UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

ESTUDIO DE UN LIGANTE ASFÁLTICO CA-24, AL INCORPORAR RAP EN UNA MEZCLA IV-A-12

Pedro Antonio González Belmar

Memoria para optar al Título de:

Construcción Civil

Profesor Guía:

Carlos Wahr

Mayo del 2017

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

“ESTUDIO DE UN LIGANTE ASFÁLTICO CA-24, AL INCORPORAR RAP EN UNA MEZCLA IV-A-12”

Memoria de titulación presentada por:

Pedro Antonio González Belmar

Como requisito para optar al título de:

Construcción Civil

Profesor Guía:

Carlos Wahr

Mayo del 2017

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos mis seres amados; familia, amigos, compañeros y profesores que estuvieron dándome el apoyo día a día. A mi madre que me ha guiado de la mejor manera, gracias a ella he tenido la posibilidad de concretar una parte importante en mi vida, que me permitirá desarrollarme profesionalmente en un futuro cercano, tanto en el ámbito laboral como personal.

Por otro lado, dar gracias a nuestra Universidad Técnica Federico Santa María y particularmente al equipo de laboratorio LEMCO, por brindarme grandes conocimientos y apoyo. También agradecer especialmente a los profesores, que en cinco años aportaron en mi crecimiento personal y formaron parte de esta etapa tan única en mi vida.

“ESTUDIO DE UN LIGANTE ASFÁLTICO CA-24, AL INCORPORAR RAP EN UNA MEZCLA IV-A-12”

RESUMEN

El trabajo a analizar consiste en evaluar los cambios en las propiedades que sufre el ligante asfáltico CA-24 a temperatura baja e intermedia, al incorporar asfalto reciclado o también denominado en su sigla en inglés “RAP” (Recycled Asphalt Pavements). Las mediciones se realizan sobre el asfalto recuperado de dos mezclas con bandas tipo IV-A-12. La primera corresponde a un 8% de RAP grueso (tamaño máximo nominal del agregado 3/4”), la segunda corresponde a un 12% de RAP grueso y un 6% de RAP fino (tamaño máximo nominal del agregado 3/8”).

Para determinar los cambios se somete el ligante asfáltico CA-24 a la clasificación SUPERPAVE por grado de desempeño (PG: performance grade), basada en la norma internacional ASTM D6373-15, con el objetivo de establecer sus características reológicas iniciales y comparar los resultados con las dos mezclas recuperadas.

Las mezclas con RAP se recuperan mediante el “Método para separar el ligante de una mezcla asfáltica o testigo, por centrifugación, para posterior ensaye de recuperación del ligante asfaltico”, MC 8.302.36 y el “Método de recuperación del ligante de mezcla asfáltica para su caracterización”, MC. 8.302.58, establecidos en el Manual de Carreteras, Volumen 8.

El estudio a temperaturas bajas e intermedias del asfalto recuperado se realiza mediante el Reómetro de Viga en Flexión y Reómetro de Corte Dinámico, basado en la norma ASTM D6648-09 y ASTM D7175-15 respectivamente.

El ligante asfáltico CA-24 logra una clasificación PG 64-22, mientras que el ligante asfáltico que se recupera de las mezclas con RAP consigue un resultado a baja temperatura de -22°C para la mezcla con 8% de RAP y -16°C para la mezcla con 18% de RAP. Por lo tanto, al incorporar 8% de RAP el ligante asfáltico a baja temperatura no se ve alterado, pero al incorporar 18% de RAP el ligante asfáltico se vuelve más rígido a baja temperatura.

La temperatura intermedia exacta que alcanza el ligante asfáltico CA-24 fue de 21,6°C, el ligante asfáltico recuperado de la mezcla con 8% de RAP logra un resultado de 21,0°C y la mezcla con 18% de RAP consigue un resultado de 21,8°C. Por lo tanto, las temperaturas intermedias son prácticamente similares y no se ven alteradas por la incorporación de RAP en la mezcla.

"STUDY ASPHALT BINDER CA-24, INCORPORATING RAP IS A MIXTURE IV-A-12".

ABSTRACT

The analysis consists in determining the changes in its properties suffered by the CA-24 asphalt binder at low and intermediate temperature, due to the incorporation of Recycled Asphalt Pavements (RAP). Measurements are made on the asphalt recovered from two IV-A-12 mixtures. The first one corresponds to an 8% of gross RAP (maximum aggregate size 3/4 "), the second one corresponds to a 12% thick RAP and a 6% of fine RAP (maximum aggregate size 3/8").

To determine the changes, the CA-24 asphalt binder is subjected to the SUPERPAVE classification by Performance Grade (PG) based on the ASTM D6373-15 International Standard Specification, in order to set its initial rheological characteristics and compare the results with the two recovered mixtures.

The RAP mixtures are recovered by using the "Test Method for separating an asphalt binder or witness by centrifugation for subsequent recovery assay of asphalt binder", MC 8.302.36 and the "Test Method of Recovery asphalt binder for characterization ", MC. 8.302.58, both established in the Highway Manual, Volume 8.

The study at low and intermediate temperatures of the recovered asphalt is done by a Beam Rheometer Flexural and a Dynamic Rheometer Court, both based on the ASTM D6648-09 standard and the ASTM D7175-15 respectively.

