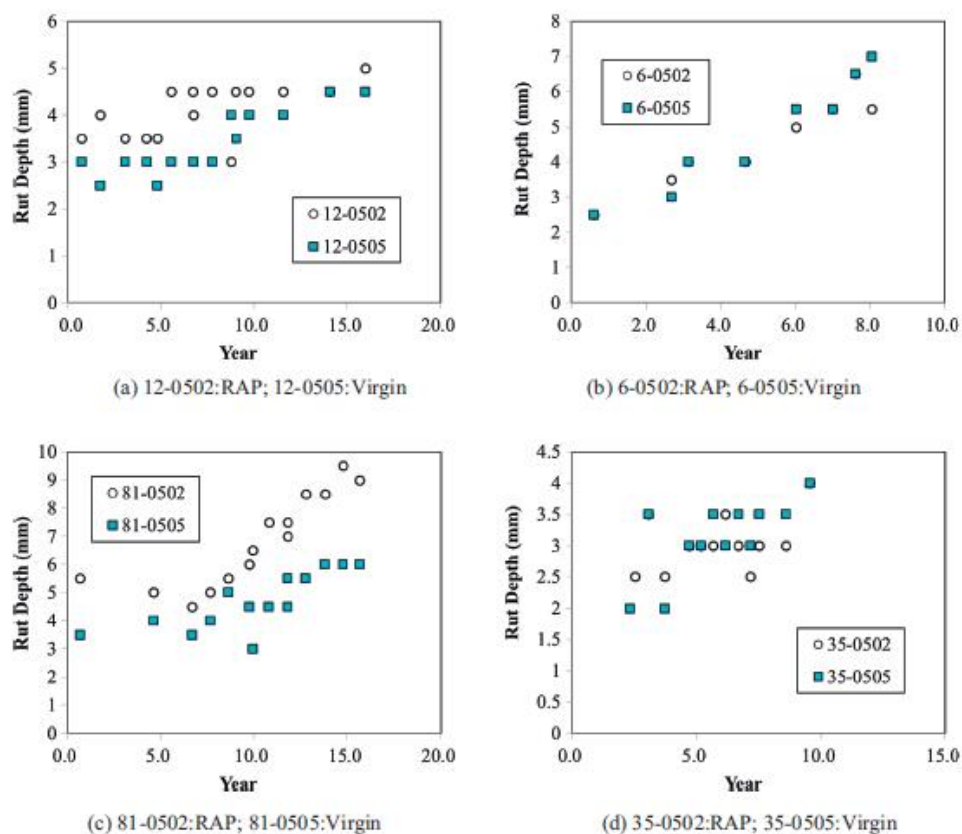
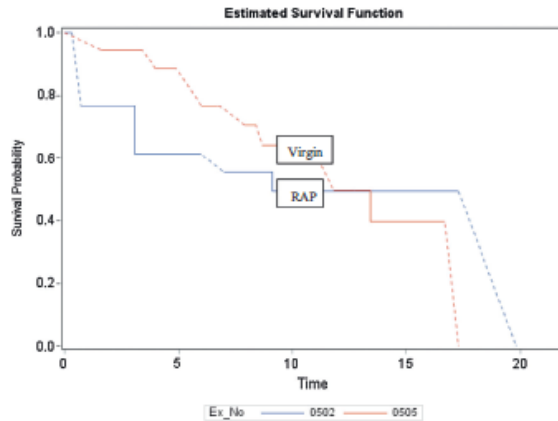
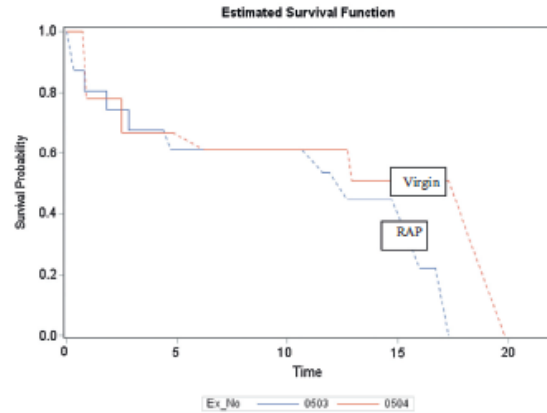


Figura 2-16. Ahuellamiento en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor. Fuente: *The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays* (Wang, 2016).

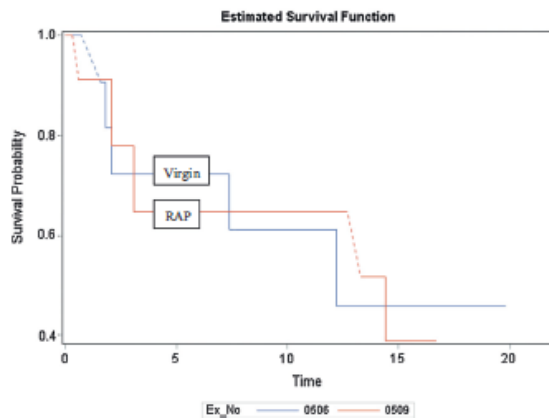
Como se aprecia en la Figura 2-16 el ahuellamiento de las secciones con RAP en Florida y Alberta son mayores que las secciones que utilizan materiales vírgenes, mientras que en California y Nuevo México la profundidad de ahuellamiento de ambas pistas son similares.



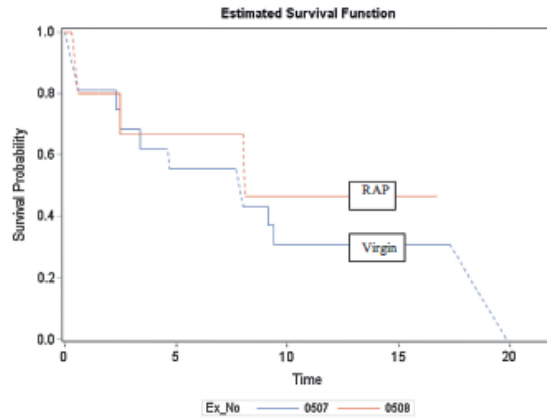
(a) 51 mm overlay with minimal pre-overlay treatment (0502:RAP; 0505:Virgin)



(c) 127 mm overlay with minimal pre-overlay treatment (0503: RAP; 0504: Virgin)



(b) 51 mm overlay with intensive pre-overlay treatment (0509: RAP; 0506: Virgin)



(d) 127 mm overlay with minimal pre-overlay treatment (0508: RAP; 0507: Virgin)

Figura 2-17 Funciones de supervivencia de ahuellamiento basados en los 18 sitios 5-SPS. Fuente: *The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays* (Wang, 2016).

Utilizando una profundidad de 5,5 [mm] como valor umbral para el ahuellamiento, las funciones de supervivencia se presentan en la Figura 2-17.

Para la capa delgada sin tratamiento previo, las probabilidades de supervivencia de las secciones con materiales vírgenes son inicialmente más altas, pero se vuelven similares a los de la mezcla con RAP hacia el final del período de monitoreo. Por otra parte, para capas delgadas con tratamiento intensivo las probabilidades de supervivencia de las secciones con y sin RAP son aproximadamente las mismas, lo mismo ocurre en la sección gruesa sin tratamiento previo. Sin embargo, es interesante observar que las probabilidades de supervivencia de las secciones con RAP de las superposiciones gruesas con tratamiento previo intensivo son más altas que las probabilidades de supervivencia de las secciones vírgenes.

2.7.1.5 Regularidad

La regularidad es un importante indicador de rendimiento funcional de los pavimentos. La alta regularidad no solo afecta la comodidad de manejo, sino que también afecta los costos de operación del vehículo y el consumo de combustible.

La regularidad del pavimento se representa comúnmente por el Índice de Regularidad Internacional (IRI). Las condiciones del pavimento se clasifican por valores de regularidad basados en umbrales establecidos. Por ejemplo, en EE.UU., el pavimento con un valor de IRI menor a 0,9 [m/km] se califica como "excelente", entre 0.9[m/km] y 1.5[m/km] se clasifica como "bueno", entre 1.5[m/km] y 2.7[m/km] se califica como "promedio" y superior a 2.7[m/km] se califica como "deficiente".

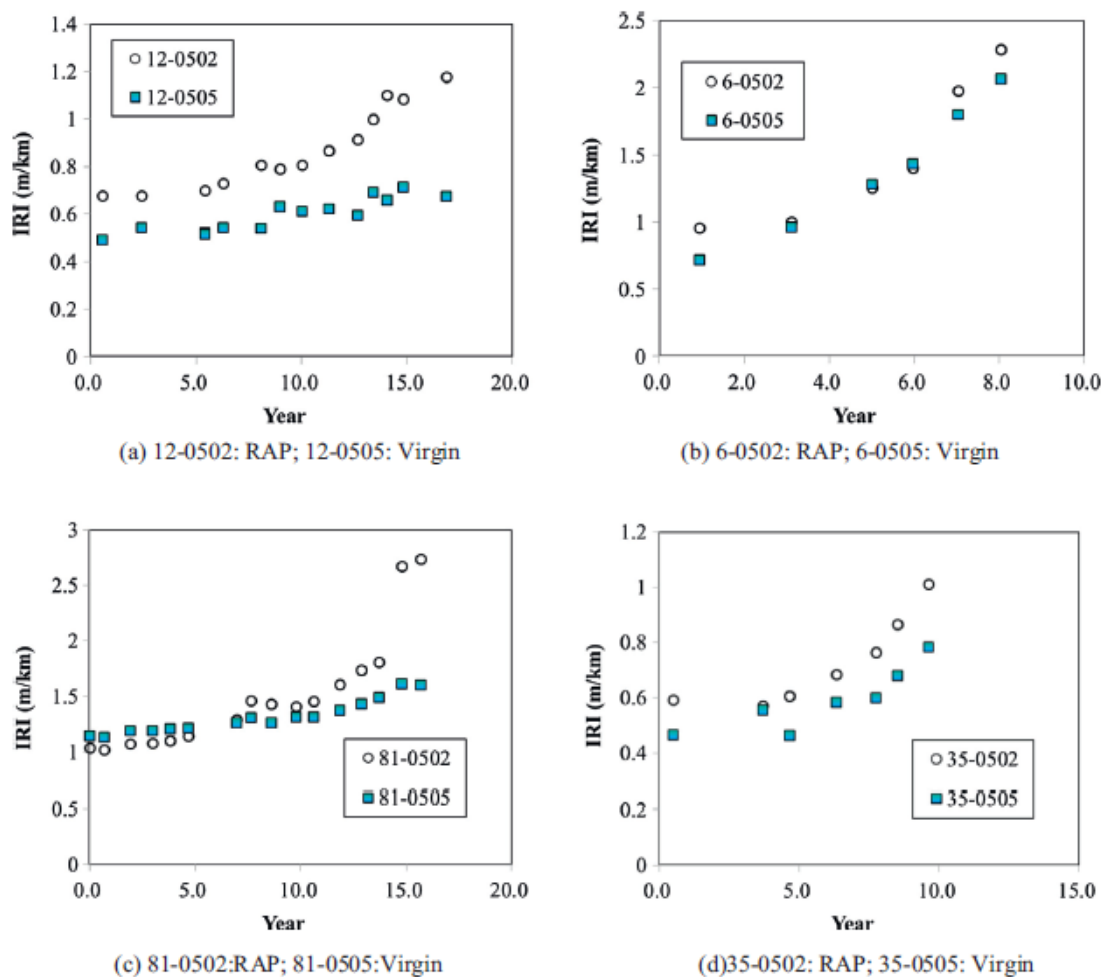


Figura 2-18 IRI en los distintos sectores estudiados, en capas de 51[mm] de espesor. Fuente: *The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays* (Wang, 2016).

Las tendencias de desarrollo de regularidad de los cuatro sectores se muestran en la Figura 2-18. La regularidad parece verse afectada por las condiciones iniciales de IRI. Además, los sitios en Florida y Nuevo México sugieren que la regularidad de las secciones con RAP siempre fue más alta que la de las

secciones que usan materiales vírgenes. Los sitios en California y Alberta sugieren que la regularidad entre ambas secciones fue similar al principio, pero luego las mezclas con RAP se vuelven más ásperas.

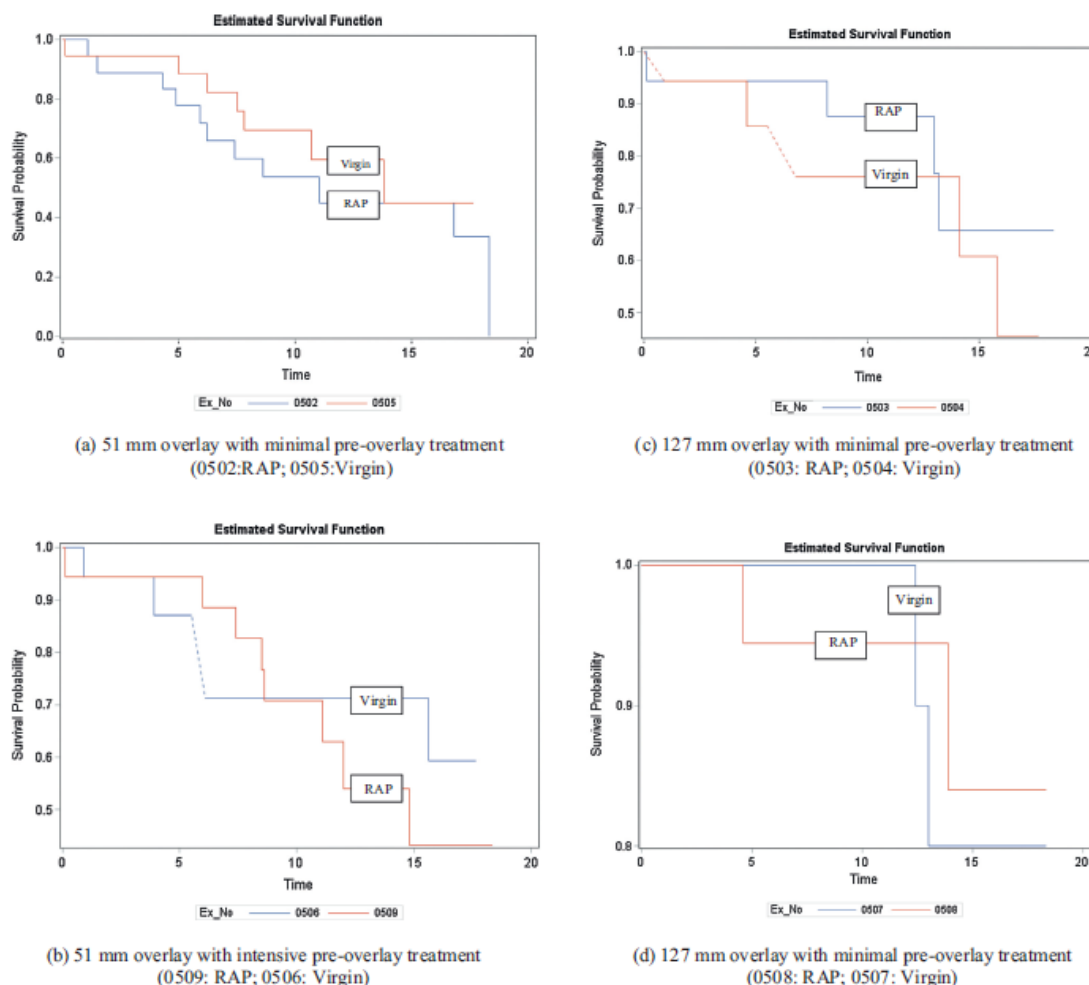


Figura 2-19 Funciones de supervivencia de regularidad basados en los 18 sitios 5-SPS. Fuente: *The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays* (Wang, 2016).

Para las funciones de supervivencia se utiliza como umbral de regularidad 1.5 [m/km], los resultados se muestran en la Figura 2-19. En general, las probabilidades de supervivencia de las dos secciones son mixtas.

A modo de conclusión se puede señalar que, para capas finas, la regularidad del pavimento se ve negativamente afectada por la reducción de resistencia al agrietamiento de las mezclas que contienen RAP, mientras que, para capas gruesas con tratamientos previos, la regularidad del pavimento se beneficia del menor flujo de corte causado por mezclas más rígidas que contienen RAP.

2.7.2 Sensibilidad a la humedad

El daño por humedad es un problema serio en los pavimentos de asfalto, medir la sensibilidad a la humedad de una mezcla específica es un gran desafío al igual que interpretar los resultados de manera correcta.

Para poder abordar el problema de forma adecuada, se deben incorporar tanto los factores químicos como los mecánicos, los primeros se refieren principalmente a como se desarrolla la interacción entre el ligante y los agregados y como esta cambia en presencia de agua, por otra parte, los problemas mecánicos intentan resolver como reducir el acceso de agua a la interfase asfalto-agregado.

2.7.2.1 *Falla de adhesión entre el asfalto y el agregado*

Se refiere al proceso en el cual la unión entre asfalto y agregado es quebrada debido a la acción del agua, este proceso se basa en un fenómeno físico donde las partículas de agua alteran la interacción entre el asfalto y la superficie de los agregados. El agregado tiene una afinidad más grande por el agua que el asfalto, por lo que el agua penetra a través del asfalto mediante osmosis, a un ritmo que depende del grosor de la capa y la diferencia de presión, en general asfaltos blandos son más permeables al agua debido una menor viscosidad.

2.7.2.2 *Falla de cohesión del asfalto*

Si queda agua atrapada en los vacíos de aire y luego sube la temperatura, la evaporación del agua puede llegar a producir suficiente presión para romper la película de asfalto que rodea al vacío, separando la unión de moléculas del asfalto.

2.7.2.3 *Falla de cohesión de los agregados*

Puede producirse una falla dentro del agregado debido a la acción del agua, esto está directamente relacionado con la solubilidad del agregado.

2.7.2.4 *Emulsificación espontánea*

Este mecanismo debilita la unión asfalto-asfalto debido a la presencia de agua, es muy raro que se presente en mezclas en caliente, debido a que necesita gran temperatura y fuerza de corte, como la que se encuentra en un molino coloidal.

2.7.2.5 *Congelamiento*

El agua atrapada en pavimentos puede expandirse hasta un 9% si se congela, esta expansión de agua atrapada en vacíos de aire puede dañar al pavimento.

2.7.3 Efectos del RAP sobre ensayos a desarrollar

2.7.3.1 Efectos del RAP sobre el TSR.

Se estudiará la bibliografía con respecto a la influencia del RAP sobre mezclas asfálticas, mediante el ensayo TSR, específicamente la resistencia seca, húmeda y la razón entre ambas. Dado que se estudian mezclas en caliente se omitirá la información entregada acerca de mezclas tibias.

En la Figura 2-20 se aprecia que inicialmente la resistencia a tracción disminuye con la incorporación de RAP a la mezcla, sin embargo, a medida que se agrega más cantidad esta aumenta. Lo mismo ocurre en las probetas acondicionadas, que se muestran en la Figura 2-21.

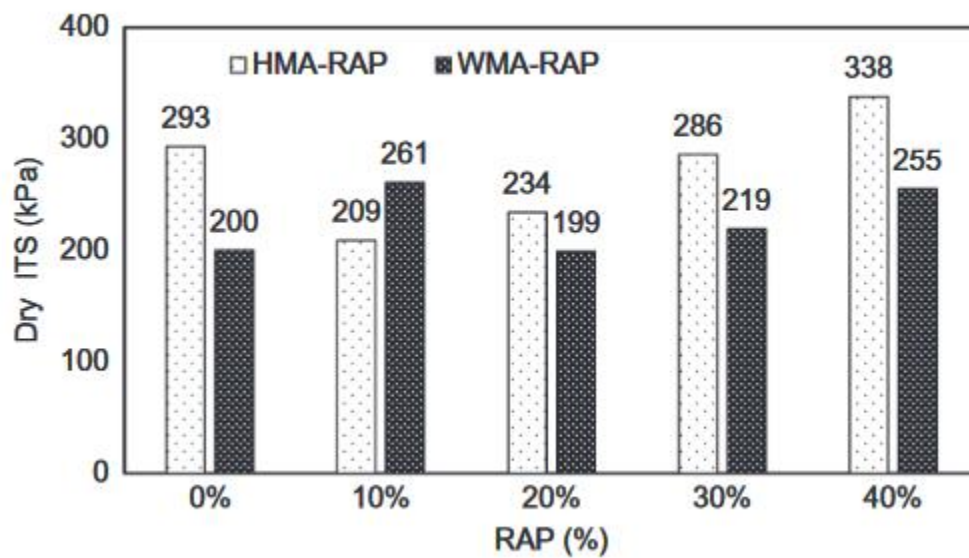


Figura 2-20. Resistencia a la tracción para probetas sin acondicionamiento. Fuente: Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials (Dharamveer Singh, 2017).

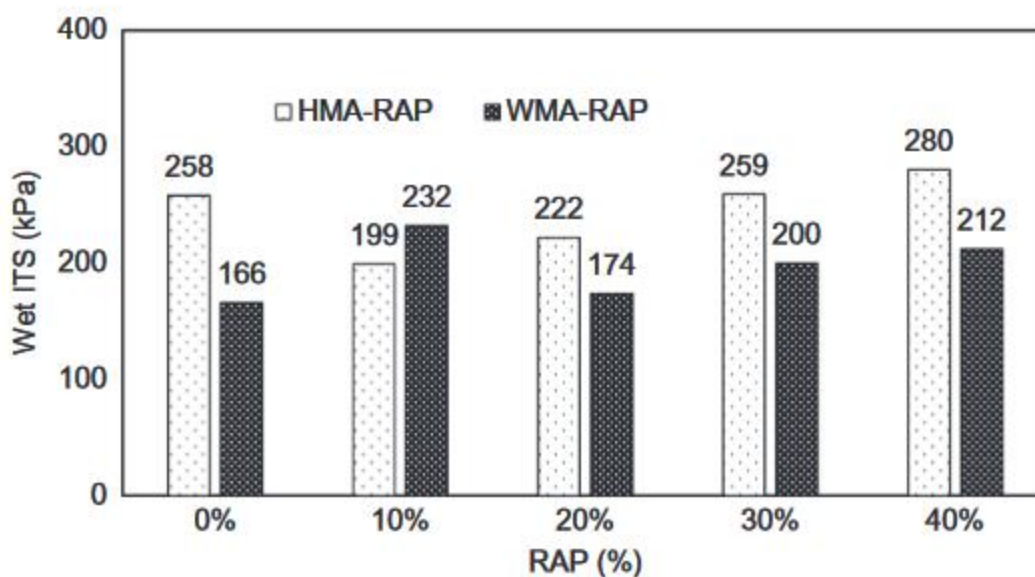


Figura 2-21. Resistencia a la tracción para probetas acondicionamiento. Fuente: Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials (Dharamveer Singh, 2017)

En el caso de la razón entre la resistencia a tracción para probetas sin y con acondicionamiento se observa en la Figura 2-22 que hasta un 30% existe un aumento en cuanto a la resistencia a la humedad, sin embargo, a medida que se agrega más RAP esta disminuye considerablemente.