The CA-24 asphalt binder achieves a PG 64-22 classification, while the asphalt binder recovered from the mixtures with RAP archieves at low temperature result -22°C for the mixture with 8% RAP and -16°C for the mixture with 18% RAP. Therefore, incorporating 8% RAP at low temperature the asphalt binder is not altered, but incorporating 18% RAP the asphalt binder becomes much more rigid at low temperature.

The exact intermediate temperature that achieves the asphalt binder CA-24 is 21,6°C, the asphalt binder recovered from the mixture with 8% RAP achieves a result 21,0°C and the mixture with 18% RAP achieves a result 21,8°C. Therefore, the intermediate temperatures are practically similar and are not altered by incorporation of RAP in the mixture.

GLOSARIO

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASTM: American Society for Testing Materials.

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

C: Creep Compliance en Flexión.

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

DTT: Direct Tension Test (Ensayo de Tracción Directa).

E*: Módulo Complejo de Corte Axial (o flexión).

E: Módulo de Relajación Axial (o flexión).

f: Frecuencia de carga.

G*: Módulo Complejo de Corte Dinámico.

G (t): Módulo de relajación de corte.

G': Módulo de Almacenamiento.

G'': Módulo de Pérdida.

HPDR: Horno de Película Delgada Rotatorio.

hr: Hora.

J: Creep Compliance en Corte.

Jnr: Creep Compliance no Recuperable.

Km/hr: Kilómetros por Hora.

kPa: Kilo pascales

l/min: Litros por minutos.

mbar: Milibares.

min: Minutos.

ml: Mililitros

mm: Milímetros.

mm Hg: Milímetros de mercurio.

ml/min: Mililitros por minuto.

mN: Milinewton.

MAC: Mezcla Asfáltica en Caliente.

NCHRP: National Cooperative Highway Research Program

PAV: Preassure Aging Vessel (Envejecimiento en Cámara de Presión).

PG: Peformance Grading (Grado de Desempeño).

Pa·s: Pascal por segundo.

PSI: Libras por pulgada cuadrada.

RAP: Recycled Asphalt Pavements (Asfalto Reciclado de Pavimentos).

rpm: Revoluciones por minute

s: Segundo.

SHRP: Strategic Highway Research Program.

S (t): Módulo de Rigidez.

SUPERPAVE: Superior Performing Asphalt Pavements

T: Temperatura.

Tn/km: Toneladas por kilómetros.

W_i: Energía Disipada por ciclo i de carga.

Wd: Energía disipada.

δ: Angulo de fase.

ε: Deformación Axial.

$\varepsilon 0$: Deformación axial máxima aplicada.

ε_r: Recuperación Elástica.

γ: Deformación de Corte.

γ_{max}: Deformación de Corte máxima.

σ: Esfuerzo Axial.

σ_0: Esfuerzo Axial máximo aplicado.

τ: Esfuerzo de Corte.

τ_{max}: Esfuerzo Axial máximo aplicado.

υ: Módulo de Poisson.

°C: Grados Celsius.

°K: Grados Kelvin.

ÍNDICE

1 INTRODUCCION 1

1.1. ANTECEDENTES GENERALES 1

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO 2

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS DEL ESTUDIO 2

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO 2

1.4 METODOLOGIA DE TRABAJO 2

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA 3

2 GENERALIDADES DEL ASFALTO 4

2.1 ASFALTO 4

2.2 COMPORTAMIENTO REOLOGICO DEL ASFALTO 5

2.3 VISCOELASTICIDAD EN EL DOMINIO TEMPORAL 6

2.4 VISCOELASTICIDAD EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA 8

2.5 SUSCEPTIBILIDAD DEL ASFALTO. 10

2.5.1 Efecto de la Temperatura y frecuencia de carga. 10

2.5.2 Efecto de envejecimiento 11

2.6 TIPOS DE BETUNES ASFALTICOS 11

2.6.1 Asfaltos Tradicionales 11

2.6.2 Asfaltos Modificados 12

2.7 MODOS DE FALLA CRITICOS DE LOS PAVIMENTOS 12

2.7.1 Ahuellamiento 12

2.7.2 Agrietamiento por fatiga 14

2.7.3 Agrietamiento térmico 15

3 INCORPORACIÓN DE RAP EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE 16

3.1 EXTRACCIÓN DE MATERIAL RECICLADO Y PROCESO DE TRATAMIENTO EN PLANTA. 17

3.2 SISTEMA EN PLANTA EN CALIENTE 18

3.2.1 Reciclado en planta discontinua: 19

3.2.2 Reciclado en tambor mezclador: 20

3.3 SITUACIÓN DEL RECICLADO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN EL MUNDO. 21

4 ESPECIFICACIONES POR GRADO DE DESEMPEÑO SUPERPAVE 22

4.1 ESPECIFICACIONES SUPERPAVE 22

4.2 ENSAYOS Y EQUIPOS UTILIZADOS 22

4.2.1 Método para determinar los puntos de inflamación y combustión usando la Copa Abierta de Cleveland. 22

4.2.2 Medición de la viscosidad mediante el Viscosímetro rotacional de Brookfield 23

4.2.3 Método de ensaye de película delgada rotatoria. 23

4.2.4 Método de envejecimiento acelerado en PAV. 24

4.2.5 Medición de las propiedades reológicas mediante el DSR. 24

4.2.6 Medición de rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas mediante el BBR 24

4.2.7 Método de ensaye de Tracción Directa 25

4.3 OTROS ENSAYOS SUPERPAVE PARA ESTUDIO DEL LIGANTE 26

4.3.1 Determinación de la deformación Creep y recuperación elástica mediante el equipo DSR. 26

5 EXTRACCIÓN Y RECUPERACIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO 26
5.1.1 Separación del asfalto de un testigo, por centrifugado, para posterior recuperación 26
5.1.2 Recuperación del ligante asfáltico mediante el Método con Destilador Rotacional 27
5.1.3 Extracción y recuperación de un ligante asfaltico mediante el método propuesto por la SHRP. 28