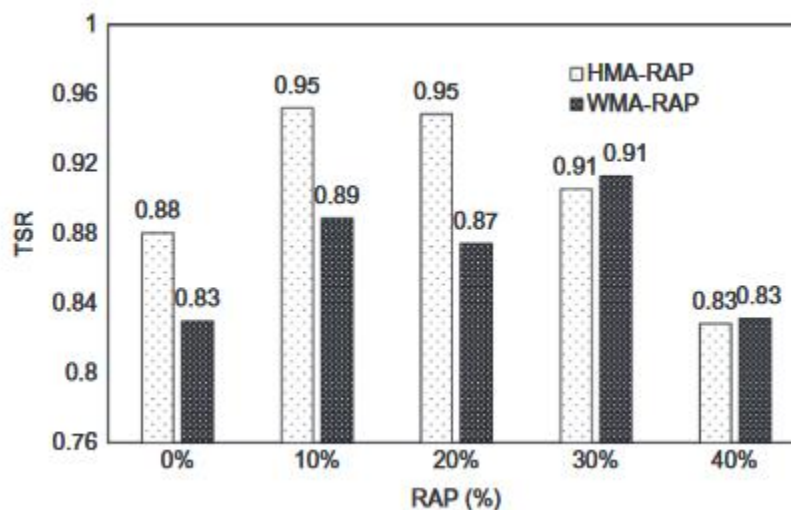


Figura 2-22. Razón entre resistencia a tracción de probetas acondicionadas sobre probetas secas. Fuente: Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials (Dharamveer Singh, 2017)

2.7.3.2 Efectos del RAP sobre la fatiga.

Se presenta un resumen de fatiga en 4 puntos, en particular nos interesan los contenidos con 0% de RAP y 30% de RAP, para asfalto con PG 64-22 y PG 70-28. Se puede observar un aumento en la rigidez inicial para ambos ligantes al incorporar RAP, sin embargo, en el caso del asfalto modificado este aumento es considerablemente mayor. Esto se debe principalmente a que el ligante modificado presenta una rigidez menor comparado con el asfalto sin modificar.

En cuanto al comportamiento referido a los ciclos de fatiga existen comportamientos radicalmente distintos dependiendo del tipo de ligante. Por una parte, el ligante PG 64-22 obtiene un mejor desempeño a fatiga a medida que se incorpora RAP este aumenta un 17%, el asfalto modificado, en cambio, disminuye un 36%. Es importante notar que no se están tomando en cuenta los asfaltos que poseen RAS, es decir solo se considera el caso base (N o P)-ORS-ORP y el caso con 30% de RAP (N o P)-ORS-30RP.

Es posible que el caso del ligante base N-ORS-ORP no sea representativo de la realidad, debido a que la tendencia al utilizar más RAP debería ser inversamente proporcional.

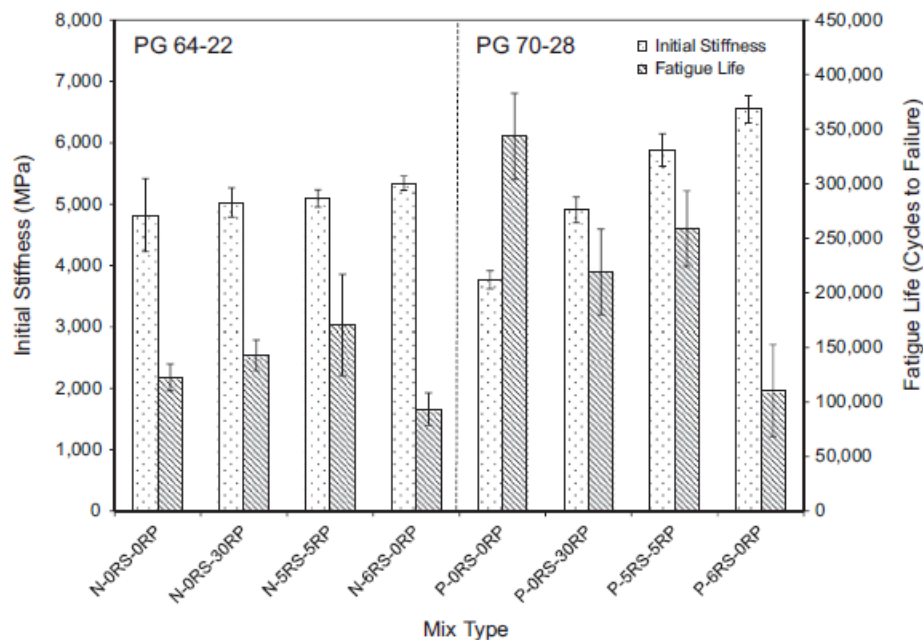


Figura 2-23 Resultados de Fatiga para PG 64-22 y PG 70-28. Fuente: Comparison of laboratory performance of asphalt mixes containing different proportions of RAS and RAP. (Rouzbeh Ghabchi, Manik Barman, Dharamveer Singh, Musharraf Zaman, Muhammad Ali Mubarak., 2016)

2.8 EXPERIENCIA NACIONAL

En el contexto nacional, el uso de RAP es prácticamente nulo, solo ha habido tramos de prueba aislados. Para poder hacer buen uso de esta tecnología se debe tener una estructura teórica y práctica que no existe en la actualidad.

2.8.1 Manual de carreteras

El manual de carreteras, en el Volumen 5, sección 5.423 entrega pautas para ejecutar un diseño con RAP mediante el método

Para caracterizar los ligantes se utiliza el criterio vigente en el manual de carreteras, referido a grado de viscosidad absoluta, ya sea CA 24 o CA 14, en cuanto al RAP este deberá provenir de fresado de pavimento asfalto, trozos de demolición o excesos de producción, evitando mezclas que presenten ahuellamiento. Además, la cantidad máxima de RAP permitida será de 20% y este será separado en al menos 2 fracciones la primera bajo 3/4" y la segunda bajo la malla 3/8", el tamaño máximo del RAP deberá ser igual al tamaño máximo definido para la mezcla.

Otro punto importante es que solo se considerara el aporte de asfalto de RAP si este representa un valor mayor a un 3% del material recuperado.

2.8.2 Tramos de prueba

Se confeccionó un tramo de prueba de Mezcla Asfáltica en caliente con 20% de RAP en el contrato de mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué en la provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso, se realizó en noviembre del 2012.

La mezcla utilizada cumple con la granulometría de la Banda IV-A-12.

Los parámetros utilizados fueron:

Tabla 2-9 Parametros del tramo de prueba en la ruta F-50.

Parámetros de mezcla con RAP 20 %	
Porcentaje de asfalto CA 24 [%]	5
Contenido de asfalto del RAP [%]	4.1
Densidad Marshall [kg/m]	2377
Rango de temperatura mezclado [°C]	145 - 170
Rango de temperatura compactación [°C]	120 - 160
Vacíos de aire [%]	5.9
Densidad probetas [kg/m]	2361

Fuente: Mezcla asfáltica en caliente con Pavimento de Asfalto Recuperado (Zuñiga, 2016)

También se realizó un segundo tramo de prueba en la Región Metropolitana, específicamente Camino Cruce Ruta G-78, con 20% de RAP sin embargo no se posee más información al respecto.

Es probable que ambos diseños hayan sido realizados mediante el método Marshall, lo que no es ideal, esto junto a la utilización de un ligante que no esté bien caracterizado para ser utilizado con RAP puede provocar fallas tempranas en los tramos construidos.

3 TRABAJO EN LABORATORIO.

El trabajo en laboratorio se dividirá en dos secciones, la primera comprende el método de diseño SUPERPAVE para mezclas asfálticas en caliente, en el marco de la licitación llevada a cabo por la DAP para pistas de estacionamiento aeroportuarias del aeropuerto Comodoro Arturo Merino Benítez mediante diseño SUPERPAVE. La segunda sección comprende el estudio del método de diseño SUPERPAVE para pavimentos con RAP, intentando emular el desempeño obtenido en la pista del aeropuerto Comodoro Arturo Merino Benítez.

Además de lo estipulado en el método SUPERPAVE se utilizan más ensayos de desempeño en particular Rigidez, Rueda de Hamburgo, Fatiga en cuatro puntos, Flow Number y Módulo Dinámico.

3.1 DISEÑO SUPERPAVE PARA AEROPUERTO COMODORO ARTURO MERINO BENÍTEZ

3.1.1 Tamizado del material.

En esta etapa lo primero que se debe hacer es separar todo el material que se utilizara en la mezcla a través de mallas de tamizado, este material se extrae desde el acopio de Constructora Asfalcura S.A., en este caso se trabajara con tres tipos de áridos los cuales corresponden a Gravilla $\frac{3}{4}$ ", Gravilla $\frac{1}{2}$ " y Polvo Roca, la granulometría obtenida para cada material se presenta en la Gráfico 3-1 y Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Porcentaje de material que pasa por cada tamiz.

Tamaño Tamiz ["]	Tipo de Árido		
	Gravilla 3/4	Gravilla 1/2	P. Roca
3/4	100	100	100
1/2	35	100	100
3/8	2	70	100
4	1	5	88
8	1	2	62
16	1	2	45
30	1	2	32
50	1	2	23
100	1	2	17
200	0.8	1.6	12.6

Fuente: Elaboración propia.

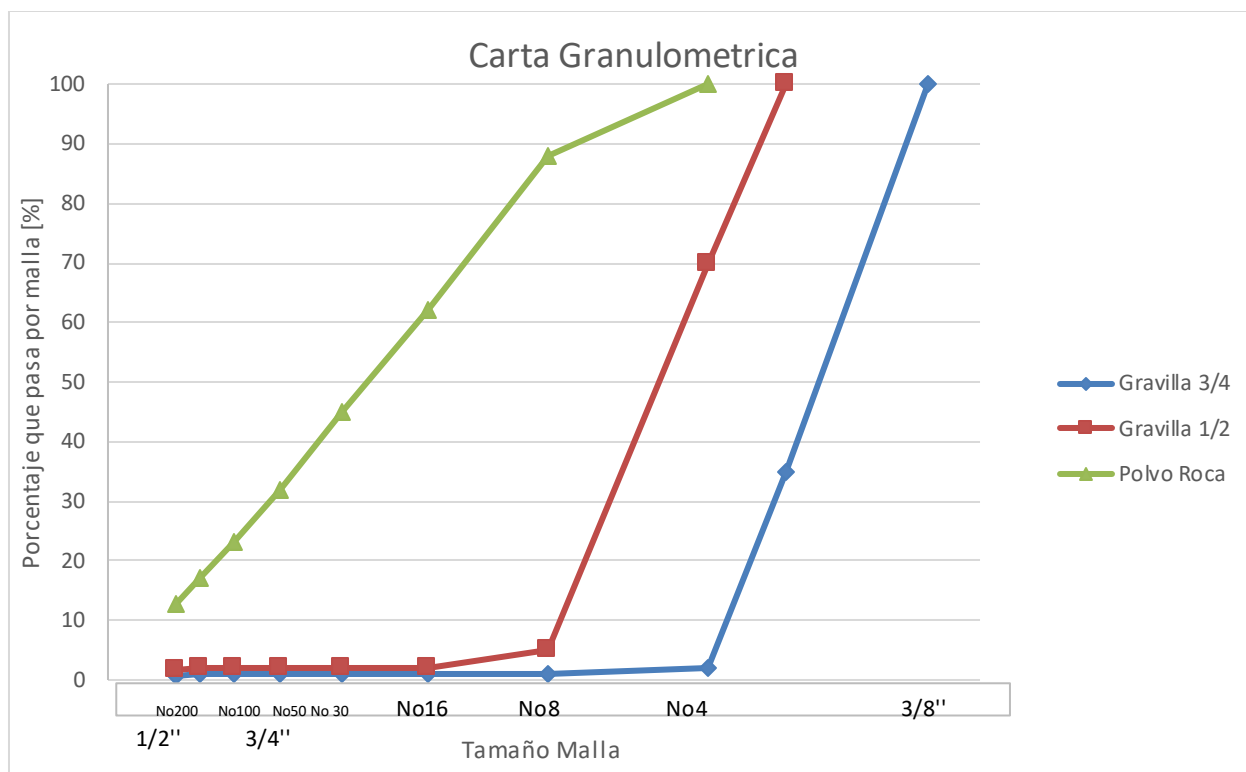


Gráfico 3-1. Carta granulométrica de los áridos que se utilizaran en el diseño de la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Propiedades de origen y consenso.

Luego se debe ejecutar los ensayos requeridos, por el método SUPERPAVE, a los áridos anteriormente mencionados, los cuales corresponden a:

- Angularidad del agregado grueso.
- Angularidad del agregado fino.
- Partículas planas y alargadas.
- Equivalente de arena.
- Desgaste de Los Ángeles.
- Desintegración por sulfato.
- Materiales deletéreos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de estos ensayos:

Tabla 3-2. Propiedades de origen pertenecientes a los agregados que se utilizaran en la confección de la mezcla.

Muestra	Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca	Limite
Angularidad del Agregado una cara fracturada [%]	97	100	-	>75
Angularidad del Agregado dos caras fracturadas [%]	94	99	-	-
Partículas planas y alargadas [%]	0	0,1	0	<10
Angularidad del Agregado Fino [%]	-	-	50,5	>40
Equivalente de Arena [%]	-	-	57	>40

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-3. Propiedades de consenso pertenecientes a los agregados que se utilizaran en la confección de la mezcla.

Muestra	Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca	Limite
Desgaste de Los Ángeles [%]	11,1	13,4	15,5	<40
Durabilidad [%]				
Desintegración por Sulfato de Sodio	3,5	3,4	-	<20
Desintegración por Sulfato de Magnesio	4,4	4,5	-	<20
Materiales Deletéreos [%]	0	0	0	<4

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que todos los agregados descritos en la Tabla 3-2 y Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-3 cumplen en forma individual con el estándar requerido, por lo tanto, cualquier combinación de estos también lograra cumplir los limites especificados de acuerdo al método SUPERPAVE

3.1.3 Propiedades del Ligante.

El asfalto virgen fue sometido a una caracterización completa, de acuerdo con sus resultados se concluyó que cumplía satisfactoriamente con un grado PG 76-28, por otra parte, su temperatura de mezclado es: 177-186 [°C] y de compactación 158-163 [°C].

3.1.4 Selección de combinaciones para mezclas de prueba.

El segundo paso es combinar los áridos de manera tal que se cumpla los requisitos en cuanto a los limites señalados en el manual MS-2, como se vio en el capítulo anterior las propiedades de origen y consenso no deberían presentar mayores problemas por lo que solo queda cumplir con los puntos de control de granulometría establecidos. Se generan 3 tipos de combinación, una promedio, una más gruesa que la anterior y la última más fina que la combinación promedio.

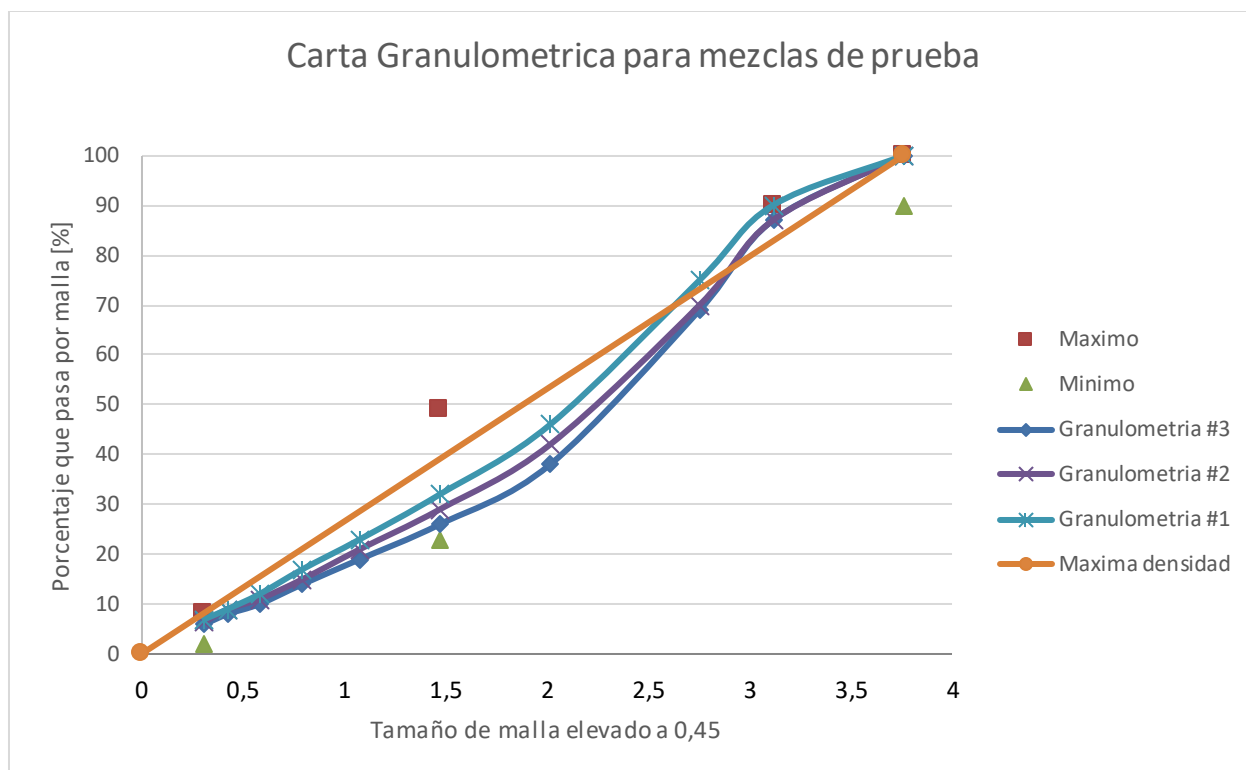


Gráfico 3-2. Carta Granulométrica para mezclas de prueba. Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfico 3-2 se observa que todas las combinaciones elegidas son gruesas, esto debido a que la cantidad de polvo, es decir árido bajo la malla #200, era muy elevada, por lo tanto para lograr cumplir con la proporción de polvo se debió optar por esta clase de granulometría ya que para mezclas gruesas se trabaja con un rango más amplio.

3.1.5 Límites SUPERPAVE para propiedades de origen y consenso referidas a la mezcla.

Como se revisó en el capítulo 3.1.2, todos los áridos cumplen individualmente con los requisitos, por lo que cualquier combinación también cumplirá con ellos.

3.1.6 Propiedades Volumétricas de las mezclas de prueba.

Para la determinación de las propiedades volumétricas se utilizan probetas cilíndricas, en este caso se denominará a las probetas de las mezclas de prueba como P1-1 P1-2 a las de la granulometría #1, P2-1 P2-2 a la granulometría #2 y P3-1 P3-2 a la granulometría #3.

Cabe destacar que se utilizó el método en el cual se compactan las probetas al número de giros máximos, para la luego extrapolar los resultados y obtener los datos a número de giros inicial y de diseño.

Para comenzar se extraen los datos de compactaciones desde el compactador giratorio, los que se aprecian en la Tabla 3-4:

Tabla 3-4. Datos de compactación y gravedades brutas estimadas.

Probeta	P1-1	P1-2	P2-1	P2-2	P3-1	P3-2
Altura Probeta @ N_{max} [mm]	114.2	114.7	112.7	113.1	111.9	111.9
Altura probeta @ N_{des} [mm]	116	116.5	114.7	114.9	113.5	113.5
Altura probeta @ N_{ini} [mm]	128.6	129.2	127	127.4	125.8	125.6
G_{mb} est @ N_{max}	2.299	2.274	2.322	2.329	2.350	2.330
G_{mb} est @ N_{ini}	2.042	2.019	2.061	2.067	2.090	2.076
G_{mb} est @ N_{des}	2.264	2.239	2.282	2.292	2.317	2.297

Fuente: Elaboración propia.

Se debe cumplir que la altura al número de giros de diseño se encuentre en un rango 115 ± 5 [mm], como se aprecia en la Tabla 3-4 esto es efectivo, luego de obtener las alturas que nos interesan se procede a calcular un estimado de la gravedad específica bruta de cada probeta, como se señala en la (Ecuación 2-1).

Este dato sin embargo es demasiado alejado de la realidad por lo que se utiliza el ensayo D2726/D2726M-14 / AASHTO T 166-16, para obtener la gravedad específica de diseño al número de giros máximo, como se aprecia en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Gravedad específica bruta medida mediante ensayo.

Probeta	P1-1	P1-2	P2-1	P2-2	P3-1	P3-2
Masa seca al aire [g]	4640.5	4609.4	4625.2	4654.6	4646.8	4607.1
Probeta SSS[g]	4648.2	4621.8	4654.1	4659.6	4654.1	4615.5
Probeta sumergida[g]	2709.6	2692	2735.2	2739.1	2735.2	2706.7
G_{mb}	2.394	2.389	2.410	2.424	2.422	2.414

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido se procede a generar factores de corrección, los cuales son utilizados para lograr una mejor aproximación a la gravedad específica bruta para los giros de diseño y los giros iniciales, el resultado final se entrega en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Gravedades específicas corregidas.

Probeta	P1-1	P1-2	P2-1	P2-2	P3-1	P3-2
G_{mb} estimada @ N_{max}	2.299	2.274	2.322	2.329	2.350	2.330
G_{mb} medida @ N_{max}	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
G_{mb} corregida @ N_{ini}	2.126	2.120	2.139	2.152	2.154	2.150
G_{mb} corregida @ N_{des}	2.357	2.352	2.368	2.386	2.387	2.380

Fuente: Elaboración propia.

Luego se calcula la razón entre el G_{mb} y G_{mm} para saber cuál será el vacío de aire de cada probeta a distintos niveles de compactación, como se observa en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Porcentaje de gravedad específica sobre el máximo teórico a distintos niveles de compactación.

%G _{mm} @ N _{ini}						
Probeta	P1-1	P1-2	P2-1	P2-2	P3-1	P3-2
G _{mm}	2.469	2.469	2.481	2.481	2.486	2.486
%G _{mm} @ N _{ini} %	86.1	85.9	86.2	86.7	86.6	86.5
%G _{mm} ave@ N _{ini} %	86.0		86.5		86.6	
%G _{mm} @ N _{des}						
Probeta	P1-1	P1-2	P2-1	P2-2	P3-1	P3-2
G _{mm}	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
%G _{mm} @ N _{des} %	95.4	95.2	95.5	96.2	96.0	95.7
% G _{mm} ave @ N _{des} %	95.3		95.8		95.9	
%G _{mm} @ N _{des}						
Probeta	P1-1	P1-2	P2-1	P2-2	P3-1	P3-2
G _{mm}	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
% G _{mm} @ N _{max} %	97.0	96.7	97.2	97.7	97.4	97.1
%G _{mm} ave @ N _{max} %	96.8		97.4		97.2	

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la (Ecuación 2-10 es posible obtener los vacíos de aire de la muestra que se muestran en la Tabla 3-8, en la cual se observa que la mezcla 3 es la más cercana al 4% de vacíos de aire.

Tabla 3-8. Vacíos de aire en las mezclas.

Mezcla	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Vacíos de Aire %	4.7	4.19	4.12

Fuente: Elaboración propia.

A continuación mediante la (Ecuación 2-11 se procede a calcular los vacíos en el agregado minera cuyos resultados se muestran en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Vacíos en el agregado mineral.

Mezcla	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Gravedad específica bruta	2.354	2.377	2.384
Gravedad específica bruta seca	2.64	2.645	2.648
Peso de agregados con respecto al total de la mezcla %	94.8	94.8	94.77
VAM %	15.5	14.8	14.7

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente es necesario calcular los vacíos llenos con asfalto.

Tabla 3-10. Vacíos llenos con asfalto.

Mezcla	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
VAM %	15.5	14.8	14.7
Vacíos de aire %	4.7	4.2	4.1
VFA %	69.913	71.685	71.949

Fuente: Elaboración propia.

Además, con los datos obtenidos es posible estimar cual será la cantidad de asfalto necesario para lograr el objetivo de obtener un 4% de vacíos de aire en la mezcla, en la Tabla 3-11 se observa lo anteriormente mencionado. También es necesario calcular la proporción de polvo, ya que la combinación de áridos mostraba una gran cantidad de filler, lo que podría llegar a ser un problema.

Tabla 3-11. Asfalto estimado para alcanzar los vacíos de diseño.

Mezcla	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
$P_{a\ ini} @ P_{b\ ini}$	4.65	4.19	4.12
$P_{b\ ini}$	5.3	5.3	5.3
S	0.4	0.4	0.4
%Vacíos diseño	4	4	4
$P_{b\ estimated}$	5.56	5.38	5.35
DP	1,57	1,20	1,13

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se conocen todos los datos necesarios se procede a tomar una decisión acerca de la granulometría que se utilizará para hacer las mezclas de diseño, dado que la mezcla 3 es la que posee un contenido de ligante menor, y además cumple con los límites mencionados en la Tabla 3-12, se elige para ejecutar las mezclas de diseño.

Tabla 3-12. Límites establecidos para la mezcla de acuerdo con el método SUPERPAVE.

Mezcla	Mezcla 3	Límite SUPERPAVE
VAM %	14.7	>13
VFA %	71.949	65-75
N_{ini}	86.6	≤ 89
N_{max}	97.2	≤ 98
DP	1.13	0.8-1.6

Fuente: Elaboración propia.

3.1.7 Mezclas de diseño

Obtenida la granulometría a utilizar se confeccionan cuatro nuevas mezclas, una con el porcentaje óptimo de ligante asfáltico y otras con: -0,5%, +0,5% y +1% respecto al valor anteriormente mencionado. Cabe destacar que las cantidades de ligante a utilizar y la cantidad de mezclas quedan a criterio del diseñador, en este caso se decidió la configuración descrita.

El procedimiento a realizar es el mismo utilizado en las mezclas de prueba por lo que solo se dará un resumen de los resultados obtenidos, como también de los gráficos que componen el resultado final.

3.1.7.1 Contenido de ligante

Se utilizan dos probetas por contenido de ligante cuya configuración corresponde a la siguiente.

Tabla 3-13. Contenido de ligante de mezclas de diseño

Numero de probeta	Probetas 1 y 2	Probetas 3 y 4	Probetas 5 y 6	Probeta 7 y 8
Porcentaje de asfalto	5,3	4,8	5,8	6,3

Fuente: Elaboración propia.

3.1.7.2 Densidades de las mezclas

A continuación, se presenta el cuadro que resume las densidades obtenidas de cada probeta luego de utilizar el compactador giratorio, así como también del porcentaje respecto a la gravedad máxima para cada uno de los giros.

Tabla 3-14. Densidades para cada mezcla de diseño.

Probeta N°	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
$G_{mb@Ndis}$ [g/cm³]	2,430	2,425	2,413	2,434	2,450	2,453	2,437	2,439
G_{mm} [g/cm]	2,534		2,492		2,474		2,456	
% G_{mm} ave@ N_{ini} %	86,6		85,2		88,1		88,2	
% G_{mm} @ N_{des} %	96		94,2		97,6		97,9	
% G_{mm} ave @ N_{max} %	97,4		95,6		99,1		99,3	

Fuente: Elaboración propia.

3.1.7.3 Resultados de propiedades volumétricas para cada mezcla

A continuación, en la Tabla 3-15. Requisitos SUPERPAVE Tabla 3-15 se presenta el resumen de cada propiedad junto con el criterio SUPERPAVE que deben cumplir, luego gráficos (3-3 al 3-8) permiten comprender mejor lo que ocurre en a medida que se modifica la cantidad de ligante.

Tabla 3-15. Requisitos SUPERPAVE

Propiedades Volumétricas para cada contenido de asfalto					
Porcentaje de asfalto	4,8	5,3	5,8	6,3	Limite SUPERPAVE
Va	5,7	4,0	2,9	2,1	4
VAM	13,8	14,2	14,2	14,6	>13
VFA	58,4	71,5	79,8	85,5	65-75
DP	2,0	1,6	1,5	1,3	0.8-1.6
%G _{mm} @ N _{ini}	85,2	86,6	87,7	88,2	≤89
%G _{mm} @ N _{max}	95,6	97,4	98,6	99,3	≤98

Fuente: Elaboración propia.

Es posible observar que para un 5,3% de ligante se cumplen todos los criterios SUPERPAVE. A continuación, se presentan los gráficos para cada criterio.

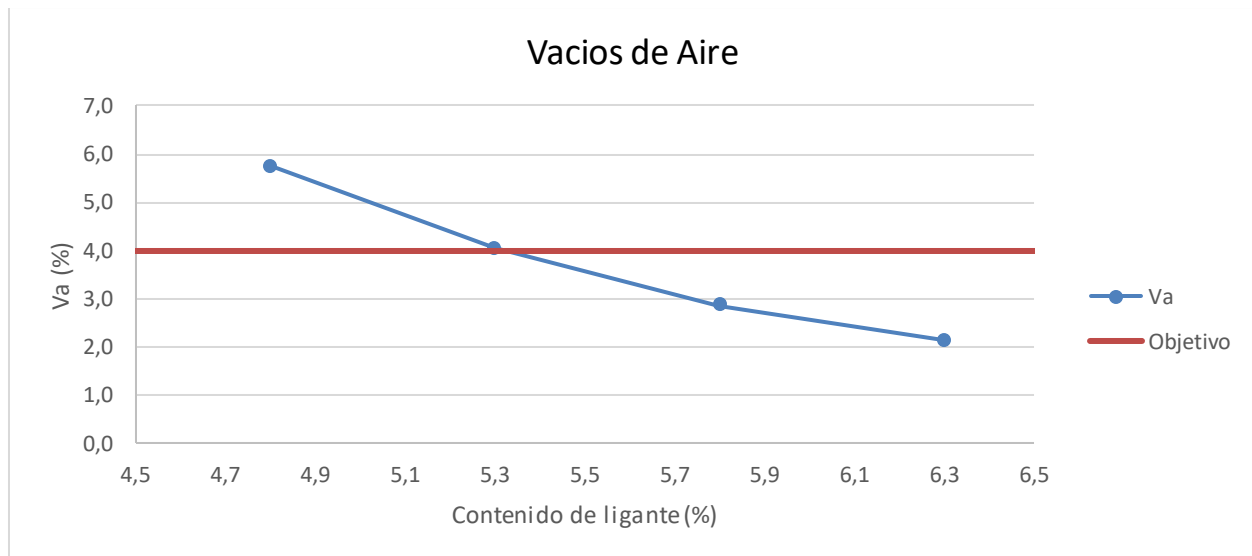


Gráfico 3-3. Vacíos de aire a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

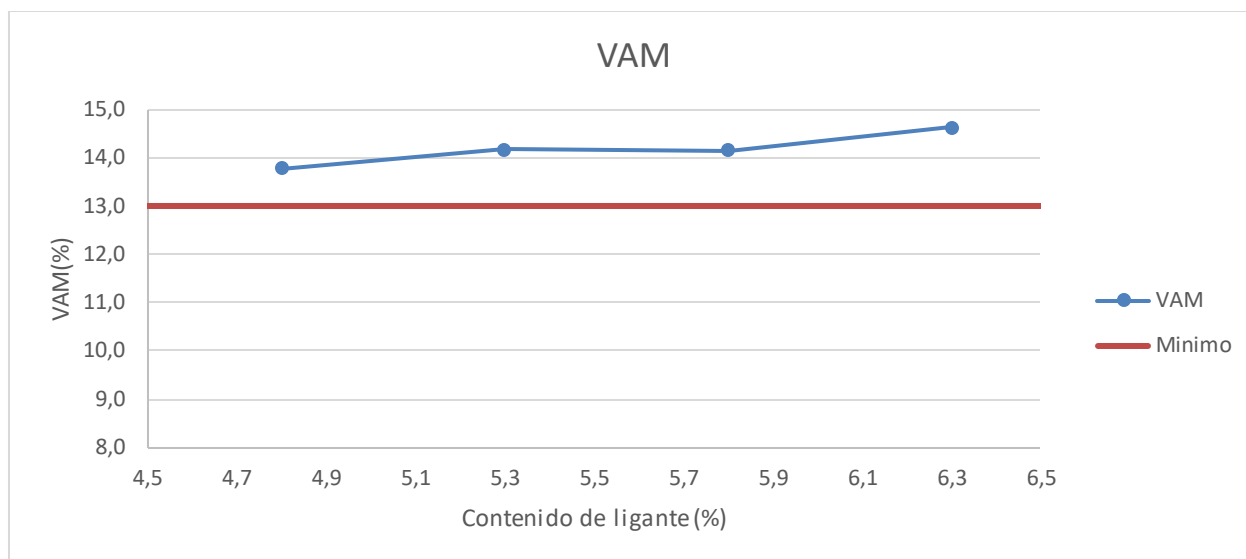


Gráfico 3-4. Vacíos en el agregado mineral a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

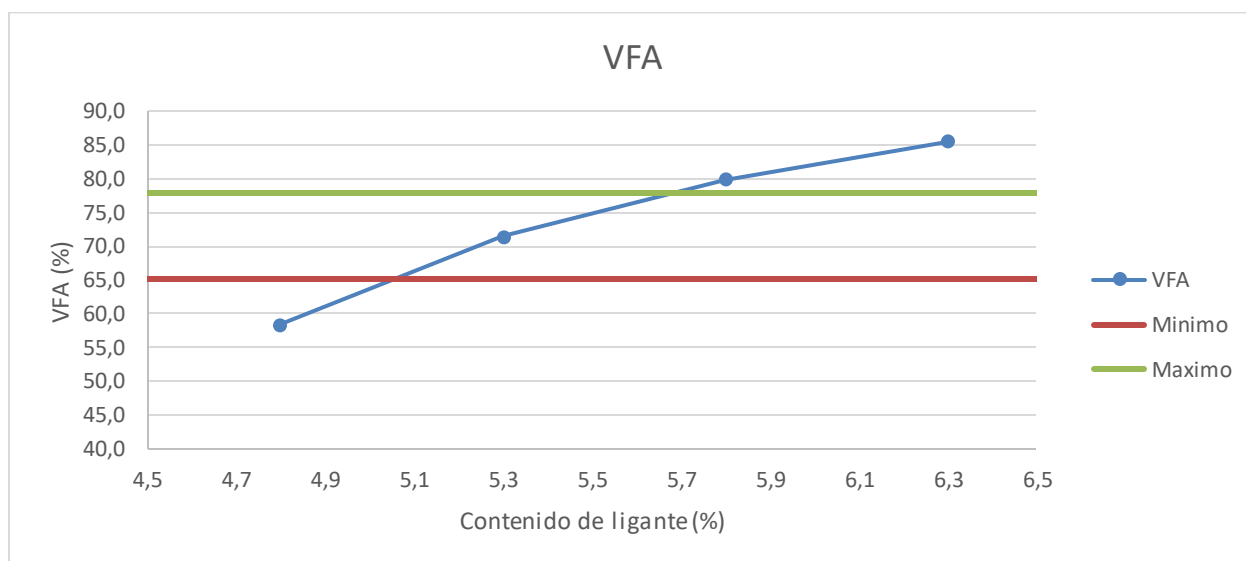


Gráfico 3-5. Vacíos llenos con asfalto a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

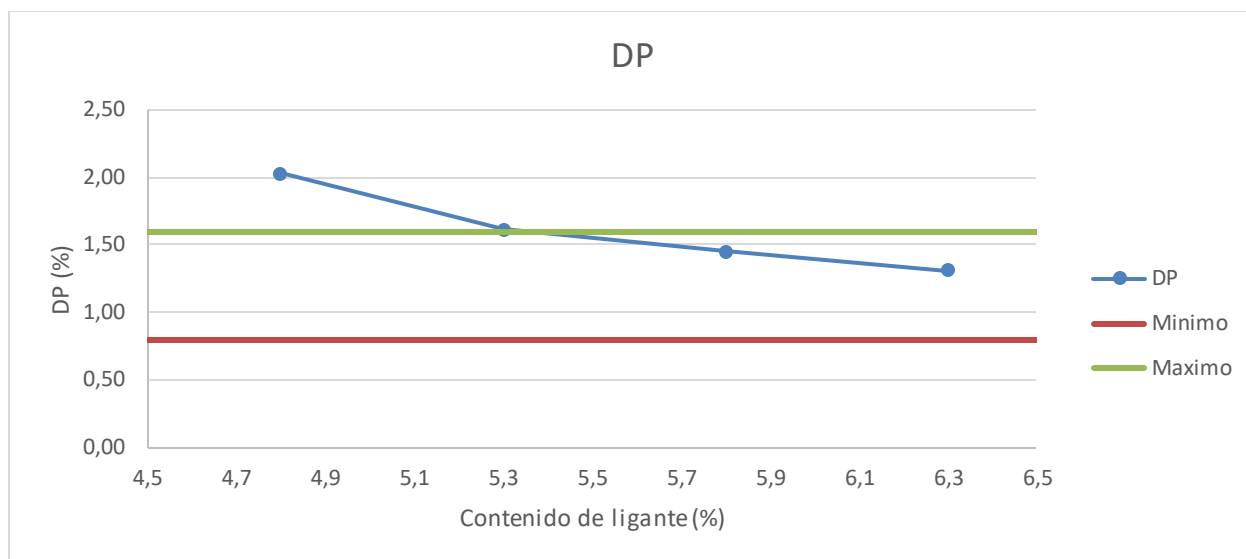


Gráfico 3-6. Proporción de polvo a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

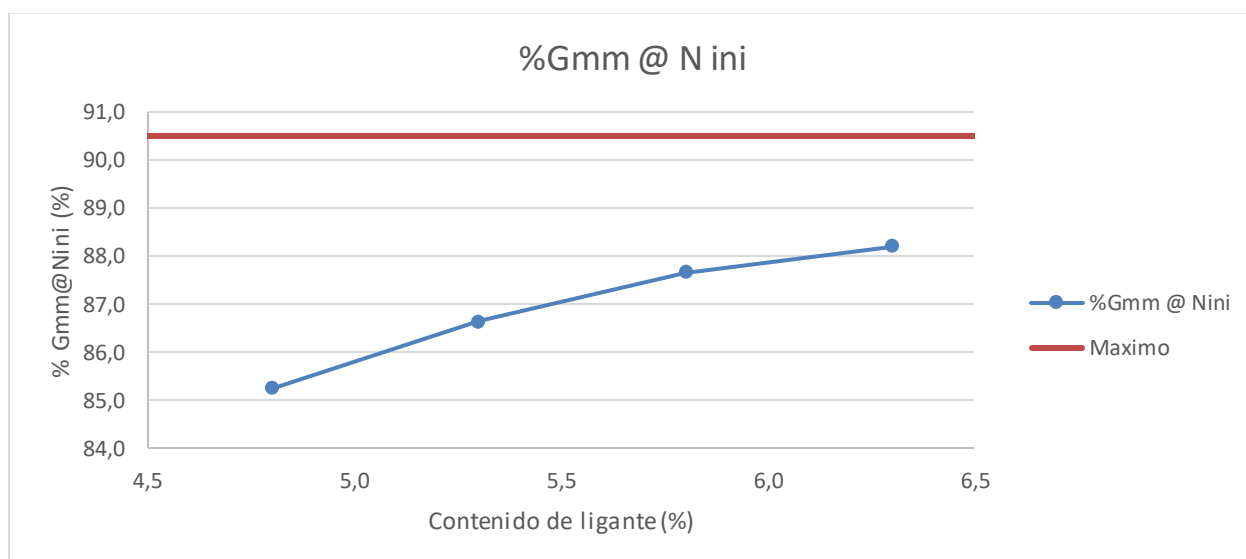


Gráfico 3-7. Porcentaje de densidad máxima para giros iniciales a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

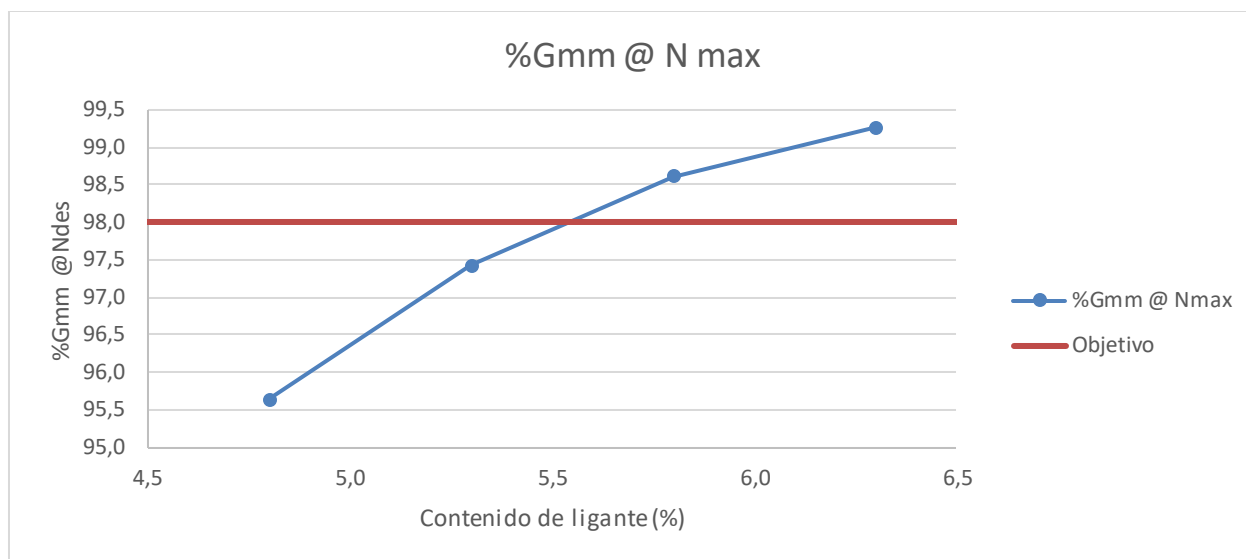


Gráfico 3-8. Porcentaje de densidad máxima para giros máximos a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que todos los criterios se cumplen para un 4% de vacíos de aire, las especificaciones técnicas del proyecto solicitan que se diseñe a un 3,5% de vacíos de aire, por lo cual se deben comprobar todas las propiedades anteriormente mencionadas para este porcentaje. Al utilizar las ecuaciones descritas en 2.4.4.7 se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 3-16. Propiedades estimadas para 3,5% de vacíos de aire.

Porcentaje de asfalto	5,5	Limite SUPERPAVE
Va	3,5	
VAM	14,2	>13
VFA	75,3	65-75
DP	1,5	0.8-1.6
%Gmm @ Nini	87,1	≤89
%Gmm @ Nmax	98,0	≤98

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3-16 se observa que se logra cumplir con los criterios SUPERPAVE para un porcentaje de vacíos de aire igual a 3,5%.

3.2 DISEÑO SUPERPAVE DE MEZCLAS CON RAP

Se ejecutan dos diseños de mezclas de asfalto en caliente con RAP, la primera considera 15% de RAP y la segunda 25% de RAP.

3.2.1 Tamizado del material.

Para estas mezclas se incorpora asfalto recuperado con una granulometría descrita tanto en la Tabla 3-17 como en el Gráfico 2-1 Gráfico 3-9.

Tabla 3-17 Porcentaje de material que pasa por cada tamiz.

Tamaño Tamiz ["]	Tipo de Árido			
	Gravilla 3/4	Gravilla 1/2	P. Roca	RAP
3/4	100	100	100	100
1/2	35	100	100	92
3/8	2	70	100	85
4	1	5	88	66
8	1	2	62	49
16	1	2	45	36
30	1	2	32	26
50	1	2	23	18
100	1	2	17	13
200	0.8	1.6	12.6	9

Fuente: Elaboración propia.

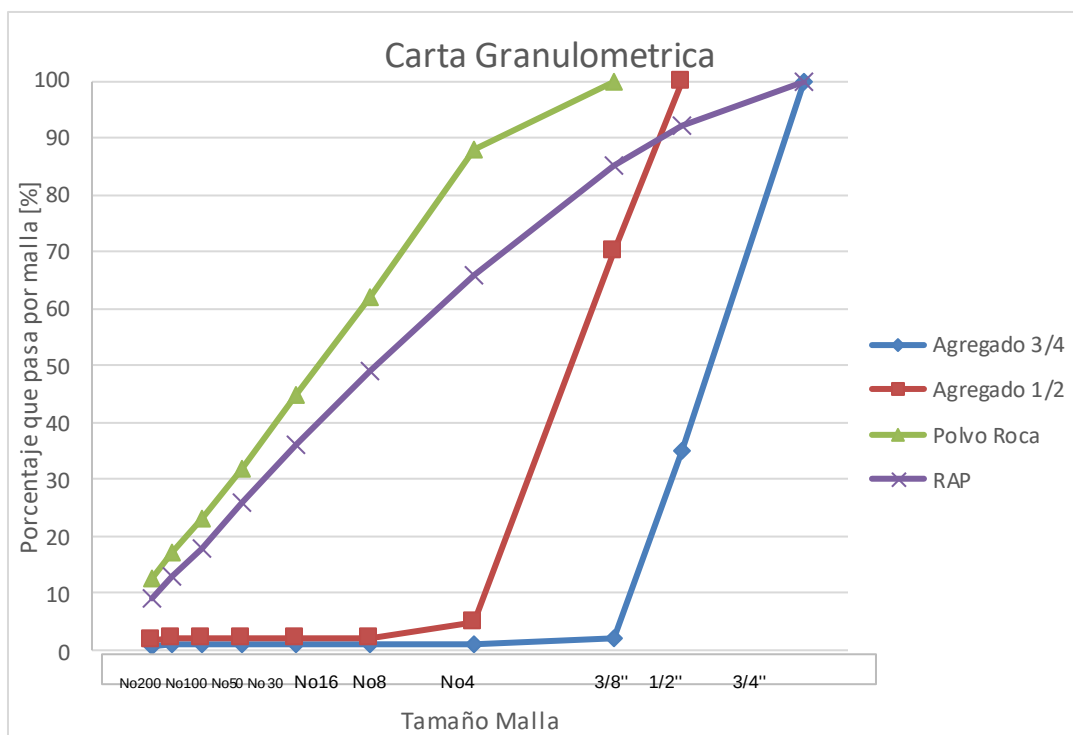


Gráfico 3-9. Carta granulométrica de los áridos que se utilizaran en el diseño de la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Propiedades de origen y consenso.