6 ASFALTO RECICLADO EN SUPERPAVE 29

6.1 EXTRACCION Y RECUPERACION 29

6.2 GRADO DE DESEMPEÑO EN MEZCLAS CON RAP 31

6.3 DETERMINACION DEL GRADO DE DESEMPEÑO DE UN RAP 32

6.4 EFECTOS DE MANIPULACION DEL RAP 36

7 FASE EXPERIMENTAL 37

7.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS BETUNES ASFALTICOS ANALIZADOS. 37

7.2 CLASIFICACION PG. 37
7.2.1 Condiciones de ensayo 37
7.2.2 Tolerancia y precisión 38
7.2.3 Metodología de ensayo. 39
7.2.4 Resultados 39

7.3 ENSAYO CREEP AND RECOVERY 40
7.3.1 Condiciones de ensayo 40
7.3.2 Metodología del ensayo. 41
7.3.3 Tolerancia y precisión 41
7.3.4 Resultados 41

8 ANALISIS DE RESULTADOS 41

8.1 CLASIFICACIÓN POR GRADO DE DESEMPEÑO 41
8.1.1 Análisis general. 41
8.1.2 Análisis específico 42

8.2 CREEP AND RECOVERY 43
8.2.1 Análisis general. 43
8.2.2 Análisis específico 43

9 CONCLUSIONES 44

10 REFERENCIAS 45

ANEXO A 49

ANEXO B 57

ANEXO C 66

ANEXO D 71

ANEXO E 79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6-1Rigidez a alta Temperatura y temperatura crítica alta del ligante recuperado 30
Tabla 6-2 Bandas granulométricas promedio del agregado del RAP 30
Tabla 6-3 Recomendaciones para la selección de ligante asfáltico..... 31
Tabla 7-1 Designación de asfaltos utilizados 37
Tabla 7-2 Valores máximos y mínimos de tensiones y deformaciones..... 38
Tabla 7-3 Tolerancias (d2s%) para un mismo operador DSR..... 39
Tabla 7-4 Precisión para un mismo operador BBR..... 39
Tabla 7-5 Resumen de resultados de clasificación por grado de desempeño 40
Tabla 7-6 Resultados de temperaturas intermedias obtenidas 40
Tabla 7-7 Coeficientes de variación para ensayo Creep And Recovery 41
Tabla 7-8 Resumen de resultados ensayos Creep And Recovery 41
Tabla 8-1 Resultados ensayos Creep And Recovery de muestra 1 y 2..... 43
Tabla B - 1 Comparación de metodología de ensayo para asfalto virgen, RAP y mezclas con RAP 59
Tabla B - 2 Propiedades del ligante asfáltico recuperado del RAP PG 82-10..... 62
Tabla B - 3 Temperaturas críticas estimadas del ligante asfáltico virgen..... 63
Tabla B - 4 Propiedades del ligante asfáltico virgen y recuperado del RAP..... 64
Tabla B - 5 Estimación del rango de porcentajes de RAP final 65
Tabla C - 1 Resumen del método SUPERPAVE..... 67
Tabla C - 2 Resultados de la temperatura alta del ensayo DSR-Original 68
Tabla C - 3 Resultados temperatura alta del ensayo DSR-HPDR..... 69
Tabla C - 4 Resultados de la temperatura intermedia del ensayo DSR-PAV..... 70
Tabla D - 1 Multiplicador para coeficiente de variación, ensayo Creep and Recovery 72
Tabla D - 2 Cálculos Ensayo Creep and Recovery, Betún 1, muestra 1..... 73
Tabla D - 3 Cálculos Ensayo Creep and Recovery, Betún 1, muestra 2..... 74
Tabla D - 4 Resumen de resultados Creep and Recovery, Tipo de betún 1 77
Tabla E - 1 Comparación del método experimental y oficial del estudio de una mezcla con RAP 83