Primero es importante recalcar que para el RAP solo se ejecutan los siguientes ensayos:

- Angularidad del agregado grueso.
- Angularidad del agregado fino.
- Partículas planas y alargadas.

Estos resultados se presentan en la Tabla 3-18 y Tabla 3-19, en ellas se aprecia que todos los agregados cumplen con lo requerido por separado, por lo tanto, cualquier combinación de estos también lograra cumplir los limites especificados de acuerdo al método SUPERPAVE.

Tabla 3-18. Propiedades de origen pertenecientes a los agregados que se utilizaran en la confección de la mezcla.

Muestra	Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca	RAP	Límite
Angularidad del Agregado una cara fracturada [%]	97	100	-	98	>75
Angularidad del Agregado dos caras fracturadas [%]	94	99	-	95	-
Partículas planas y alargadas [%]	0	0,1	0	0,7	<10
Angularidad del Agregado Fino [%]	-	-	50,5	47	>40
Equivalente de Arena [%]	-	-	57	-	>40

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-19. Propiedades de consenso pertenecientes a los agregados que se utilizaran en la confección de la mezcla.

Muestra	Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca	RAP	Limite
Desgaste de Los Ángeles [%]	11,1	13,4	15,5	-	<40
Durabilidad [%]					
Desintegración por Sulfato de Sodio	3,5	3,4	-	-	<20
Desintegración por Sulfato de Magnesio	4,4	4,5	-	-	<20
Materiales Deletéreos [%]	0	0	0	-	<4

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Propiedades del Ligante.

El asfalto virgen fue sometido a una caracterización completa de la cual se concluyó que cumplía satisfactoriamente con un grado PG 76-28. En el caso del 15% de RAP se obtiene un grado PG equivalente a 76-28, mientras que en el caso del 25% se obtiene un grado PG 76-22. En el caso de la caracterización del RAP no fue posible establecer una temperatura baja a través del BBR, ya que este estaba demasiado envejecido y fallaba antes de -10 [°C], por lo que se creó una mezcla para cada caso, utilizando ligante asfáltico virgen y ligante asfáltico del RAP, obtenido a través recuperación de asfalto. Finalmente se realizó el ensayo de BBR a la mezcla anteriormente mencionada.

3.2.4 Mezclas de prueba.

En este caso se busca generar una granulometría lo más parecida a la obtenida para el diseño sin RAP, se utilizarán las siguientes combinaciones presentadas en Gráfico 3-11 y Gráfico 3-10:

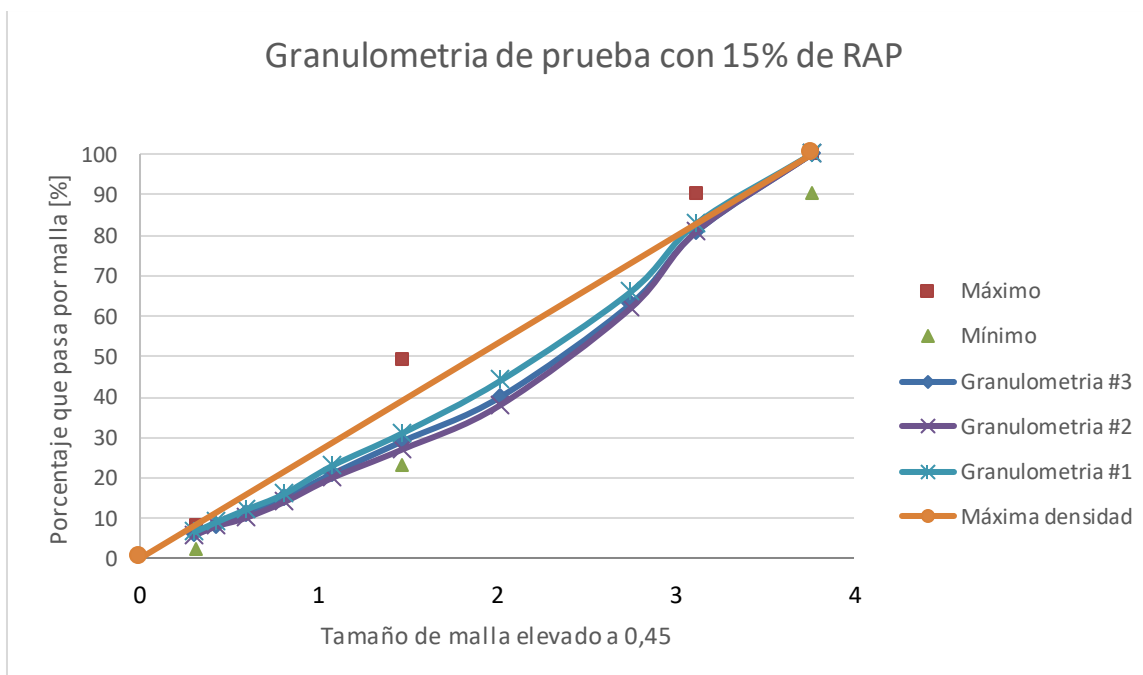


Gráfico 3-10. Carta granulométrica para mezclas de prueba con 15% de RAP. Fuente: Elaboración propia.

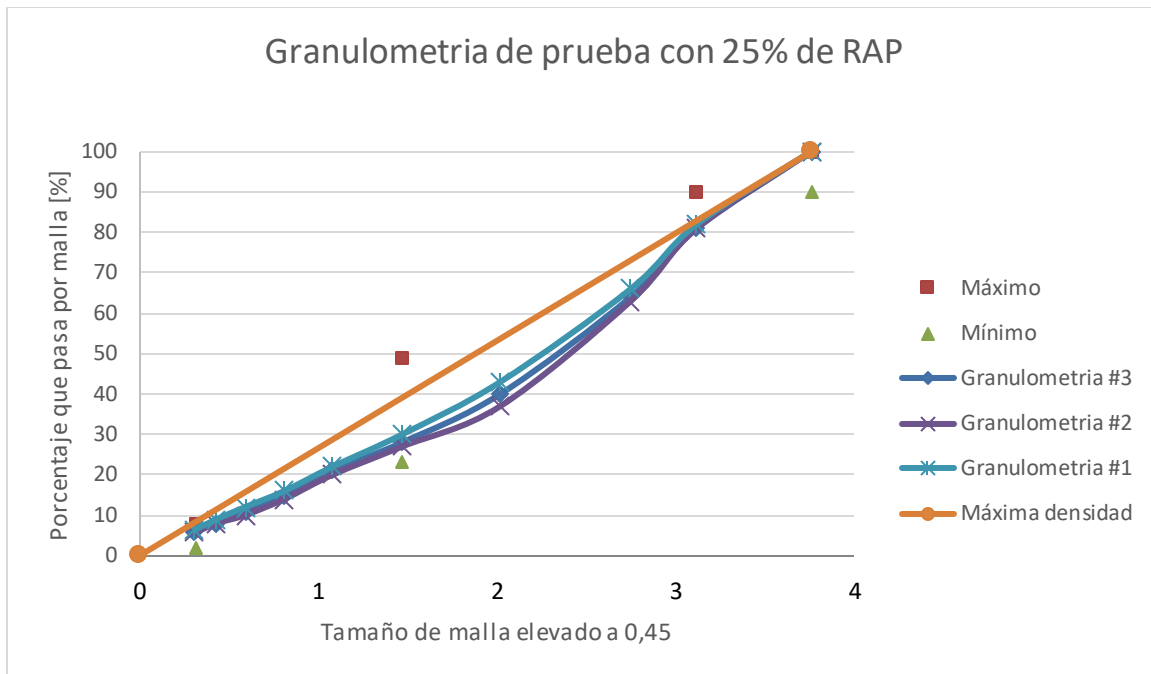


Gráfico 3-11. Carta granulométrica para mezclas de prueba con 25% de RAP. Fuente: Elaboración propia.

3.2.5 Límites SUPERPAVE para propiedades de origen y consenso referidas a la mezcla.

Como se presentó en el capítulo 3.2.2, todos los áridos cumplen individualmente con los requisitos, por lo que cualquier combinación también cumplirá con dichos parámetros.

3.2.6 Propiedades Volumétricas de las mezclas de prueba.

Para ver el detalle de las propiedades de mezclas de prueba referirse al anexo 4.4.

3.2.7 Mezclas de diseño 15% de RAP

Obtenida la granulometría a utilizar se confeccionan cuatro nuevas mezclas, una con el porcentaje óptimo de ligante asfáltico y otras con: -0,5%, +0,5% y +1% respecto al valor anteriormente mencionado. Cabe destacar que las cantidades de ligante a utilizar y la cantidad de mezclas quedan a criterio del diseñador, en este caso se decidió la configuración descrita.

3.2.7.1 Contenido de ligante

Se utilizan dos probetas por cada contenido de ligante cuya configuración corresponde a la siguiente:

Tabla 3-20. Contenido de ligante de mezclas de diseño

Numero de probeta	Probetas 1 y 2	Probetas 3 y 4	Probetas 5 y 6	Probeta 7 y 8
Porcentaje de asfalto	5,2	4,7	5,7	6,2

Fuente: Elaboración propia.

3.2.7.2 Densidades de las mezclas

A continuación, en la Tabla 3-21 se presenta el cuadro que resume las densidades obtenidas de cada probeta luego de utilizar el compactador giratorio, así como del porcentaje respecto a la gravedad máxima para cada uno de los giros.

Tabla 3-21. Densidades para cada mezcla de diseño.

Probeta N°	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
$G_{mb}@N_{dis}$ [g/cm ³]	2,396	2,412	2,395	2,393	2,399	2,393	2,410	2,399
G_{mm} [g/cm]	2,505		2,516		2,465		2,455	
N_{ini}	85,7		85,5		86,7		87,3	
N_{des}	96		95,4		97,2		97,9	
N_{max}	96,7		97,4		98,7		99,2	

Fuente: Elaboración propia.

3.2.7.3 Resultados de propiedades volumétricas para cada mezcla

Primero se presenta en la Tabla 3-22 el resumen de cada propiedad junto con el criterio SUPERPAVE que deben cumplir, luego gráficos (3-12 al 3-17) para comprender mejor que ocurre en a medida que se modifica la cantidad de ligante.

Tabla 3-22. Requisitos SUPERPAVE

Porcentaje de asfalto	4,7	5,2	5,7	6,2	Limite SUPERPAVE
Va	4,6	4,0	2,8	2,1	4
VAM	13,5	13,4	13,9	14,0	>13
VFA	65,7	69,9	79,9	85,3	65-75
DP	1,7	1,6	1,4	1,3	0.8-1.6
% G_{mm} @ N_{ini}	85,5	85,7	86,7	87,3	≤89
% G_{mm} @ N_{max}	96,7	97,4	98,7	99,2	≤98

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que para un 5,2% de ligante se cumplen todos los criterios SUPERPAVE. A continuación, se presentan los gráficos para cada criterio.

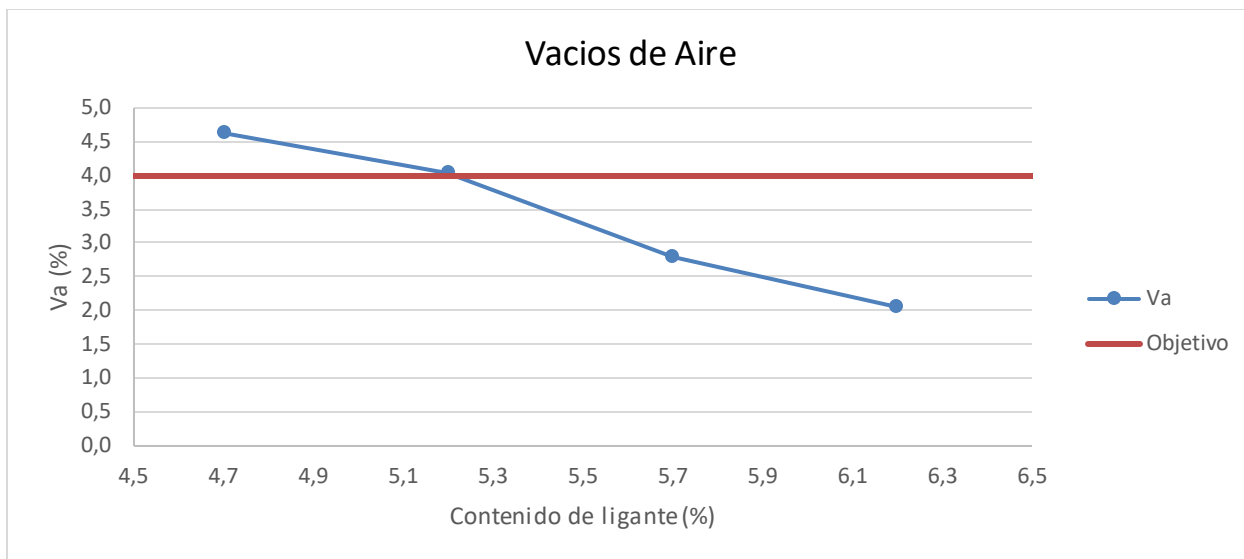


Gráfico 3-12. Vacíos de aire a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

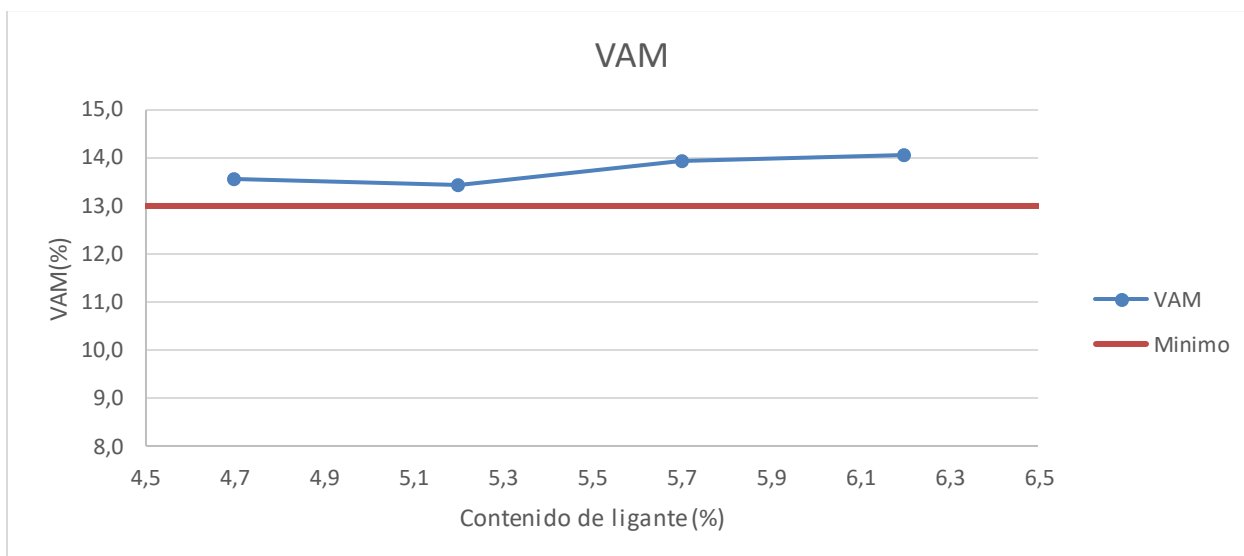


Gráfico 3-13. Vacíos en el agregado mineral a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

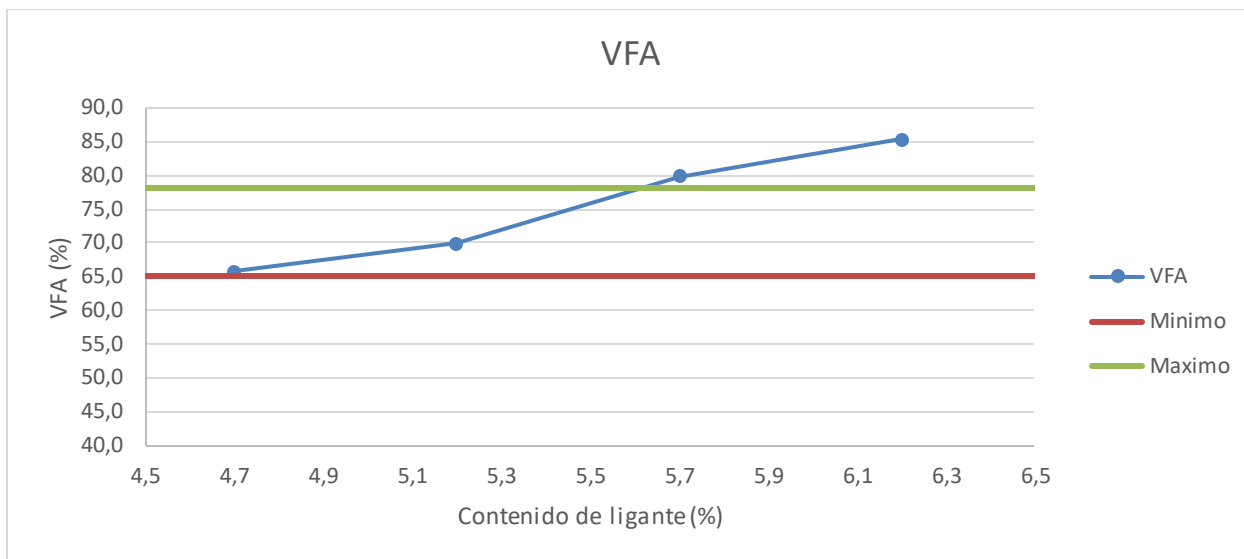


Gráfico 3-14. Vacíos llenos con asfalto a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

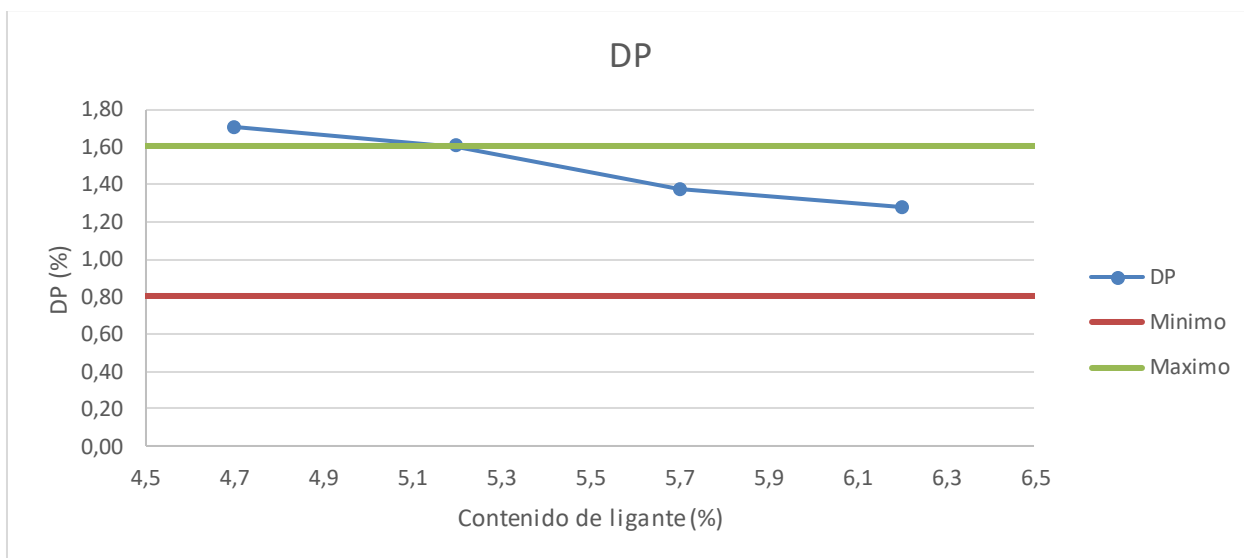


Gráfico 3-15. Proporción de polvo a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

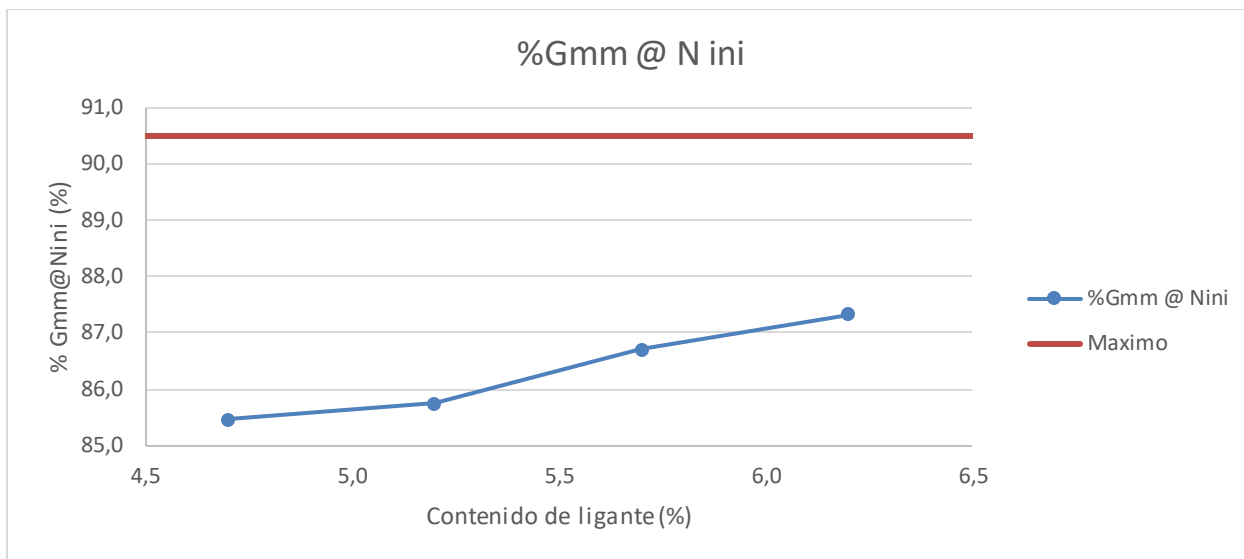


Gráfico 3-16. Porcentaje de densidad máxima para giros iniciales a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

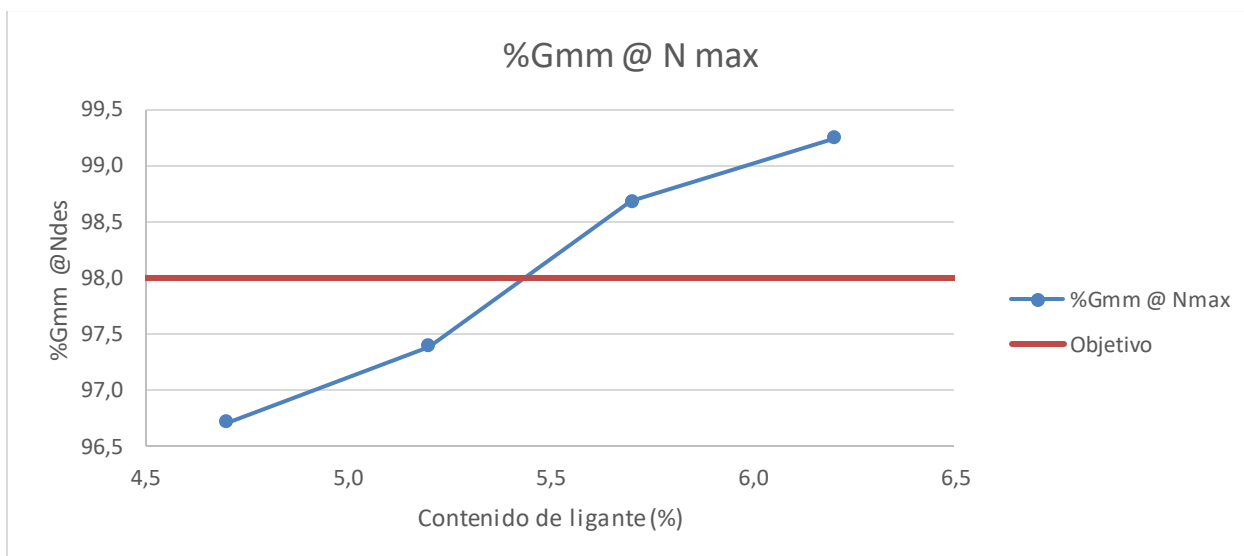


Gráfico 3-17. Porcentaje de densidad máxima para giros máximos a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que todos los criterios se cumplen para un 4% de vacíos de aire, las especificaciones técnicas del proyecto solicitan que se diseñe a un 3.5% de vacíos de aire, por lo cual se deben comprobar todas las propiedades anteriormente mencionadas para este porcentaje. Luego de utilizar las ecuaciones descritas en 2.4.4.7 se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3-23. Propiedades estimadas para 3,5% de vacíos de aire.

Porcentaje de asfalto	5,4	Limite SUPERPAVE
Va	3,5	
VAM	13,7	>13
VFA	74,4	65-75
DP	1,5	0.8-1.6
%G _{mm} @ N _{ini}	86,1	≤89
%G _{mm} @ N _{max}	98,0	≤98

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3-16 se aprecia que se logra cumplir con los criterios SUPERPAVE para un porcentaje de vacíos de aire igual a 3,5%.

3.2.8 Mezclas de diseño 25% de RAP

Obtenida la granulometría a utilizar se confeccionan cuatro nuevas mezclas, una con el porcentaje óptimo de ligante asfáltico y otras con: -0,5%, +0,5% y +1% respecto al valor anteriormente mencionado. Cabe destacar que las cantidades de ligante a utilizar y la cantidad de mezclas quedan a criterio del diseñador, en este caso se decidió la configuración descrita.

3.2.8.1 Contenido de ligante

Se utilizan dos probetas por contenido de ligante, la configuración corresponde a la siguiente.

Tabla 3-24. Contenido de ligante de mezclas de diseño

Numero de probeta	Probetas 1 y 2	Probetas 3 y 4	Probetas 5 y 6	Probeta 7 y 8
Porcentaje de asfalto	5,1	4,6	5,6	6,1

Fuente: Elaboración propia.

3.2.8.2 Densidades de las mezclas

A continuación, se presenta el cuadro que resume las densidades obtenidas de cada probeta luego de utilizar el compactador giratorio, así como del porcentaje respecto a la gravedad máxima para cada uno de los giros.

Tabla 3-25. Densidades para cada mezcla de diseño.

Probeta N°	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
G _{mb} @N _{dis} [g/cm³]	2,378	2,373	2,355	2,393	2,404	2,367	2,374	2,375
G _{mm} [g/cm]	2,502		2,491		2,470		2,448	
N _{ini}	84,8		85		82,9		86,5	
N _{des}	94,9		95,3		96,6		97,2	
N _{max}	96,4		96,7		98		98,8	

Fuente: Elaboración propia.

3.2.8.3 Resultados de propiedades volumétricas para cada mezcla

Primero se presenta el resumen de cada propiedad junto con el criterio SUPERPAVE que deben cumplir en la Tabla 3-26 y Tabla 3-28, luego gráficos (3-18 al 3-23) que representan lo que ocurren respecto de las propiedades volumétricas a medida que se modifica la cantidad de ligante.

Tabla 3-26. Requisitos SUPERPAVE

Porcentaje de asfalto	4,6	5,1	5,6	6,1
Va	5,1	4,7	3,4	2,8
VAM	13,7	14,2	14,2	14,9
VFA	63,1	67,0	76,2	81,5
DP	1,7	1,5	1,4	1,2
%G_{mm} @ N_{ini}	84,8	85,0	86,1	86,5
%G_{mm} @ N_{max}	96,4	96,7	98,0	98,8

Fuente: Elaboración propia.

Al observar la Tabla 3-26 se puede comprobar que para este caso no se cumple con un 4% de vacíos de aire con los contenidos de asfalto seleccionados, por lo que se deben utilizar las ecuaciones señaladas en 2.4.4.7, con lo que se obtiene el siguiente punto:

Tabla 3-27 Propiedades estimadas para 4% de vacíos de aire.

Porcentaje de asfalto	5,4
Va	4,0
VAM	14,2
VFA	71,8
DP	1,4
%G_{mm} @ N_{ini}	85,6
%G_{mm} @ N_{max}	97,4

Fuente: Elaboración propia.

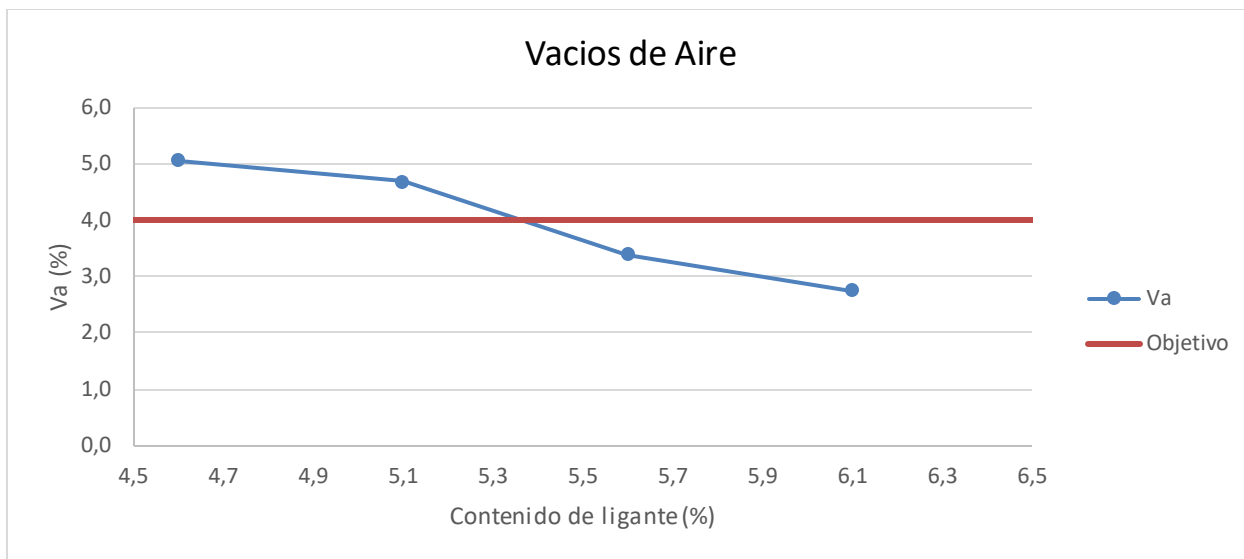


Gráfico 3-18. Vacíos de aire a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

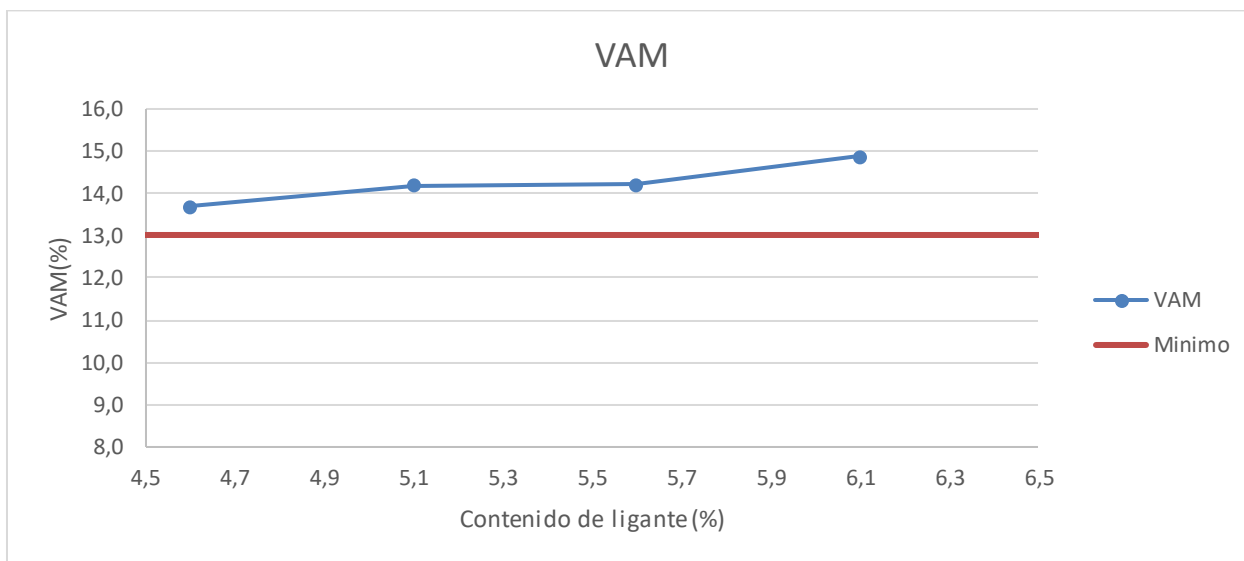


Gráfico 3-19. Vacíos en el agregado mineral a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

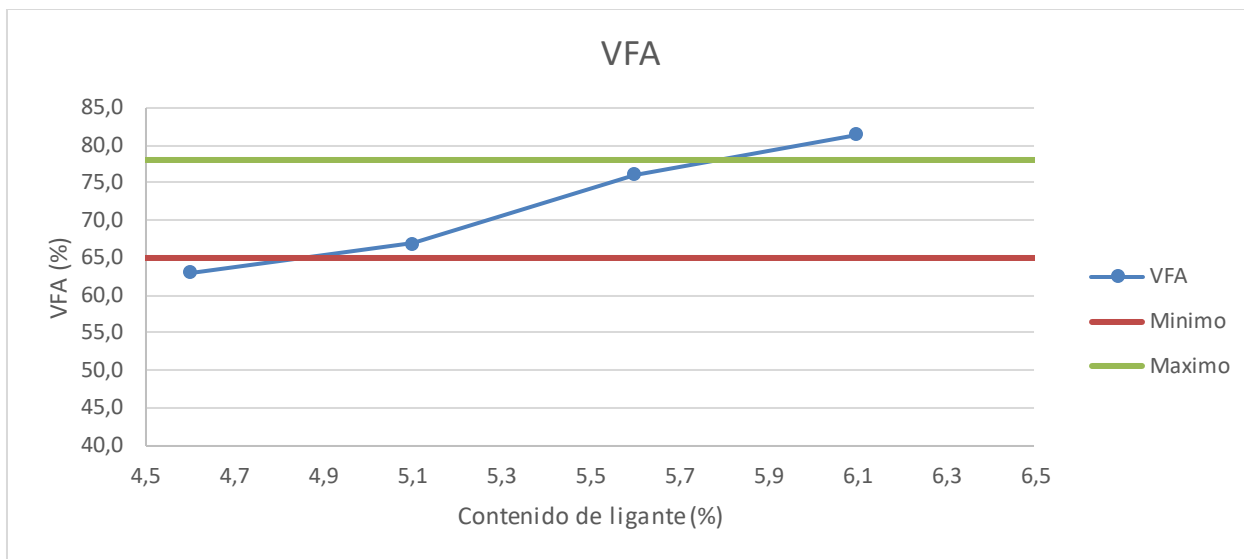


Gráfico 3-20. Vacíos llenos con asfalto a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

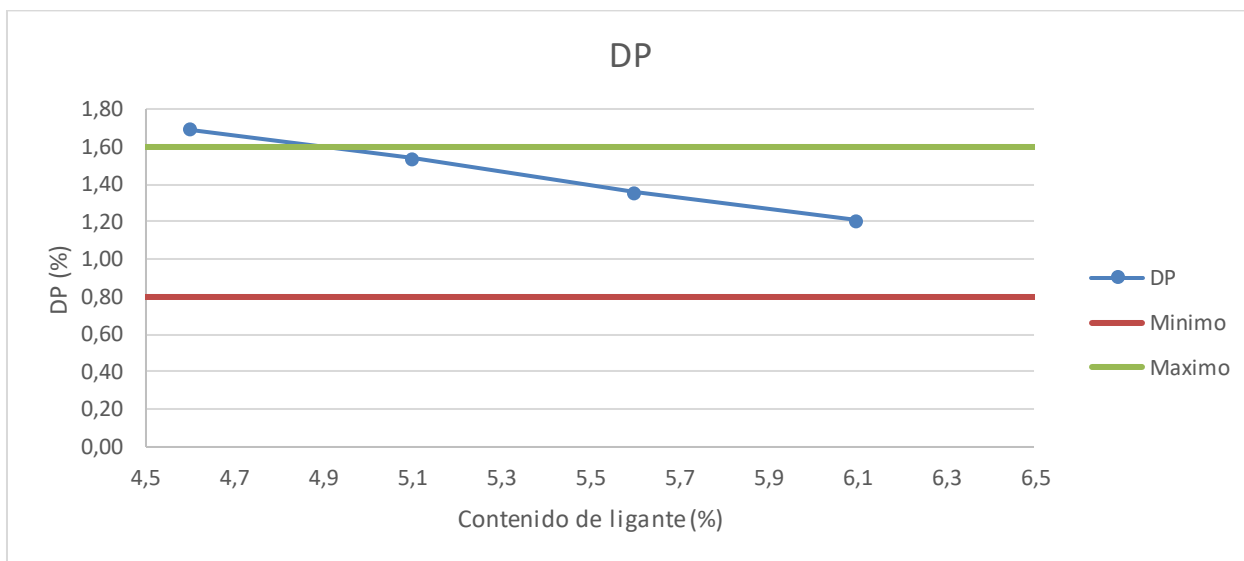


Gráfico 3-21. Proporción de polvo a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

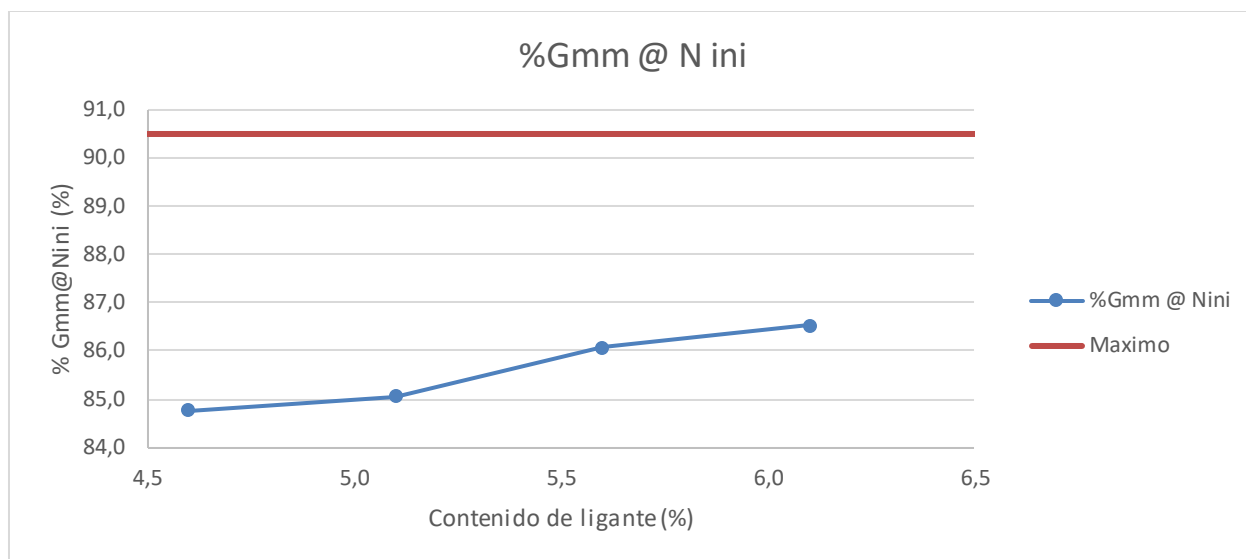


Gráfico 3-22. Porcentaje de densidad máxima para giros iniciales a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

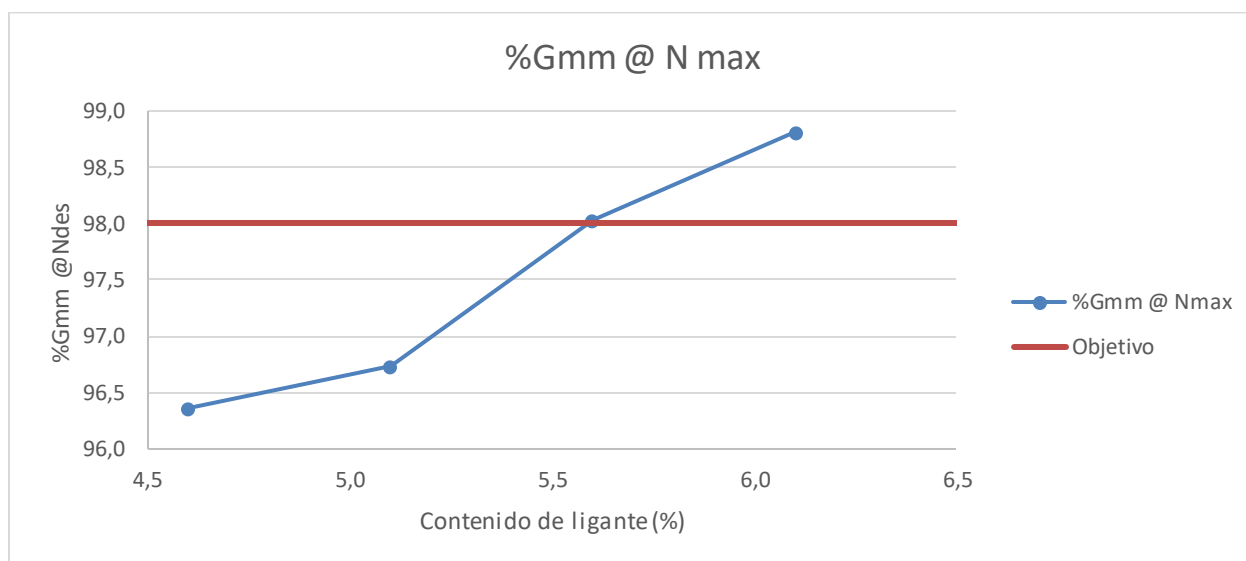


Gráfico 3-23. Porcentaje de densidad máxima para giros máximos a distintos contenidos de ligante. Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que todos los criterios se cumplen para un 4% de vacíos de aire, las especificaciones técnicas del proyecto solicitan que se diseñe a un 3.5% de vacíos de aire, por lo cual se deben comprobar todas las propiedades anteriormente mencionadas para este porcentaje. Con este objeto se aplicaron las ecuaciones descritas en 2.4.4.7 se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3-28. Propiedades estimadas para 3,5% de vacíos de aire.

Porcentaje de asfalto	5,6
Va	3,5
VAM	14,1
VFA	75,18
DP	1,37
%G_{mm} @ N_{ini}	86,1
%G_{mm} @ N_{max}	97,9

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3-28 se aprecia que se logra cumplir con los criterios SUPERPAVE para un porcentaje de vacíos de aire igual a 3,5%.

3.3 TSR

Se utiliza compactador giratorio para hacer las probetas. Las probetas compactadas tienen un diámetro de 150 [mm] y altura de 62,5 [mm]. Cabe destacar que las probetas fueron envejecidas a corto plazo, es decir, se les sometió 135[°C] durante cuatro horas, previo a la compactación. La carga fue aplicada a una deformación constante de 50 [mm/min].

3.3.1 Resultados TSR Aeropuerto (0%de RAP).

Los resultados se observan en la Tabla 3-29.

Tabla 3-29. Resumen ensayo TSR Aeropuerto.

	PROBETAS SIN ACONDICIONAR			PROBETAS ACONDICIONADAS		
Resistencia seca [kPa]	602.0	615.2	589.1	No Aplica		
Resistencia húmeda [kPa]	No Aplica			513.9	527.4	519.8
TSR	86.4					

Fuente: Elaboración propia.

Usualmente se considera como aceptable lograr un TSR superior a 80% y una resistencia superior a 280 [kPa] en el grupo acondicionado, ambos criterios se cumplen en la mezcla propuesta.

3.3.2 Resultados TSR 15% RAP.

Tabla 3-30. Resumen ensayo TSR 15% de RAP.

	PROBETAS SIN ACONDICIONAR			PROBETAS ACONDICIONADAS		
Resistencia seca [kPa]	747.1	641.7	650.9	No Aplica		
Resistencia húmeda [kPa]	No Aplica			610.9	617.1	590.0
TSR	89.1					

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Resultados TSR 25% RAP.

Tabla 3-31. Resumen ensayo TSR 15% de RAP.

	PROBETAS SIN ACONDICIONAR			PROBETAS ACONDICIONADAS		
Resistencia seca [kPa]	651.7	592.1	620.0	No Aplica		
Resistencia húmeda [kPa]	No Aplica			547.4	557.5	566.0
TSR	89.7					

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Comentario de Resultados.

En los casos en el que existe presencia de RAP se aprecia un aumento en la resistencia, tanto húmeda como seca, respecto del caso original, ello se puede explicar en parte debido al grado de envejecimiento del RAP utilizado. También es importante resaltar que el aumento del TSR es característico de mezclas con RAP en dichos porcentajes.

3.4 RUEDA DE HAMBURGO

Se utiliza compactador giratorio para hacer las probetas. Las probetas compactadas tienen un diámetro de 150 [mm] y altura de 140 [mm]. Cabe destacar que las probetas fueron envejecidas a corto plazo, es decir a 135[°C] por cuatro horas, previo a la compactación.