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Comportamiento de viscoelástico del asfalto 5
Figura 2-2 Fenómeno de Relajación de esfuerzo 6
Figura 2-3 Rigidez para materiales elásticos y viscosos en el tiempo 7
Figura 2-4 Esfuerzo sinusoidal τ, deformación γ y δ ángulo de fase 8
Figura 2-5 Comportamiento viscoso y elástico 9
Figura 2-6 Respuesta esfuerzo-deformación para cargas dinámicas 10
Figura 2-7 Falla por ahuellamiento de calzada 12
Figura 2-8 Ahuellamiento por falla en sub-rasante 13
Figura 2-9 Ahuellamiento por falla de mezcla asfáltica 13
Figura 2-10 Deterioro por fatiga de calzada [33] 14
Figura 2-11 Falla por agrietamiento térmico en pavimentos 15
Figura 3-1 Reciclado en planta discontinua 19
Figura 3-2 Reciclado de tambor dentro de un tambor 20
Figura 3-3 Reciclado con alimentación dividida 20
Figura 3-4 Tambor mezclador con convección a baja temperatura 21
Figura 6-1 Valor promedio de G* obtenida en el equipo DSR a 31°C para las muestras de prueba 36
Figura 6-2 Valor promedio de G* obtenida en el equipo DSR a 22°C para las muestras de prueba 36
Figura 8-1 Comportamiento de G* sen (δ) en betunes envejecidos en PAV 42
Figura A - 1 Esquema del molde para la confección de la viga, BBR 53
Figura A - 2 Recipiente de extracción método AASHTO T319-15 55
Figura A - 3 Aparato de extracción y recuperación método AASHTO T319-15 56
Figura B - 1 Esquema Método para Determinar el grado de desempeño de una mezcla con RAP. 58
Figura B - 2 Esquema Método A para determinar el ligante asfáltico virgen en una mezcla con RAP 60
Figura B - 3 Esquema Método B para determinar el rango del porcentaje de RAP en una mezcla. 61
Figura B - 4 Alta temperatura del asfalto virgen 62
Figura B - 5 Temperatura intermedia del asfalto virgen 62
Figura B - 6 Temperatura baja del asfalto virgen 63
Figura B - 7 Porcentaje de RAP de la temperatura alta original y envejecida en HPDR 64
Figura B - 8 Porcentaje de RAP de la temperatura intermedia 64
Figura B - 9 Porcentaje de RAP de la temperatura baja 64
Figura D - 1 Grafico Creep and Recovery, Betún 1, muestra 1 75
Figura D - 2 Grafico Creep and Recovery, Betún 1, muestra 2 76
Figura D - 3 Resumen de grafico de resultados de Creep and Recovery de la muestra 1 y 2. 78
Figura E - 1 Detalles del tambor dentro de un tambor 80
Figura E - 2 Detalles de tambor mezclador con convección a baja temperatura 80
Figura E - 3 Planta asfáltica discontinua, Modelo LB4000, provisto por la empresa LYAOYUAN 81

Figura E - 4 Planta asfáltica discontinua, Modelo LB4000, provisto por la empresa LYAOYUAN 81
Figura E - 5 Planta asfáltica continua, Modelo SLB-8, provisto por la empresa LYAOYUAN..... 82
Figura E - 6 Planta asfáltica continua, Modelo SLB-8, provisto por la empresa LYAOYUAN..... 82

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1 Esfuerzo constante, Creep 6
Ecuación 2-2 Respuesta en Creep Deformación 6
Ecuación 2-3 Creep Compliance 6
Ecuación 2-4 Rigidez del asfalto en función del tiempo y temperatura 7
Ecuación 2-5 Módulo de corte dinámico 7
Ecuación 2-6 Relación del módulo elástico y de corte dinámico 7
Ecuación 2-7 Equivalencia del módulo elástico y corte dinámico 7
Ecuación 2-8 Fuerza dinámica aplicada 8
Ecuación 2-9 Esfuerzo sinusoidal 8
Ecuación 2-10 Deformación sinusoidal 8
Ecuación 2-11 Módulo complejo axial 9
Ecuación 2-12 Módulo complejo de corte dinámico 9
Ecuación 6-1 Temperatura crítica alta de la muestra original 32
Ecuación 6-2 Pendiente de la curva rigidez-temperatura, DSR 32
Ecuación 6-3Temperatura crítica alta de la muestra envejecida en HPDR 33
Ecuación 6-4 Temperatura crítica intermedia de la muestra envejecida en HPDR 33
Ecuación 6-5 Temperatura baja crítica respecto a su rigidez 33
Ecuación 6-6 Pendiente de la curva rigidez- temperatura, BBR 34
Ecuación 6-7 Temperatura baja crítica respecto a su valor m 34
Ecuación 6-8 Pendiente de la curva valor m – temperatura, BBR 34
Ecuación 6-9 Temperatura crítica del asfalto virgen 35
Ecuación 6-10 Porcentaje de RAP para cada temperatura crítica 35
Ecuación 7-1 Temperatura intermedia esperada 40

INDICE DE FOTOS

Foto A - 1 Copa abierta de Cleveland 50
Foto A - 2 Viscosímetro Rotacional de Brookfield 50
Foto A - 3 Horno Rotatorio de Película Delgada 51
Foto A - 4 Cámara de envejecimiento acelerado 51
Foto A - 5 Reómetro de Corte Dinámico 52
Foto A - 6 Reómetro de Viga en Flexión 52
Foto A - 7 Centrífuga AS-94 53
Foto A - 8 Centrífuga AS-07 54
Foto A - 9 Destilador Rotatorio 54

1 INTRODUCCION

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

El asfalto en la construcción de pavimentos ha conseguido una alta masificación en los últimos años, debido a sus características deseables de costo, rapidez de construcción y un singular comportamiento viscoelástico, estudiado por la ingeniería en varios países.

El método Superior Performing Asphalt Pavements desarrollado por la Strategic Highway Reasearch Program, busca minimizar los modos de falla típicos de los pavimentos asfálticos, tales como, el ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y térmico.