Luego de ser compactadas las probetas son cortadas para alcanzar una altura de 62 [mm] y luego rectificadas. El ensayo se realiza a 50 [°C].

3.4.1 Resultados Hamburgo Aeropuerto (0% de RAP).

Tabla 3-32. Resumen de resultado para ensayo Rueda de Hamburgo mezcla aeropuerto.

Espécimen	Numero de Pasadas		Ahuellamiento [mm]	Ahuellamiento [%]	Razón de Ahuellamiento [mm/1000 n]
	Realizadas	Fin de la prueba			
Probeta 1	20000	20000	2.43	4.9	0.056
Probeta 2	20000	20000	1.98	4	0.032
Promedio	20000	20000	2.21	4.4	0.044

Fuente: Elaboración propia.

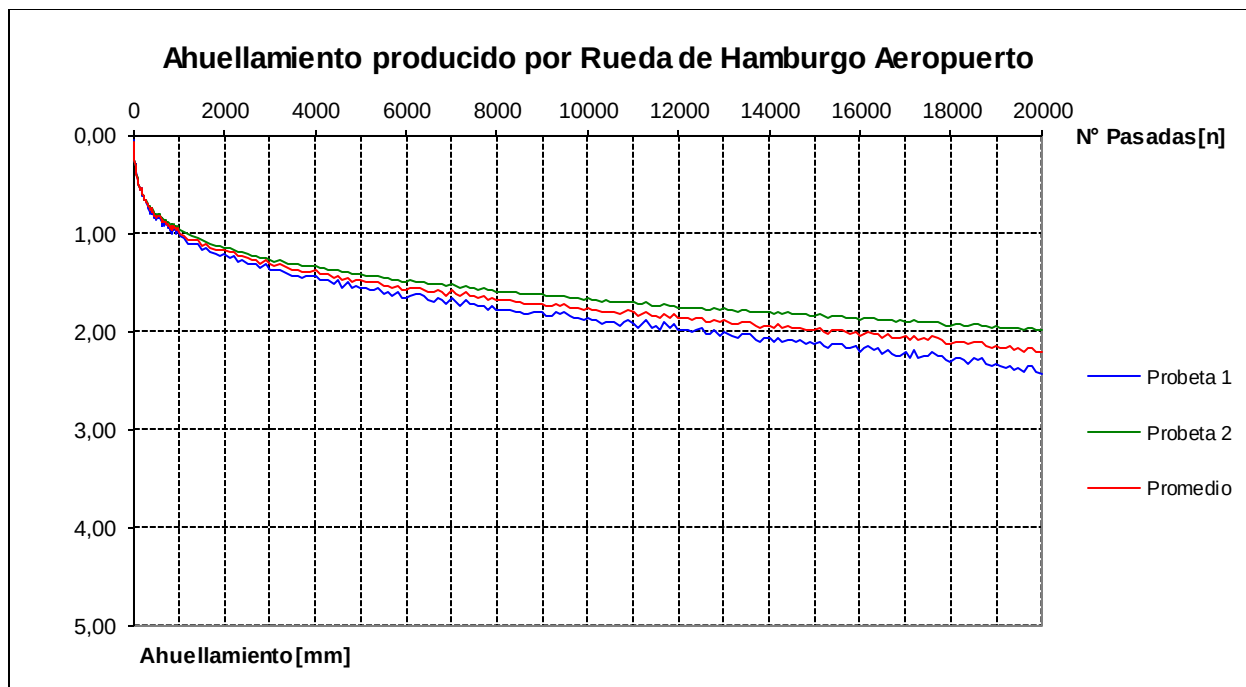


Gráfico 3-24. Profundidad de ahuellamiento a lo largo del ensayo Rueda de Hamburgo mezcla aeropuerto. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Resultados Hamburgo 15% de RAP.

Tabla 3-33. Resumen de resultado para ensayo Rueda de Hamburgo mezcla 15% RAP.

Espécimen	Numero de Pasadas		Ahuellamiento [mm]	Ahuellamiento [%]	Razón de Ahuellamiento [mm/1000 n]
	Realizadas	Fin de la prueba			
Probeta 1	20000	20000	1.28	2.6	0.016
Probeta 2	20000	20000	1.31	2.6	0.017
Promedio	20000	20000	1.3	2.6	0.017

Fuente: Elaboración propia.

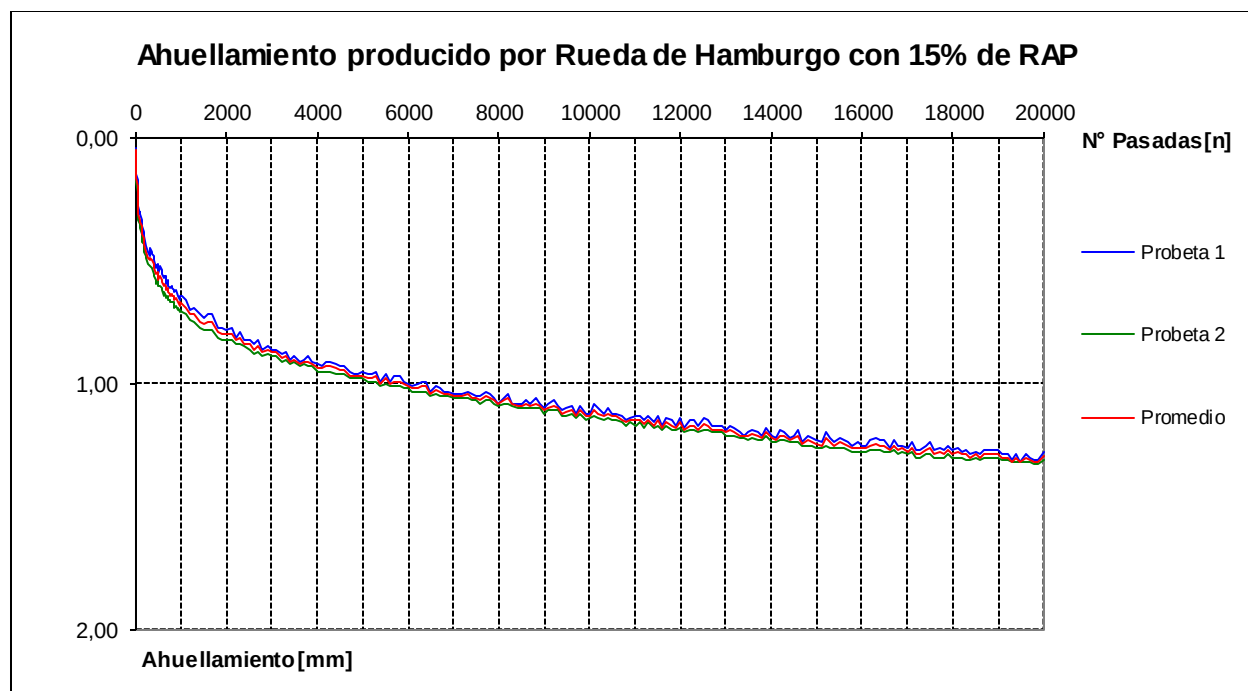


Gráfico 3-25. Profundidad de ahuellamiento a lo largo del ensayo Rueda de Hamburgo mezcla aeropuerto. Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Resultados Hamburgo 25% de RAP.

Tabla 3-34. Resumen de resultado para ensayo Rueda de Hamburgo mezcla 15% RAP.

Espécimen	Numero de Pasadas		Ahuellamiento [mm]	Ahuellamiento [%]	Razón de Ahuellamiento [mm/1000 n]
	Realizadas	Fin de la prueba			
Probeta 1	20000	20000	1.5	3	0.021
Probeta 2	20000	20000	1.74	3.5	0.025
Promedio	20000	20000	1.62	3.2	0.023

Fuente: Elaboración propia.

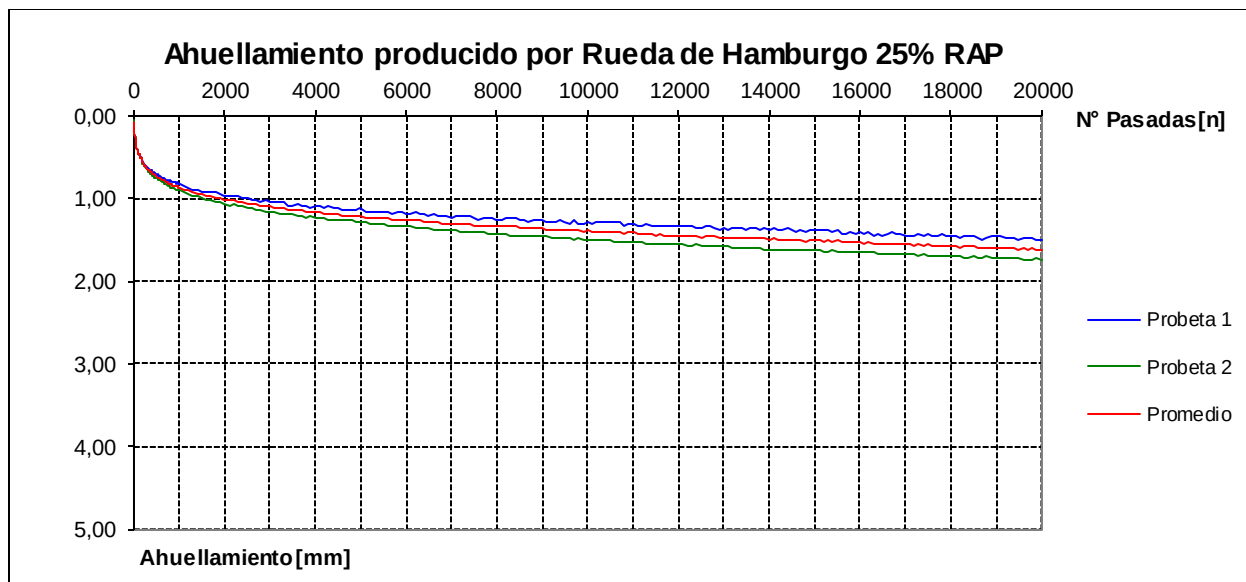


Gráfico 3-26. Profundidad de ahuellamiento a lo largo del ensayo Rueda de Hamburgo mezcla aeropuerto. Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Comentario de Resultados.

Se puede observar que tanto en todos los casos el ensayo no logra llegar al punto de inflexión de la curva, lo que señala que la mezcla no debería tener problemas de sensibilidad frente a la humedad, por otra parte, se aprecia una mejora en los casos que contienen RAP respecto al ahuellamiento.

3.5 RIGIDEZ

Se utiliza compactador giratorio para hacer las probetas. Las probetas compactadas tienen un diámetro de 150 [mm] y altura de 135 [mm]. Cabe destacar que las probetas fueron envejecidas a corto plazo, es decir a 135 [°C] por cuatro horas, previo a la compactación.

Luego de ser compactadas las probetas son cortadas para alcanzar una altura de 60 [mm] y luego rectificadas. Las probetas se cargan en ejes perpendiculares, cada probeta se carga al menos una vez en cada eje. El ensayo se realiza a 15 [°C], existe un ensayo adicional realizado a 32 [°C] por requisito del mandante, sin embargo, esta temperatura no se considera en el estudio de RAP. Se decide utilizar un vacío de $4 \pm 1\%$.

3.5.1 Resultados Rigidez Aeropuerto.

Tabla 3-35. Módulo de rigidez aeropuerto a 15 [°C].

Módulo de rigidez a 15 [°C]	
Espécimen	Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]
Probeta 1-1	6338
Probeta 1-2	6414
Probeta 2-1	7141
Probeta 2-2	6228

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-36. Módulo de rigidez aeropuerto a 32 [°C].

Módulo de rigidez a 32 [°C]	
Espécimen	Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]
Probeta 1-1	1431
Probeta 1-2	1417
Probeta 2-1	1413
Probeta 2-2	1508

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Resultados Rigidez 15% de RAP.

Tabla 3-37. Módulo de rigidez 15% de RAP a 15 [°C].

Módulo de rigidez a 15 [°C]	
Espécimen	Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]
Probeta 1-1	10407
Probeta 1-2	8909
Probeta 2-1	9625
Probeta 2-2	9294

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Resultados Rigidez 25% de RAP.

Tabla 3-38. Módulo de rigidez 25% de RAP a 15 [°C].

Módulo de rigidez a 15 [°C]	
Espécimen	Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]
Probeta 1-1	8840
Probeta 1-2	8925
Probeta 2-1	8855
Probeta 2-2	8741

Fuente: Elaboración propia.

3.5.4 Comentario de resultados.

Se puede observar un claro aumento de la rigidez al incorporar RAP a la mezcla, es importante tener en cuenta que este ensayo no es un buen indicador de desempeño.

Un resultado poco común se observa al comparar las mezclas de 15% de RAP y 25% de RAP, en teoría la rigidez debió haber sido mayor en el último caso, sin embargo, esto no ocurrió, esta situación se repite en otros ensayos que miden la rigidez. Una posible explicación podría ser que el manual indica que los agregados deben calentarse a mayor temperatura a medida que se utiliza mayor cantidad de RAP, lo que puede haber dañado el material. Otra explicación es que al aumentar el porcentaje de RAP utilizado no se logra una buena interfaz entre el material reciclado y el ligante asfáltico virgen.

3.6 FATIGA

Se utiliza compactador de rodillo para hacer las probetas. Las probetas compactadas son prismas de dimensiones 500 [mm] x 180 [mm] x 90 [mm]. Luego se cortan para lograr las siguientes dimensiones: 380 [mm] x 64 [mm] x 52 [mm]. Cabe destacar que las probetas fueron envejecidas a corto plazo, es decir a 135[°C] por cuatro horas, previo a la compactación. Se decide utilizar un vacío de $6.5 \pm 0.5\%$.

Los parámetros de entrada utilizados en el ensayo son los siguientes:

Tabla 3-39. Parámetros de entrada para ensayo de fatiga.

Frecuencia	10 [Hz]
Deformación Aplicada	500 [$\mu\epsilon$]
Temperatura	20 [°C]
Rigidez Objetivo	50%

Fuente: Elaboración propia.

Se elige una deformación de N500, debido a que la pista, y en particular la capa de rodadura se encuentra sometida a grandes cargas que a su vez producen deformaciones importantes, por lo que una deformación de 500 [$\mu\epsilon$] representa el fenómeno de mejor forma.

3.6.1 Fatiga Aeropuerto (0% de RAP).

Tabla 3-40. Fatiga Aeropuerto.

Probeta	V _a [%]	S _i [MPa]	N _f [ciclos]	Promedio N _f
P1	6.7	2546	12219	15350
P2	6.4	2979	17596	
P3	6.5	2745	16234	

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Fatiga 15% de RAP.

Tabla 3-41. Fatiga 15% de RAP.

Probeta	V _a [%]	S _i [MPa]	N _f [ciclos]	Promedio N _f
P1	6.6	4452	9066	7919
P2	6.5	4529	6090	
P3	6.6	4470	8600	

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3 Fatiga 25% de RAP.

Tabla 3-42. Fatiga 25% de RAP.

Probeta	V _a [%]	S _i [MPa]	N _f [ciclos]	Promedio N _f
P1	6.3	4162	8122	7912
P2	6.7	3463	7935	
P3	6.8	3745	7680	

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4 Comentario de resultados.

Como es de esperar se aprecia una disminución en la cantidad de ciclos al aumentar la cantidad de RAP en la mezcla, esto debido a que la rigidez aumenta considerablemente. En el caso del 15% uno de los datos se escapa más de un 20% respecto del promedio, de no ser considerado el promedio tendría un valor de 8833, lo que daría un resultado más lógico en cuanto a la diferencia entre el 15% de RAP y el 25% de RAP.

4 ANALISIS DE RESULTADOS

Se comparan los resultados obtenidos con otros estudios de carácter similar, recaudados a través de revisión bibliográfica.

4.1 TSR

Para este ensayo se utilizan los datos del primer proyecto ejecutado mediante diseño SUPERPAVE, licitado por la DAP (Loyola, 2016).

Tabla 4-1 Resultados de distintos ensayos TSR

Casos	Resistencia Seca	Resistencia Húmeda	TSR	Grado PG	Contenido de Ligante	V _a
Aeropuerto 0% RAP	602.1	520.3	86.4	76-28	5.3	6.5
Aeropuerto 15% RAP	679.9	606	89.1	76-28	5.2	6.9
Aeropuerto 25% RAP	621.3	556.96	89.7	76-22	5.4	6.8
Camila Loyola 0% RAP	689.5	652.1	94.6	82-22	5.4	6.8

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4-1 muestra el resumen del TSR para distintos casos.

Lo primero es notar que el asfalto utilizado no presentaba el mismo grado PG, por lo que se puede observar que los resultados obtenidos en el diseño actual no son tan buenos como los obtenidos en el diseño citado. Sin embargo, su valor es bastante próximo. Por otra parte, se puede observar que existe una relación directamente proporcional entre la cantidad de RAP y el valor TSR para los casos estudiados se comporta así.

Los resultados obtenidos en este trabajo son considerados aceptables ya que cumplen con el mínimo recomendado de 80% de TSR y una resistencia superior a 280 [kPa] en el grupo acondicionado, criterio entregado en el capítulo 9.3.1.4 de la guía de diseño MS-2 (Asphalt Institute, 2014).

El TSR obtenido en los resultados presenta una tendencia similar al estudiado en el marco teórico, en la publicación titulada “Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials” (Dharamveer Singh, 2017). Esto no ocurre en el caso de los valores de resistencia seca y húmeda, sin embargo, la cantidad de porcentajes estudiados en la presente memoria no son suficientes para concluir al respecto.

4.2 RUEDA DE HAMBURGO

Para este ensayo se utilizan los datos del primer proyecto ejecutado mediante diseño SUPERPAVE, licitado por la DAP (Loyola, 2016) junto con una experiencia anterior de RAP.

Tabla 4-2. Resultados de distintos ensayos de Rueda de Hamburgo.

Casos Estudiados	Ahuellamiento Promedio 20000 pasadas [mm]	Grado PG	Contenido de Ligante	V _a
Aeropuerto 0% RAP	2.21	76-28	5.3	6,9
Aeropuerto 15% RAP	1.3	76-28	5.2	6,6
Aeropuerto 25% RAP	1.62	76-22	5.4	6,3
Camila Loyola 0% RAP	1.24	82-22	5.4	6.8

Fuente: Elaboración propia.

En el presente estudio se comprobó que existe una respuesta positiva en la disminución del ahuellamiento a medida que se incrementa el porcentaje de RAP Tabla 4-2, esto concuerda con la bibliografía estudiada. Sin embargo, estos resultados muestran un menor desempeño respecto a los logrados por (Loyola, 2016), lo que podría explicarse en parte al ligante utilizado en el ensayo antes mencionado. Pero los resultados obtenidos en este estudio son bastantes cercanos a los de (Loyola, 2016), a medida que se incrementa la participación de RAP.

4.3 RIGIDEZ

Para este ensayo se utilizan los datos del primer proyecto ejecutado mediante diseño SUPERPAVE, licitado por la DAP (Corona, 2017).

Tabla 4-3. Resultados de ensayo de rigidez.

Casos	Módulo de rigidez a 15 [°C]	Grado PG	Contenido de Ligante	V _a
Camila Corona 0% RAP	8884	82-22	5.4	4,0
Aeropuerto 0% de RAP	6530	76-28	5.3	3,8
Aeropuerto 15% de RAP	9559	76-28	5.2	4,5
Aeropuerto 25% de RAP	8840	76-22	5.4	4,1

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de rigidez obtenidos en este trabajo son muy similares a los presentados por (Corona, 2017), pese a que este último obtiene mayor rigidez debido a la diferencia de ligante base, sin embargo al adicionar RAP esta diferencia se anula, además se constata que la adición de RAP en la mezcla mejora la rigidez, como se observa en la Tabla 4-3.

Este parámetro se utiliza más que nada para caracterizar la mezcla, pero no es indicativo del desempeño que se obtendrá.

4.4 FATIGA

Para este ensayo se utilizan los datos del primer proyecto ejecutado mediante diseño SUPERPAVE licitado por la DAP (Vásquez, 2016)

Tabla 4-4. Resultados de ensayo de fatiga a 500 [με].

Casos	V _a	Ciclos	Grado PG	Contenido de Ligante
Andrés Vásquez 0% de RAP envejecimiento a Corto Plazo	3.6	24100	82-22	5.4
Aeropuerto 0% RAP	6.5	15350	76-28	5.2
Aeropuerto 15% RAP	6.6	7919	76-28	5.4
Aeropuerto 25% RAP	6.6	7912	76-22	5.4

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4-4 muestra los resultados obtenidos para el ensayo de fatiga, lo primero es destacar que como los demás ensayos todo se envejeció a corto plazo por lo que hace sentido utilizar un vacío de 7% que representa mejor la situación inicial que el vacío de 4% de diseño; ya que este último representa mejor la situación de envejecimiento a largo plazo.

Considerando lo anterior no es tan simple relacionar los resultados obtenidos entre los estudios debido a que la diferencia de vacíos de aire y el grado PG del ligante.

Los resultados muestran la importancia del ligante respecto al rendimiento de una mezcla ante la fatiga, y la existencia de una relación inversamente proporcional entre la cantidad de RAP utilizada y la resistencia a la fatiga.

5 CONCLUSIONES

Se logra satisfactoriamente crear mezclas mediante el método SUPERPAVE con y sin contenido de RAP. En el caso de las mezclas con RAP se logra un desempeño aceptable, teniendo mejor comportamiento en algunas áreas frente a otras en las cuales se logra un peor desempeño. Es posible señalar que es totalmente factible realizar mezclas aeroportuarias con RAP en capas de rodadura y lograr un desempeño acorde a las necesidades, sin embargo, es necesario hacer un diseño de pavimentos mediante un método como la MEPDG para tener, más certeza de la magnitud de las diferencias al utilizar este tipo de mezclas frente a tradicionales.

El ensayo TSR muestra un mejor desempeño al ser utilizado con RAP, es necesario probar más porcentajes para poder establecer un panorama más amplio respecto del efecto del RAP sobre el TSR en Chile.

El ensayo de Rigidez sigue la misma lógica que caracteriza a las mezclas con RAP, al utilizarlo crece considerablemente este parámetro en las mezclas.

El ensayo de Rueda de Hamburgo también sigue la lógica que caracteriza a las mezclas con RAP, logrando mejor desempeño al utilizar mezclas con RAP, para los porcentajes estudiados.

El ensayo de fatiga muestra que al aumentar la cantidad de RAP disminuye la cantidad de ciclos requeridos para hacer llegar al material al 50% de la rigidez inicial. Para este ensayo en particular y el caso de pavimentos aeroportuarios se debe investigar si realmente 500 [µε] son la mejor forma de representar el fenómeno físico que ocurre al aterrizar el avión, este punto podría cambiar fundamentalmente la elección del tipo de mezcla optimo en cuanto a la cantidad de RAP a utilizar.