Mediante la clasificación por Grado de Desempeño se estudia el comportamiento de los ligantes asfálticos según las condiciones de carga y temperaturas locales, en donde se instalará el pavimento. Dicha clasificación fija criterios de falla constantes, entregando las temperaturas extremas e intermedias en que el ligante asfáltico puede alcanzar un desempeño favorable.

Los altos niveles de consumo de mezclas asfálticas en pavimentos, reflejan una sobreexplotación de canteras de áridos y grandes cantidades asfalto, provocando un agotamiento de los recursos y un daño ecológico.

En la actualidad es común ver en las obras de refuerzos o rehabilitación el empleo de procedimiento de fresado en capas asfálticas envejecidas, para ser repuestas por nuevas mezclas. Esta técnica da lugar a la generación de materiales con un alto potencial de reutilización, pero que en muchos casos son llevados a vertederos con el problema de impacto ambiental que esto supone.

Parece claro, que desde el punto de vista ambiental y de aprovechamiento de materiales, las técnicas de reciclado son altamente interesantes y beneficiosas para el ecosistema. Por esta razón el reciclado de mezclas asfálticas está siendo aplicado en algunos países del mundo.

Uno de los factores importantes de utilizar mezclas recicladas, es el ahorro económico que posee, el cual podría alcanzar un 25% que es equivalente a 7.000 [Tn/km] aproximadamente.

Generalmente el RAP que se utiliza es aquel que ha llegado al final de su vida útil, lo que implica que perdió prácticamente gran parte de sus propiedades mecánicas. Por ende existe la incertidumbre de cómo afecta la incorporación de RAP en una nueva mezcla.

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general de este trabajo se centra en estudiar la incidencia en las propiedades del asfalto CA-24 producido por una empresa chilena, al incorporar dos dosificaciones de RAP en dos mezclas con banda IV-A-12.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS DEL ESTUDIO

- Verificar la clasificación por Grado de Desempeño SUPERPAVE del asfalto CA-24.
- Determinar la incidencia en las propiedades reológicas del asfalto reciclado en el ligante de una mezcla IV-A.12.
- Aprender a utilizar los equipos para clasificar un ligante por Grado de Desempeño en base al método SUPERPAVE, para poder ejecutar los ensayos y analizar los resultados entregados.
- Aprender a utilizar los equipos para recuperación del ligante asfáltico de una mezcla para poder ejecutar los ensayos SUPERPAVE a temperatura intermedia y baja temperatura.
- Determinar el comportamiento a altas temperaturas del ligante asfáltico CA-24 ante ciclos de carga-relajación mediante el ensayo Creep and Recovery.

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO

Para analizar los ensayos se consideraron condiciones de carga y temperatura típicas de la zona centro y sur de Chile, específicamente tramos comprendidos entre la cuarta y la décima región. La frecuencia usada en el DSR se estableció de forma que sea representativa para los rangos de velocidad que simulan los 90 [Km/hr].

Para analizar la falla de ahuellamiento mediante el ensayo de Creep and Recovery se escogió una temperatura de 64°C, que corresponde a la temperatura alta del Grado de Desempeño obtenido en la clasificación del ligante CA-24.

1.4 METODOLOGIA DE TRABAJO

Para desarrollar el estudio y alcanzar los objetivos planteados anteriormente se ha implementado la siguiente metodología de trabajo:

- Estudio Bibliográfico:
  - Comportamiento de betunes asfálticos.
  - Revisión de normas para la correcta ejecución de los ensayos.
  - Investigación de la aplicación de RAP en mezclas nuevas de pavimentos.

- Ejecución experimental de los ensayos SUPERPAVE para la obtención de la clasificación PG, en base a la norma ASTM y el Manual de Carreteras vigente.
- Análisis de resultados e interpretación.
- Conclusiones generales.

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La presente memoria está estructurada en 10 capítulos, que son:

- Capítulo 1:

  Introducción, breve reseña de la presente memoria.

- Capítulo 2:

  Se da a conocer las características y comportamiento reológico del asfalto, los tipos de betún existentes en Chile y los modos de falla críticos de los pavimentos.

- Capítulo 3:

  Se da a conocer el término de asfalto reciclado, ventajas del uso del RAP, el método en el cual se emplea en chile y el nivel de desarrollo en el mundo.

- Capítulo 4:

  Se describe los procedimientos correspondientes a los ensayos de clasificación por Grado de Desempeño.

- Capítulo 5:

  Se resumen los métodos y procedimientos sobre las normas chilenas y AASHTO de recuperación de ligante asfaltico.

- Capítulo 6:

  Se describe los métodos y procedimientos que se aplica a los pavimentos asfálticos reciclados para su caracterización por Grado de Desempeño en base a los estudios impuestos por la SHRP y las normativas vigentes AASTHO y ASTM.

- Capítulo 7:

  Se describe la fase experimental, presentando las condiciones, metodologías y resultados obtenidos en los ensayos efectuados en el Reómetro de Corte Dinámico y Reómetro de Viga en Flexión.

- Capítulo 8:

  Se analizan y comparan los resultados de los ensayos SUPERPAVE de los tres ligantes asfálticos.

- Capítulo 9:

  Se presentan las conclusiones finales del estudio.

- Capítulo 10:

  Referencias.