En el caso de los ensayos TSR y Rueda de Hamburgo, se logra un desempeño similar al ser comparado con otros estudios ejecutados mediante método SUPERPAVE en la UTFSM. En el caso del ensayo de Fatiga existe un desempeño más bajo que el obtenido en estudios previos, en base a los demás datos obtenidos es posible señalar que este es el deterioro más crítico al utilizar RAP.

Es importante recalcar la importancia que tiene la aplicación del método SUPERPAVE en el desempeño de los pavimentos como también la labor de la DAP siendo la primera entidad que comience a licitar este tipo de proyectos, los cuales representan un avance claro y concreto a la infraestructura vial del país, se espera que este documento sirva también para generar un precedente del nivel de mejora que existe al utilizar diseño SUPERPAVE así como tantas otras tecnologías disponibles desde hace años en el mundo.

Finalmente señalar que aún existen múltiples líneas investigativas acerca del tema ya que se deberá generar un gran número de normas en el Manual de Carreteras de concretarse la transición hacia el método de diseño SUPERPAVE. Por otro lado, sería bueno realizar todos los ensayos mencionados en

esta investigación, junto con el Módulo Dinámico, para caracterizar las mezclas con RAP y su desempeño tanto para distintos grados PG de asfalto, y de esta forma tener una buena base de datos acerca del mínimo desempeño a exigir. También es posible realizar múltiples investigaciones para caracterizar mejor los áridos utilizados en distintas zonas del país.

6 BIBLIOGRAFIA

- AASHTO. (2012). *AASHTO M323-12 Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (2012). *AASHTO T209-12 Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (2013). *AASHTO T164-13 Standard Method Of Test For Quantitative Extraction Of Asphalt Binder From Hot Mix Asphalt (Hma)*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (2013). *AASHTO T308-13 Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (2014). *AASHTO T 164-14 Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot Mix Asphalt (HMA)*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (2015). *AASHTO T30-15 Standard Method of Test for Mechanical Analysis of Extracted Aggregate*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (2016). *AASHTO T 166-16 Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (2017). *AASHTO R35-17 Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (2017). *AASHTO T321-17 Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (2017). *AASHTO T324-17 Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures*. Washington: AASHTO.
- AENOR. (2012). *UNE-EN 12697-26 Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente*. Madrid: AENOR.
- Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*. Asphalt Institute.
- ASTM. (2011). *ASTM D2041/D2041M-11 Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. West Conshohocken: ASTM.
- ASTM. (2012). *ASTM D5404/D5404M-12 Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator*. ASTM.

- ASTM. (2014). *ASTM D4867 / D4867M - 09(2014) Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*. ASTM.
- ASTM. (2014). *ASTM D7906 - 14 Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using Toluene and the Rotary Evaporator*. ASTM.
- ASTM. (2014). *D2726/D2726M-14 Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. ASTM.
- Corona, C. (2017). *Determinacion de módulo de rigidez y caracterización de módulo dinámico de mezcla SUPERPAVE*. Memoria para optar al Título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.
- Dharamveer Singh, S. F. (2017). *Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials*. Mumbai: Elsevier Ltd.
- European Asphalt Association. (2002-2016). *Asphalt in Figures 2001-2015*. Brussels: European Asphalt Association.
- European Asphalt Association. (2016). *Asphalt in Figures 2015*. Brussels: European Asphalt Association.
- Loyola, C. (2016). *Resistencia al ahuellamiento de mezclas SUPERPAVE mediante ensayos de rueda Hamburgo y Flow Number*. Memoria para optar al Título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.
- National Asphalt Pavement Association. (2017). *7th Annual Pavement Industry Survey*. Lanham: National Asphalt Pavement Association.
- Rouzbeh Ghabchi, Manik Barman, Dharamveer Singh, Musharraf Zaman, Muhammad Ali Mubarak. (2016). *Comparison of laboratory performance of asphalt mixes containing different proportions of RAS and RAP*. Elsevier Ltd.
- Sullivan, J. (2006). *Pavement Recycling Executive Summary and Report*. Washington, DC.: Federal Highway Administration.
- Vásquez, A. (2016). *Resistencia a fatiga de mezcla SUPERPAVE envejecida a corto plazo*. Memoria para optar al Título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.
- Wang, Y. (2016). *The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays*. Hong Kong: Elsevier Ltd.
- Zuñiga, R. (2016). *Mezcla asfáltica en caliente con Pavimento de Asfalto Recuperado*. Santiago: Laboratorio Nacional de Vialidad.

7 ANEXOS

7.1 TSR

7.1.1 TSR Aeropuerto

Sample I.D.		PROBETAS SIN ACONDICIONAR			PROBETAS ACONDICIONADAS		
Diameter, mm (in.)	<i>D</i>	150.1	149.8	150.0	150.0	150.0	149.8
Thickness, mm (in.)	<i>t</i>	63.2	62.9	63.0	62.9	63.1	63.0
Dry mass in air	<i>A</i>	2448.2	2449.8	2447	2417.1	2414.8	2422.3
SSD mass	<i>B</i>	2466.7	2465.8	2462.8	2432.5	2428.5	2434.8
Mass in water	<i>C</i>	1417.1	1416.5	1414.5	1395.2	1392.7	1396.6
Volume (<i>B-C</i>)	<i>E</i>	1049.6	1049.3	1048.3	1037.3	1035.8	1038.2
Bulk Sp. Gr. (<i>A/E</i>)	<i>F</i>	2.333	2.335	2.334	2.330	2.331	2.333
Max Sp. Gr.	<i>G</i>	2.492	2.492	2.492	2.492	2.492	2.492
% AirVoid (100(<i>G-F</i>) / <i>G</i>)	<i>H</i>	6.4	6.3	6.3	6.5	6.4	6.4
Volume AirVoid, HE/100	<i>I</i>	67.2	66.2	66.4	67.4	66.8	66.2
Load, Direct	-	195	198	190	165	170	167
Load, N (lbf)	<i>P</i>	8970	9106	8744	7616	7841	7706
Saturated min.		Vacío entre 20 y 21 (in Hg)					
SSD Mass	<i>B'</i>	No Aplica			2463.4	2463.7	2466.9
Mass in water	<i>C'</i>				1409.5	1411.2	1414.6
Volume (<i>B'-C'</i>)	<i>E'</i>				1053.9	1052.5	1052.3
Vol Abs. water (<i>B'-A</i>)	<i>J</i>				46.3	48.9	44.6
% Saturation (100 <i>J'/I</i>)					68.7	73.2	67.4
% Swell (100(<i>E'-E</i>)/ <i>E</i>)					1.6	1.6	1.4
Conditioned 24 h in 60°C water							
Thickness, mm (in.)	<i>t''</i>	No Aplica			62.9	63.1	63.0
SSD Mass	<i>B''</i>				2472.6	2471.2	2478.0
Mass in water	<i>C''</i>				1418.3	1418.4	1423.3
Volume (<i>B''-C''</i>)	<i>E''</i>				1054.3	1052.8	1054.7
Vol Abs. Water (<i>B''-A</i>)	<i>J''</i>				55.5	56.4	55.7
% Saturation, (100 <i>J''/I</i>)					82.4	84.5	84.2
% Swell, 100(<i>E''-E</i>)/ <i>E</i>					1.6	1.6	1.6
Load, N (lbf)	<i>P''</i>				7616	7841	7706
Dry Strength, 2000 <i>P</i> /π <i>tD</i> (2 <i>P</i> /π <i>tD</i>)	<i>S_{td}</i>				602.0	615.2	589.1
Wet Strength, 2000 <i>P''</i> /π <i>t''D</i> (2 <i>P''</i> /π <i>t''D</i>)	<i>S_{tm}</i>				513.9	527.4	519.8
TSR, 100 <i>S_{tm}</i> / <i>S_{td}</i>		86.4					

7.1.2 TSR 15%

Metodo de ensayo		PROBETAS SIN ACONDICIONAR			PROBETAS ACONDICIONADAS		
Identificación de la muestra		1	2	3	1	2	3
Diámetro (mm)	D	150.0	150.0	150.0	150	150	150
Espesor (mm)	t	62.5	63.8	63.5	65.3	64.0	64.2
Masa seca en aire (gr)	A	2412.4	2376.4	2389.9	2364.2	2392.3	2371.3
Masa SSS (gr)	B	2425.6	2400.3	2410.4	2391.4	2415.9	2402.1
Masa sumergida (gr)	C	1391	1380	1386.9	1367.1	1381.6	1376.8
Volumen (cm³) (B-C)	E	1034.6	1020.3	1023.5	1024.3	1034.3	1025.3
Densidad real seca (gr/cm³) (A/E)	F	2.332	2.329	2.335	2.308	2.313	2.313
Densidad máxima mezcla (gr/cm³)	G	2.495	2.495	2.495	2.495	2.495	2.495
% Vacíos (100(G-F)/G)	H	6.5	6.6	6.4	7.5	7.3	7.3
Volumen de vacíos (cm³) HE/100	I	67.7	67.8	65.6	76.7	75.5	74.9
% Absorción ((B-A)/(B-C))100		1.3	2.3	2.0	2.7	2.3	3.0
Carga (lectura dial)		240	210	212	198	204	194
Carga, N	P	11002	9647	9738	9106	9376	8925
Saturación (minutos) 5	Aplicar vacío entre 20 y 21 in. Hg				Sature y calcule % de saturación		
Masa SSS (gr)	B'	No Aplica			2450.9	2420.4	2430.5
Masa sumergida (gr)	C'				1401.1	1373.2	1382.3
Volumen (cm³) (B'-C')	E'				1049.8	1047.2	1048.2
Vol. Agua absorbida (cm³) (B'-A)	J'				86.7	28.1	59.2
% Saturación (100J'/I)					113.0	37.2	79.1
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)					2.5	1.2	2.2
Nota: Si el % SATURACION se encuentra entre el 55 y el 80%, proceda con el ensayo. Si es mayor que 80%, el espécimen está dañado y debe ser desechado.							
Acondicionamiento 24 h. a 60°C en agua							
Espesor (mm)	t''	No Aplica			63.3	64.5	64.2
Masa SSS (gr)	B''				2465.7	2434.2	2449.7
Masa sumergida (gr)	C''					1371.9	1390
Volumen (cm³) (B''-C'')	E''					1062.3	1059.7
Vol. Agua absorbida (cm³) (B''-A)	J''					41.9	78.4
% Saturación (100J''/I)						55.5	104.7
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)						2.7	3.4
Carga, N	P''	11002	9647	9738	9106	9376	8925
Resistencia en seco, 2000 P''/πt''D(2P''/π t''D)	S''td	747.1	641.7	650.9	-----	-----	-----
Resistencia húmeda, 2000 P''/πt''D(2P''/π t''D)	S''tm	-----	-----	-----	610.9	617.1	590.0
TSR, 100S''tm /S''td		89.1					

D4867/D4867M - 09 (2014)									
Project									
Additive									
Compaction Method									
Date Tested									
Sample I.D.	PROBETAS SIN ACONDICIONAR				PROBETAS ACONDICIONADAS				
Diameter, mm (in.)	D	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	149,8
Thickness, mm (in.)	t	64,3	64,3	64,5	64,3	64,3	64,5	64,3	64,3
Dry mass in air	A				2378,6	2375,9	2378,8		2378,8
SSD mass	B				2405	2405,1	2406,4		2406,4
Mass in water	C				1379,9	1377,9	1383,4		1383,4
Volume (B-C)	E				1025,1	1027,2	1023		1023
Bulk Sp. Gr. (A/E)	F				2,320	2,313	2,325		2,325
Max Sp. Gr.	G	2,492	2,492	2,492	2,492	2,492	2,492		2,492
% Air/Void (100(G-F)/G)	H				6,9	7,2	6,7		6,7
Volume Air/Void, HE/100	I				70,6	73,8	68,4		68,4
Load, Direct	-	215	195	205	180	184	186		186
Load, N (lbf)	P	9873	8970	9422	8293	8473	8564		8564
Saturated min.	Vacío entre 20 y 21 (in Hg)								
SSD Mass	B'				2420,8	2419,3	2421,0		2421,0
Mass in water	C'				1380,7	1373,4	1380,6		1380,6
Volume (B'-C')	E'				1040,1	1045,9	1040,4		1040,4
Vol Abs. water (B'-A)	J'				42,2	43,4	42,2		42,2
% Saturation (100/J')					59,8	58,8	61,7		61,7
% Swell (100(E'-E)/E)					1,5	1,8	1,7		1,7
Conditioned 24 h in 60°C water									
Thickness, mm (in.)	t''				64	64,35	63,7		63,7
SSD Mass	B''				2426,8	2426,1	2425,4		2425,4
Mass in water	C''				1374,1	1366,1	1371,00		1371,00
Volume (B''-C'')	E''				1052,7	1060	1054,4		1054,4
Vol Abs. Water (B''-A)	J''				48,2	50,2	46,6		46,6
% Saturation, (100/J'')					68,3	68,0	68,1		68,1
% Swell, 100(E''-E)/E					2,7	3,2	3,1		3,1
Load, N (lbf)	P''				8293	8473	8564		8564
Dry Strength, 2000 P _{1m} /ID (2P _{1m} /ID)	S _{1d}	651,7	592,1	620,0					
Wet Strength, 2000 P _{1m} /ID (2P _{1m} /ID)	S _{1m}				547,4	557,5	566,0		566,0
TSR, 100S _{1d} /S _{1m}					89,7				
Visual Moisture Damage									
Crack/Break Aggregate									

7.2 RIGIDEZ

7.2.1 Diseño Aeropuerto

7.2.1.1 Probeta 1-1

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

Address of testing laboratory

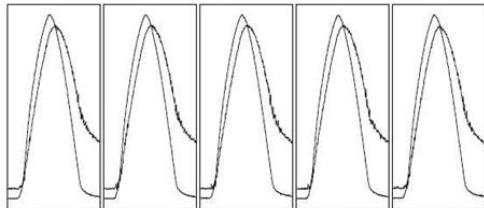
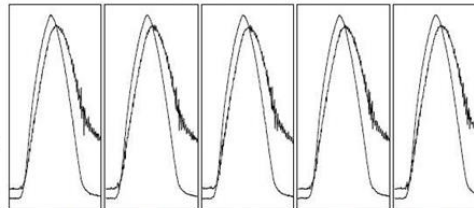
Date of print-out: 09:11:2017
Test carried out by: Rodrigo Verdugo
Specimen reference: Specimen 1 de 2 a 15 grados
Test temperature: 15 °C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 69,5 mm
Bulk density: 2396(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm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

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

Date & time of test :	09:nov:2017 08:16	Client name :	Diseño Superpave
Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave		
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26:2012		
Method of compaction	Compactador Giratorio		
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20 °C		
Bulk density determination method:	Densidad aparente		

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter

									
Results	Target	Minimum	Maximum	Mean	Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		4,86	4,87	4,86	Vertical force (kN)		4,93	4,95	4,94
Horizontal stress (kPa)		296,7	297,5	297,1	Horizontal stress (kPa)		301,0	302,6	301,9
Load-area factor	0,60	0,62	0,62	0,62	Load-area factor	0,60	0,60	0,61	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	6,9	6,9	Horizontal deformation (µm)	7,0	7,0	7,1	7,0
Load (rise) time (ms):	124	121,0	124,0	122,8	Load (rise) time (ms):	124	120,0	123,0	120,6
Measured stiffness modulus (MPa)		6248	6304	6282	Measured stiffness modulus (MPa)		6241	6319	6283
Adjusted stiffness modulus (MPa)		6331	6382	6364	Adjusted stiffness modulus (MPa)		6272	6359	6312

Mean results of the two tests

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

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

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

7.2.1.2 Probeta 1-2

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

Address of testing laboratory

Universidad Técnica Federico Santa María
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaíso
Valparaíso

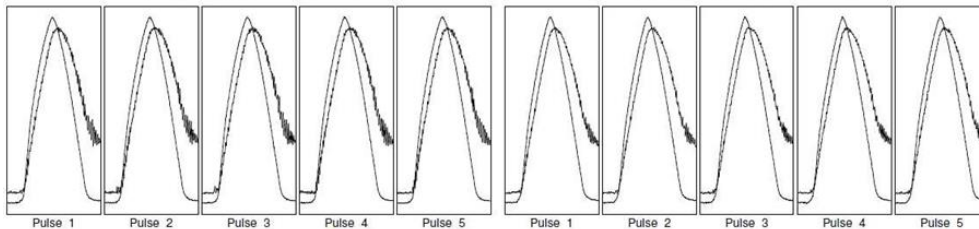
Date of print-out: 08:11:2017
Test carried out by: Operator
Specimen reference: R2_3_15
Test temperature: 15°C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65,6 mm
Bulk density: 2401(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: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

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

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

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	4,54	4,56	4,55	
Horizontal stress (kPa)	293,7	295,0	294,3	
Load-area factor	0,60	0,62	0,63	0,63
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,8	6,9	6,9
Load (rise) time (ms):	124	123,0	126,0	124,8
Measured stiffness modulus (MPa)	6211	6303	6261	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	6296	6407	6359	

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

Mean results of the two tests

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

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

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

7.2.1.3 Probeta 2-1

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: A1

Address of testing laboratory

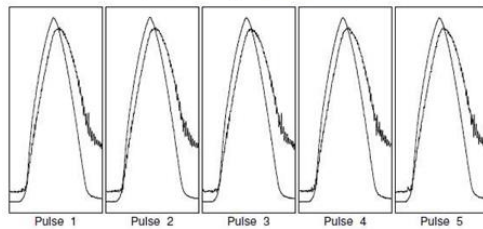
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

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

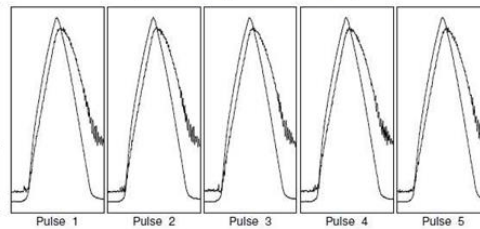
Date & time of test :	08:nov:2017 13:59	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

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

Test along 1st diameter



Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		5,65	5,66	5,66
Horizontal stress (kPa)		341,2	341,8	341,6
Load-area factor	0,60	0,62	0,63	0,63
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,0	7,1	7,1
Load (rise) time (ms):	124	119,0	123,0	122,2
Measured stiffness modulus (MPa)		6994	7139	7061
Adjusted stiffness modulus (MPa)		7086	7263	7188

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

Mean results of the two tests

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

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

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

7.2.1.4 Probeta 2-2

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: A1

Address of testing laboratory

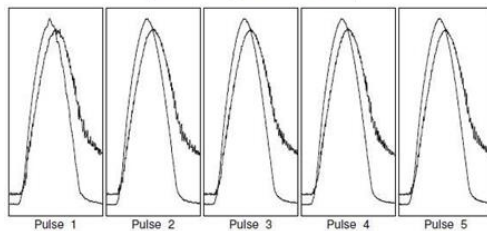
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

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

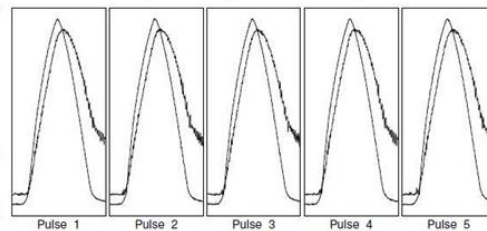
Date & time of test :	08:nov:2017 11:01	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

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

Test along 1st diameter



Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		4,68	4,72	4,69
Horizontal stress (kPa)		299,4	302,3	300,2
Load-area factor	0,60	0,61	0,63	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,7	6,8	6,8
Load (rise) time (ms):	124	120,0	123,0	122,4
Measured stiffness modulus (MPa)		6432	6531	6470
Adjusted stiffness modulus (MPa)		6492	6647	6543

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

Mean results of the two tests

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

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

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

7.2.2 Diseño 15% de

7.2.2.1 Probeta 1-1

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R1_1

Date of print-out: 25/04/2018
 Test carried out by: AZM
 Specimen reference: R1_1
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 150 mm
 Specimen thickness: 65,6 mm
 Bulk density: 2383(kg/m³)
 Poisson's ratio: 0,35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

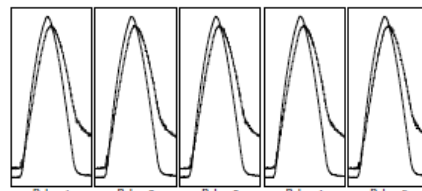
Address of testing laboratory

Universidad Técnica Federico Santa María
 Laboratorio LEMCO
 Joel Salas
 Avenidad España 1680
 Valparaíso
 Valparaíso

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

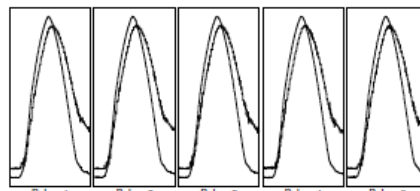
Type and origin of the bituminous mixture	Diseño Superpave 15% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26:2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20°C
Bulk density determination method:	Densidad aparente

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	125,0	125,0	125,0
Measured stiffness modulus (MPa)		8225	8299	8263
Adjusted stiffness modulus (MPa)		10555	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	125,0
Measured stiffness modulus (MPa)		8139	8368	8240
Adjusted stiffness modulus (MPa)		10310	10477	10395

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	126,3
Horizontal deformation (µm) :	7,1
Horizontal deformation (%) :	0,0047
Measured stiffness modulus (MPa) :	8252
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	10407

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

Person responsible for this test report	Signed
LEMCO	
	Date of issue of report 25/04/2018

7.2.2.2 Probeta 1-2

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R1_2

Address of testing laboratory

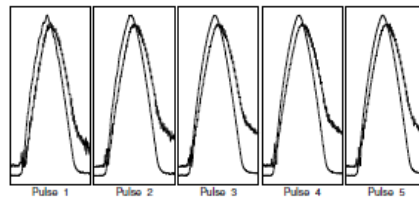
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

Date of print-out: 25/04/2018
Test carried out by: AZM
Specimen reference: R1_2
Test temperature: 15°C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65.6 mm
Bulk density: 2383(kg/m³)
Poisson's ratio: 0.35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

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

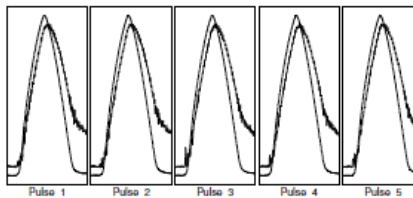
Type and origin of the bituminous mixture	Diseño Superpave 15% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26:2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20°C
Bulk density determination method:	Densidad aparente

Test along 1st diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6.45	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	126.0	125.6
Measured stiffness modulus (MPa)		8650	9327	8988
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8748	10018	9111

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6.35	6.34	6.32
Horizontal stress (kPa)		407.6	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

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	125,5
Horizontal deformation (µm) :	6,9
Horizontal deformation (%) :	0,0046
Measured stiffness modulus (MPa) :	8835
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	8909