2 GENERALIDADES DEL ASFALTO

2.1 ASFALTO

El asfalto es un material de color marrón oscuro a negro, compuesto generalmente por betún. El asfalto puede ser de origen natural u obtenido por refinación del petróleo. Cuando es de procedencia natural, mediante el proceso de evaporación de las fracciones volátiles queda solamente las moléculas más pesadas del ligante, formando lagos sobre la superficie terrestre o podría impregnarse en los poros de las rocas, creando así rocas asfálticas. También puede ser encontrado mezclado con elementos minerales, como la arena y arcilla, teniendo que ser sometidos a procesos de purificación para posteriormente ser utilizados en la ejecución de productos.

El petróleo es extraído de los pozos y fraccionado en una refinería, por un proceso llamado destilación, para posteriormente ser refinados transformado una parte de él en asfalto.

Al asfalto del petróleo se le conoce como material bituminoso, porque está compuesto en gran parte por un hidrocarburo soluble en bisulfuro de carbono (CS2) denominado betún, por esta razón es denominado betún asfáltico. El betún asfáltico destinado a la producción de mezcla para pavimento es llamado asfalto de pavimento o cemento asfáltico.

El asfalto derivado del petróleo puede ser clasificado por su proporción de asfalto, que es:

- Petróleo crudo en base asfáltica.
- Petróleo crudo en base parafínica (no contienen asfalto, sólo parafina).
- Petróleos crudos en base mixta (contienen parafina y asfalto).

Debido a sus propiedades de durabilidad, impermeabilidad, dureza, adhesividad, economía, capacidad de mezclarse con agregados minerales y resistencia a la reacción con ácidos, álcalis y sales, forma una mezcla con agregado mineral, donde el asfalto se comporta como un adhesivo o ligante, brindando estabilidad y durabilidad a la mezcla.

Sin embargo, el asfalto es un material cuyas propiedades mecánicas varían en un amplio rango dentro de sus límites de aplicación, ya que es un producto muy sensible a ciertos factores como: la temperatura, velocidad de aplicación de carga, duración de la carga, origen, métodos de refinación y estado de envejecimiento. Todos estos factores influyen en que el asfalto sea un producto con un comportamiento muy complejo y que se debe a su naturaleza orgánica, la cual incide en la variación de sus propiedades físicas y mecánicas, comportándose desde un material elástico y frágil hasta un líquido newtoniano de variable consistencia o presentar un conjunto de ambos comportamientos.

2.2 COMPORTAMIENTO REOLOGICO DEL ASFALTO

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales. Su meta es la predicción del sistema de fuerzas necesario para causar una determinada deformación o flujo o bien predecir la deformación resultante a partir de la aplicación de un sistema de fuerzas.

Dado que el asfalto es muy susceptible frente a los cambios de temperatura su comportamiento varía bajo ciertos niveles. A altas temperaturas el asfalto se comporta como un fluido siguiendo la ley de Newton y su respuesta corresponde a un material viscoso, donde una vez cesada la carga aplicada no se recupera su deformación. En cambio a bajas temperaturas (menor a 5°C) el betún se comporta como un material elástico y sigue las reglas de la ley de Hooke, donde su deformación se recupera completamente una vez que se deja de aplicar carga. Pero generalmente en la práctica el asfalto trabaja a temperaturas intermedias y posee un comportamiento viscoelástico, donde un porcentaje de la deformación se recupera y otra se deforma permanentemente.

En la Figura 2-1 se aprecia el comportamiento viscoelástico del asfalto, cuando es sometido a una carga constante durante un tiempo determinado. Se identifican todas las componentes de la deformación resultante y como éstas se comportan en el tiempo, aun cuando la carga ha sido retirada. En el instante cuando se comienza a aplicar la carga existe una deformación inmediata que se divide entre la deformación elástica y la deformación plástica. A medida que transcurre el tiempo de carga la deformación aumenta progresivamente a una tasa decreciente, esta deformación es conocida como viscoelástica la cual se recupera de forma gradual en el tiempo hasta alcanzar un nivel de deformación irreversible.

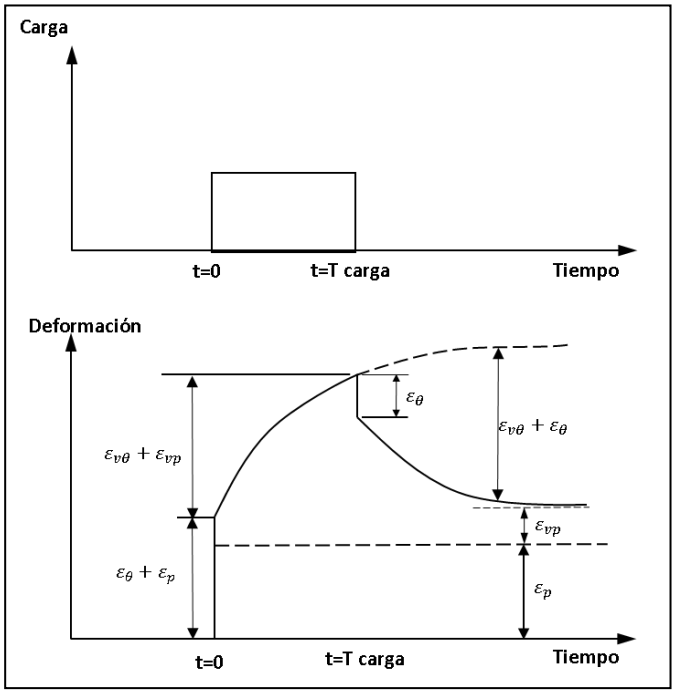

Figura 2-1 Comportamiento de viscoelástico del asfalto

2.3 VISCOELASTICIDAD EN EL DOMINIO TEMPORAL

Para un material viscoelástico como el asfalto, en el dominio temporal se observan dos fenómenos: un incremento de la deformación ante la aplicación de un esfuerzo constante (respuesta en Creep) y la disminución de los esfuerzos ante la aplicación de una deformación constante (relajación de esfuerzo).

La respuesta en Creep se describe en las Ecuaciones 2-1 y 2-2.

$$\sigma(t) = \sigma_0$$

Ecuación 2-1 Esfuerzo constante, Creep

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_c(t)$$

Ecuación 2-2 Respuesta en Creep Deformación

Donde σ_0 es el esfuerzo constante, ε_e representa la deformación elástica que no varía con el tiempo y $\varepsilon_c(t)$ corresponde a la deformación en Creep, la cual varía en el tiempo. La relación de la Ecuación 2-3, es conocida como Creep Compliance.

$$C(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$$

Ecuación 2-3 Creep Compliance

El fenómeno de relajación de esfuerzo se aprecia en la Figura 2-2. Donde se aprecia que una deformación constante no implica un esfuerzo constante, sino que el esfuerzo decrece con el tiempo.

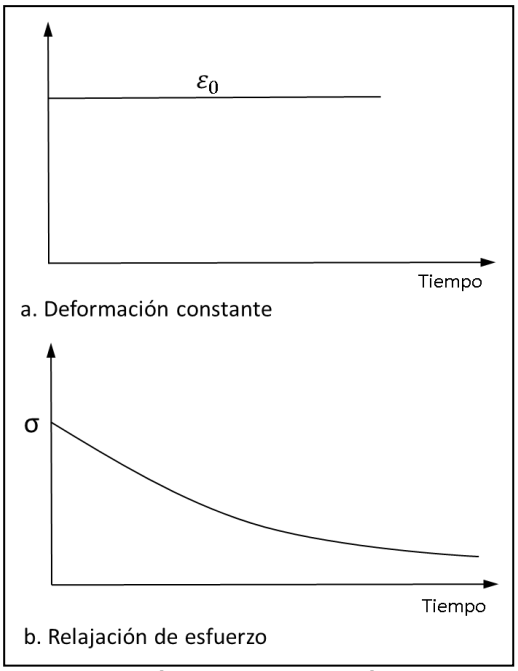

Figura 2-2 Fenómeno de Relajación de esfuerzo

Debido a la naturaleza del asfalto, la rigidez dependerá tanto del tiempo de carga como tambien de la temperatura. Por lo tanto, es necesario definir su tiempo y temperatura para poder medir la rigidez, como muestra la Ecuación 2-4.

$$S(t,T) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t,T)}$$

Ecuación 2-4 Rigidez del asfalto en función del tiempo y temperatura

En el método SUPERPAVE, la forma más directa de determinar la rigidez del asfalto es mediante el Reómetro de Viga en Flexión, pero también puede ser obtenida en el Reómetro de Corte Dinámico a partir de módulo de corte dinámico, G*, el cual se define por la razón entre la amplitud del esfuerzo de corte, (ω), y la deformación angular, como se muestra en la Ecuación 2-5.

$$G^*(\omega) = \frac{\tau(\omega)}{\gamma}$$

Ecuación 2-5 Módulo de corte dinámico

El módulo elástico y de modulo complejo de corte dinámico están relacionados por la Ecuación 2-6.

$$E(\omega) = 2(1+\mu)G^*(\omega)$$

Ecuación 2-6 Relación del módulo elástico y de corte dinámico

Dónde μ es el coeficiente de Poisson, el cual puede ser asumido para el asfalto como 0,5, quedando la expresión anterior como muestra la Ecuación 2-7.

$$E(\omega) \approx 3G^*(\omega)$$

Ecuación 2-7 Equivalencia del módulo elástico y corte dinámico

La Figura 2-3, define la relación y comportamiento de rigidez para materiales elásticos y viscosos, en el tiempo.

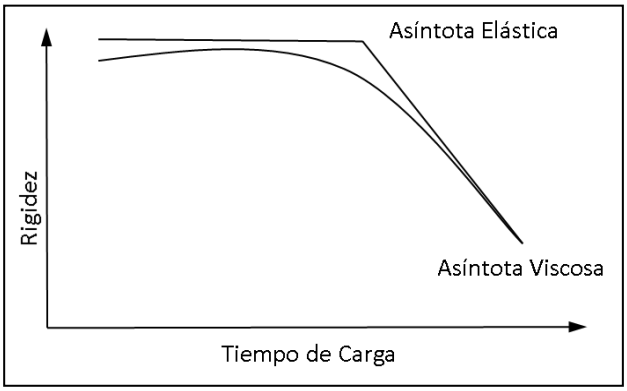

Figura 2-3 Rigidez para materiales elásticos y viscosos en el tiempo

2.4 VISCOELASTICIDAD EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

La ventaja de los ensayos dinámicos es que permiten simular el paso de un vehículo a alta velocidad sometiendo una muestra a carga sinusoidal. Pero este tipo de ensayos posee problemas asociados a la precisión, condiciones medioambientales, sensibilidad y estabilidad de los instrumentos.