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (5)

Person responsible for this test report	Signed
LEMCO	
	Date of issue of report 25/04/2018

7.2.2.3 Probeta 2-1

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R2_1

Date of print-out: 25/04/2018
 Test carried out by: AZM
 Specimen reference: R2_1
 Test temperature: 15°C
 Specimen diameter: 150 mm
 Specimen thickness: 65,6 mm
 Bulk density: 2375(kg/m³)
 Poisson's ratio: 0,35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

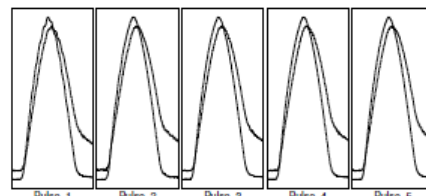
Address of testing laboratory

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

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

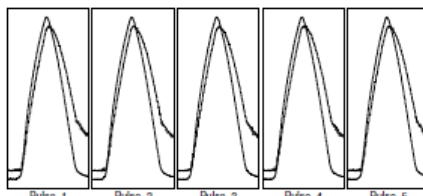
Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 15% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26:2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20°C
Bulk density determination method:	Densidad aparente

Test along 1st diameter



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

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,70	6,72	6,71
Horizontal stress (kPa)		439,2	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

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	125,4
Horizontal deformation (µm) :	7,0
Horizontal deformation (%) :	0,0046
Measured stiffness modulus (MPa) :	9576
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	9625

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

Person responsible for this test report	Signed
LEMCO	
	Date of issue of report 25:04:2018

7.2.2.4 Probeta 2-2

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R2_2

Address of testing laboratory

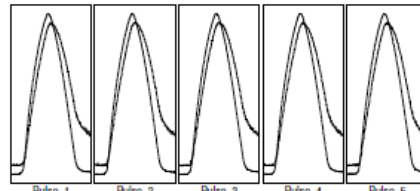
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaíso
Valparaíso

Date of print-out: 26:04:2018
Test carried out by: AZM
Specimen reference: R2_2
Test temperature: 15°C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65,6 mm
Bulk density: 2375(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

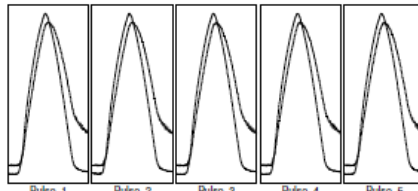
Date & time of test :	26:abr:2018 07:53	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

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



Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	5,92	5,95	5,94	
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	125,0	127,0	126,0
Measured stiffness modulus (MPa)	9298	9427	9376	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	9297	9535	9463	

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	126,9
Horizontal deformation (µm) :	7,0
Horizontal deformation (%) :	0,0047
Measured stiffness modulus (MPa) :	9265
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	9294

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

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

7.2.3 Diseño 25%

7.2.3.1 Probeta 1-1

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R11

Address of testing laboratory

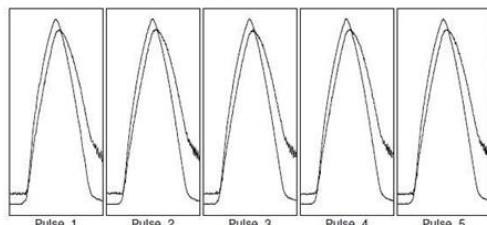
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

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

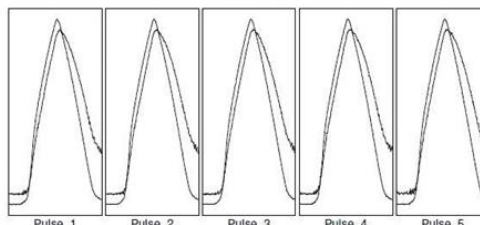
Date & time of test :	26:abr:2018 08:34	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 25% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26:2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20 °C
Bulk density determination method:	Densidad aparente

Test along 1st diameter



Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,44	6,47	6,45
Horizontal stress (kPa)		416,5	418,3	417,4
Load-area factor	0,60	0,61	0,63	0,61
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,9	7,0	6,9
Load (rise) time (ms):	124	129,0	132,0	130,8
Measured stiffness modulus (MPa)		8737	8838	8788
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8832	8970	8875

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

Mean results of the two tests

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

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

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

7.2.3.2 Probeta 1-2

Indirect tensile stiffness modulus test report. (EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - NU-14) Serial No. of this test report: R12

Address of testing laboratory

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

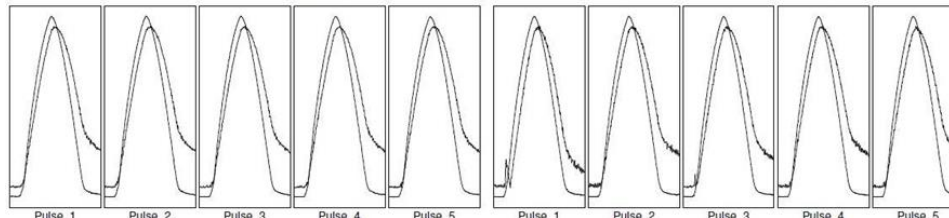
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaiso
Valparaiso

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

Type and origin of the bituminous mixture	Diseño Superpave 25% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26:2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20 °C
Bulk density determination method:	Densidad aparente

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	6,23	6,25	6,24	
Horizontal stress (kPa)	403,1	404,5	403,6	
Load-area factor	0,60	0,61	0,62	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,8	6,9	6,8
Load (rise) time (ms):	124	123,0	126,0	125,0
Measured stiffness modulus (MPa)		8575	8689	8611
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8650	8801	8707

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

Mean results of the two tests

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

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

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

7.2.3.3 Probeta 2-1

Indirect tensile stiffness modulus test report. (EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - NU-14) Serial No. of this test report: R21

Address of testing laboratory

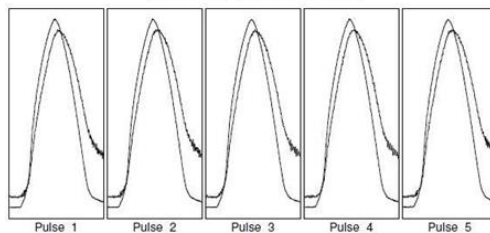
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaíso
Valparaíso

Date of print-out: 26:04:2018
Test carried out by: AZM
Specimen reference: R21
Test temperature: 15 °C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65,6 mm
Bulk density: 2370(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

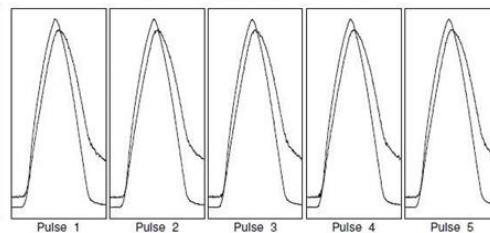
Date & time of test :	26:abr:2018 13:50	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the the bituminous mixture	Diseño Superpave 25% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26:2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20 °C
Bulk density determination method:	Densidad aparente

Test along 1st diameter



Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,33	6,34	6,34
Horizontal stress (kPa)		409,4	410,5	409,9
Load-area factor	0,60	0,61	0,62	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	7,0	7,1	7,1
Load (rise) time (ms):	124	124,0	129,0	126,0
Measured stiffness modulus (MPa)		8426	8545	8495
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8545	8629	8587

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

Mean results of the two tests

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

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

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

7.2.3.4 Probeta 2-2

Indirect tensile stiffness modulus test report.

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

Serial No. of this test report: R22

Address of testing laboratory

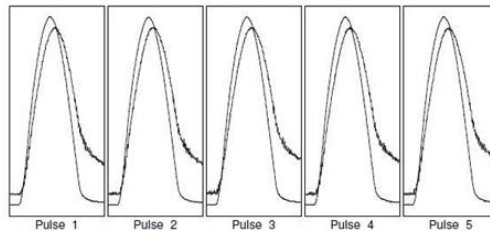
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Laboratorio LEMCO
Joel Salas
Avenida España 1680
Valparaíso
Valparaíso

Date of print-out: 26:04:2018
Test carried out by: AZM
Specimen reference: R22
Test temperature: 15 °C
Specimen diameter: 150 mm
Specimen thickness: 65,6 mm
Bulk density: 2370(kg/m³)
Poisson's ratio: 0,35
Target rise-time: 124 ms
Target horizontal deformation: 7 µm
Number of conditioning pulses: 10
Transducer scan rate: 1000 Hz

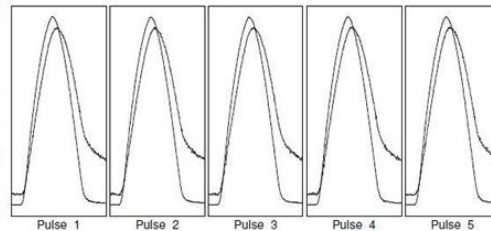
Date & time of test :	26:abr:2018 14:38	Client name :	Diseño Superpave
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	Diseño Superpave 25% RAP
Method of manufacture of the bituminous mixture	UNE - EN 12697-26:2012
Method of compaction	Compactador Giratorio
Specimen storage details	Sala de laboratorio 20 °C
Bulk density determination method:	Densidad aparente

Test along 1st diameter



Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		6,21	6,22	6,21
Horizontal stress (kPa)		401,7	402,5	402,0
Load-area factor	0,60	0,61	0,63	0,62
Horizontal deformation (µm)	7,0	6,8	7,1	6,9
Load (rise) time (ms):	124	120,0	125,0	122,6
Measured stiffness modulus (MPa)		8305	8635	8457
Adjusted stiffness modulus (MPa)		8374	8706	8547

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

Mean results of the two tests

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

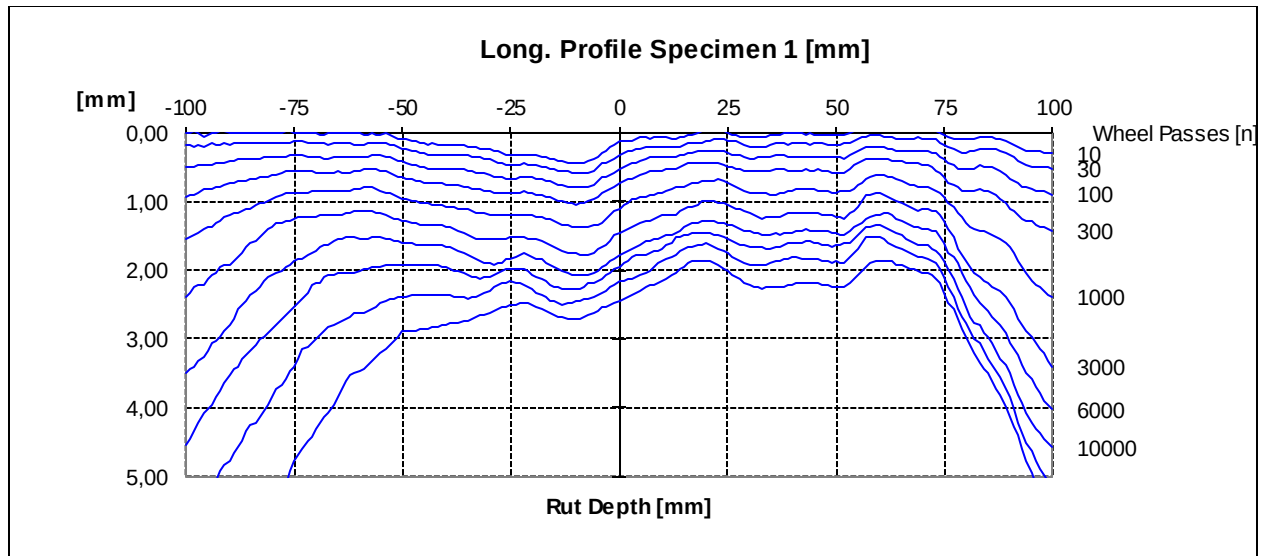
Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (-4,428)

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

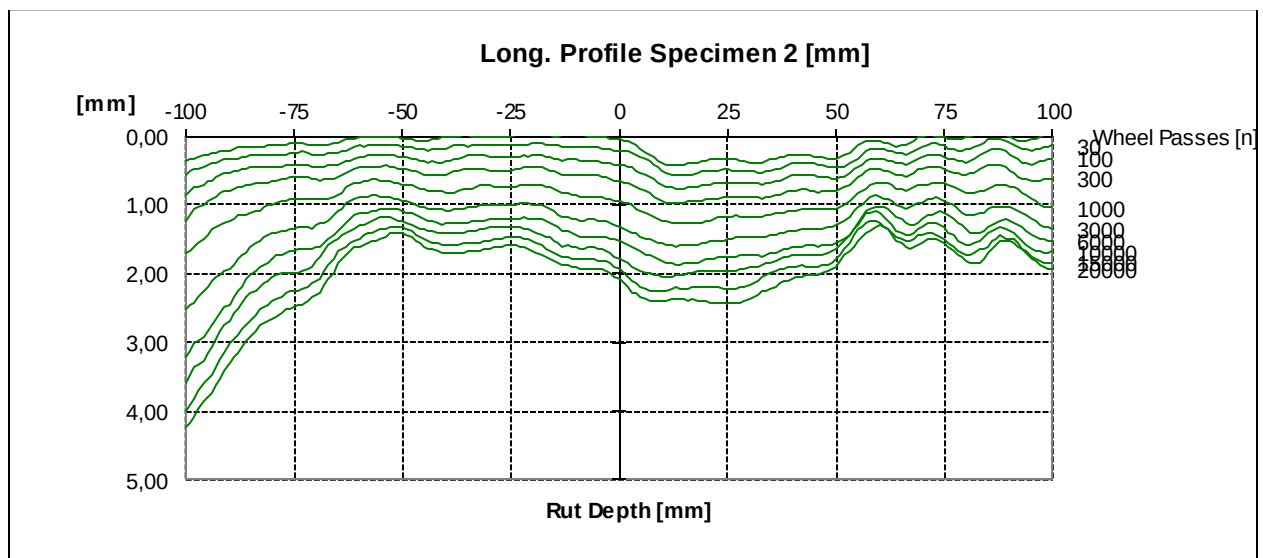
7.3 RUEDA DE HAMBURGO

7.3.1 Diseño Aeropuerto

7.3.1.1 Probeta 1

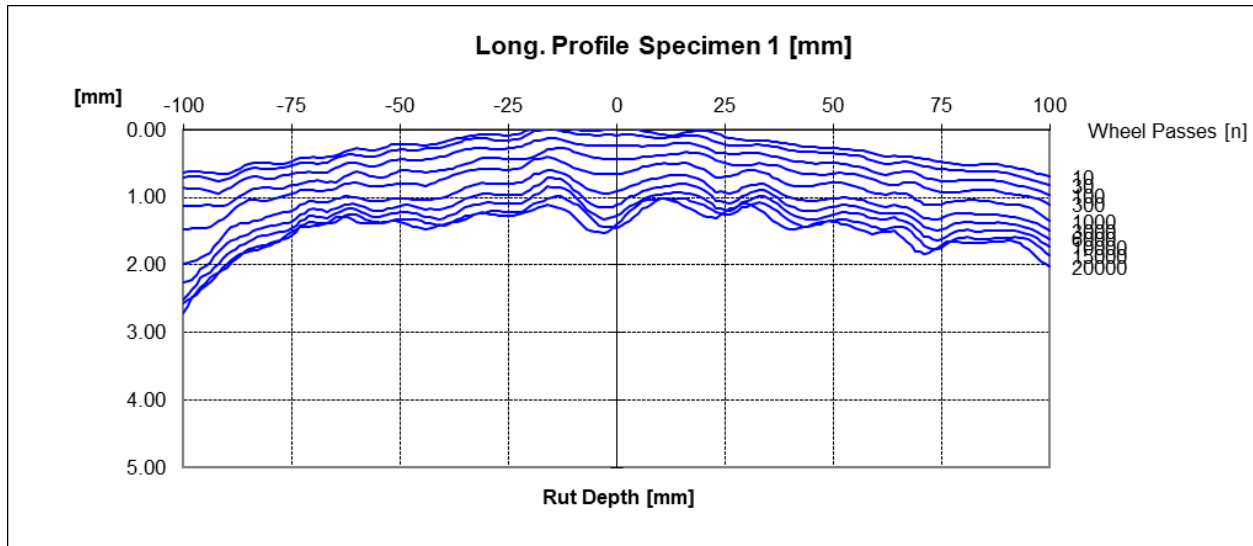


7.3.1.2 Probeta 2

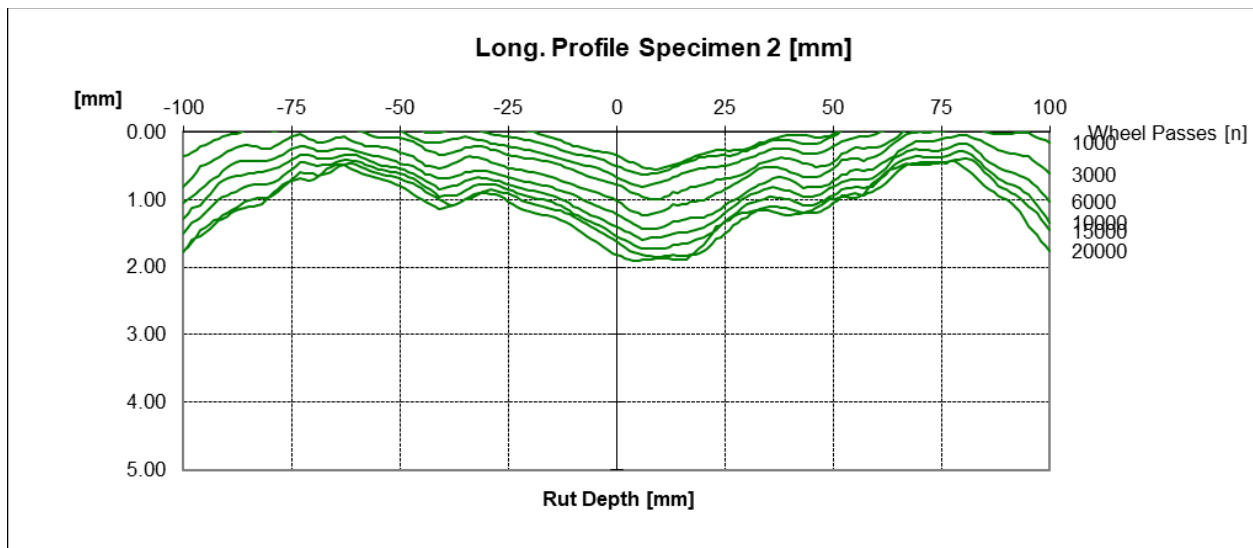


7.3.2 Diseño 15% de RAP

7.3.2.1 Probeta 1

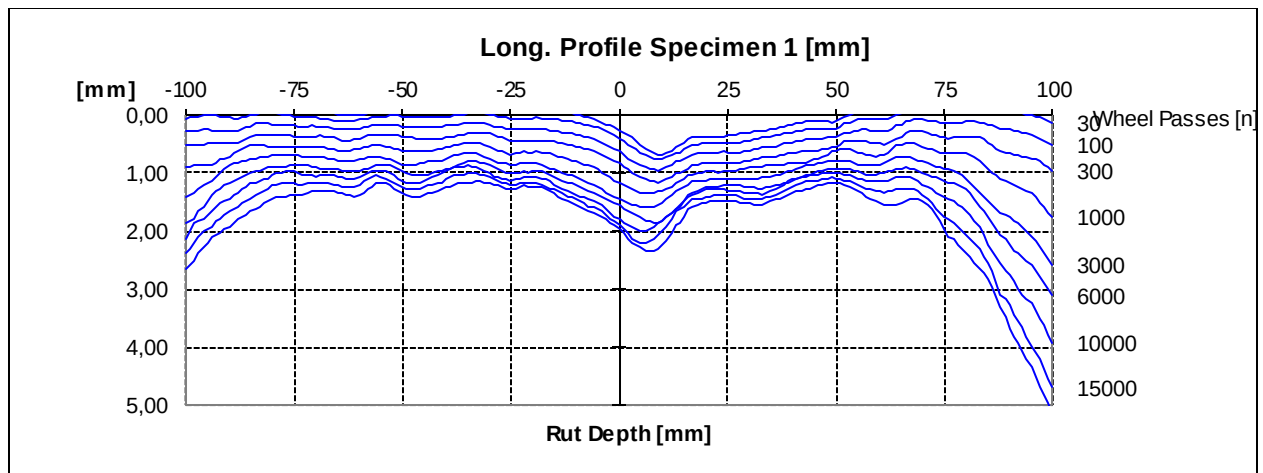


7.3.2.2 Probeta 2

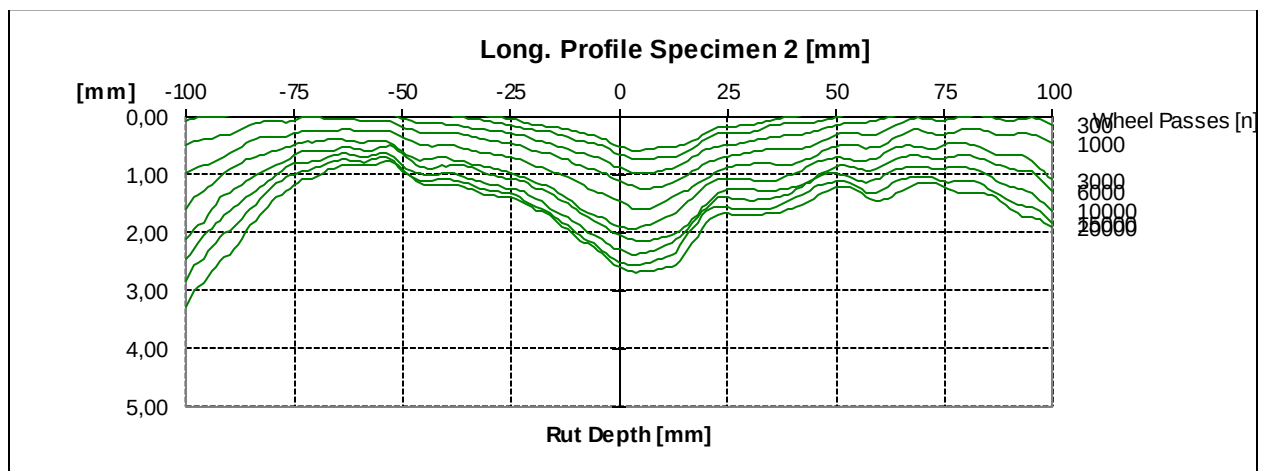


7.3.3 Diseño 25% de RAP

7.3.3.1 Probeta 1



7.3.3.2 Probeta 2



7.4 PARAMETROS VOLUMETRICOS MEZCLAS DE PRUEBA

7.4.1 Diseño 15% de RAP

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

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

7.4.2 Diseño 25% de RAP

Compactacion						
	M1		M2		M3	
Altura probeta [mm]	#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 [cm ²]	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
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	

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