En los ensayos dinámicos se aplica una fuerza externa de amplitud constante a una muestra de material viscoelástico. La fuerza contiene una sola frecuencia y se representa por la Ecuación 2-8.

$$T = T_0 \cos(\omega t)$$

Ecuación 2-8 Fuerza dinámica aplicada

El termino T_0 es la amplitud del torque y ω corresponde a la frecuencia angular.

Por la aplicación de esta fuerza, una oscilación estacionaria es inducida en la muestra de ensaye, que tendrá la misma frecuencia de la fuente. La oscilación estará presente durante la aplicación de carga. El esfuerzo queda descrito en la Ecuación 2-9.

$$\tau = \tau_0 \cos(\omega t)$$

Ecuación 2-9 Esfuerzo sinusoidal

Donde τ_0 es la amplitud del esfuerzo y ω es la frecuencia angular de oscilación forzada.

Si el material es viscoelástico lineal y el esfuerzo aplicado es sinusoidal, entonces la deformación también será una sinusoidal con la misma frecuencia que el esfuerzo pero con un ángulo de fase, δ cuya expresión queda definida en la Ecuación 2-10. Está conducta se representa en la Figura 2-4.

$$\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t - \delta)$$

Ecuación 2-10 Deformación sinusoidal

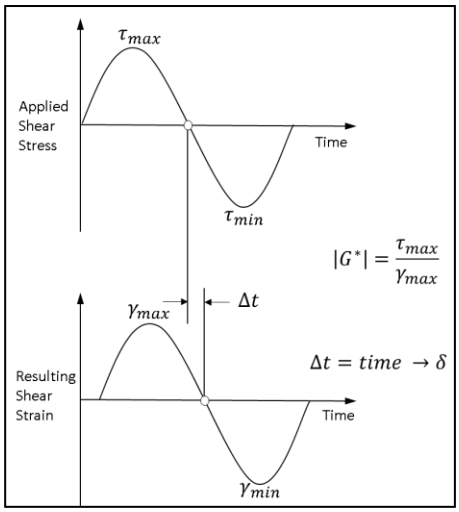

Figura 2-4 Esfuerzo sinusoidal τ, deformación γ y δ ángulo de fase

En los ensayos de carga dinámica se obtiene la rigidez a través del módulo complejo axial y el módulo complejo de corte:

- Módulo complejo axial.

Este módulo corresponde a la resistencia total a la deformación que tiene la muestra cuando es sometida a una carga axial repetitiva, a una frecuencia determinada. Se define como la razón entre la amplitud del esfuerzo axial aplicado y la amplitud de la deformación unitaria, como indica la Ecuación 2-11.

$$|E^*| = \left|\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right|$$

Ecuación 2-11 Módulo complejo axial

- Módulo complejo de corte dinámico.

Corresponde a la resistencia total a la deformación que ejerce la muestra cuando es sometida a una carga de corte sinusoidal. Este módulo incluye tanto la parte elástica y viscosa. Se define por la razón entre la amplitud del esfuerzo de corte y la amplitud de la deformación total de corte, como indica la Ecuación 2-12.

$$|G^*| = \left|\frac{\tau_0}{\gamma_0}\right|$$

Ecuación 2-12 Módulo complejo de corte dinámico

El módulo complejo de corte dinamico pueden ser descompuesto en su componente viscosa y elástica, dependiendo del ángulo de desfase que posee entre las ondas de esfuerzo aplicadas y deformación. La parte elástica del esfuerzo aplicado se conoce como módulo de almacenamiento y la parte viscosa como módulo de pérdida . Ambos son indicadores del grado de elasticidad o viscosidad del betún asfáltico. La Figura 2-5 muestra dos modulos de corte dinamico iguales pero distintos angulos de face, lo que implica que un asfalto sea mas viscoso y menos elastico que el otro.

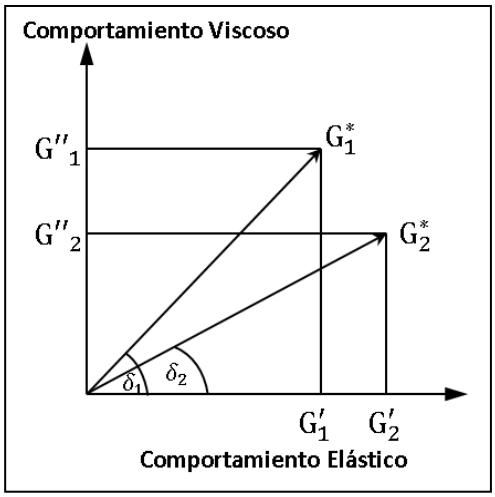

Figura 2-5 Comportamiento viscoso y elástico

Los valores de G* y δ son valores altamente dependientes de la temperatura y frecuencia de carga, a altas temperaturas o bajas frecuencias de carga,el asfalto se comporta como un líquido viscoso con una pequeña capacidad para recuperarse de las deformaciones, por lo tanto, su ángulo de fase queda cercano a 90°. A bajas temperaturas o altas frecuencias de carga, el asfalto se comporta como un sólido elástico, con la capacidad de recuperarse completamente, su ángulo de fase sera 0°. La Figura 2-6 ,muestra la respuesta del asfalto cuando se comporta de forma elastica o viscosa.

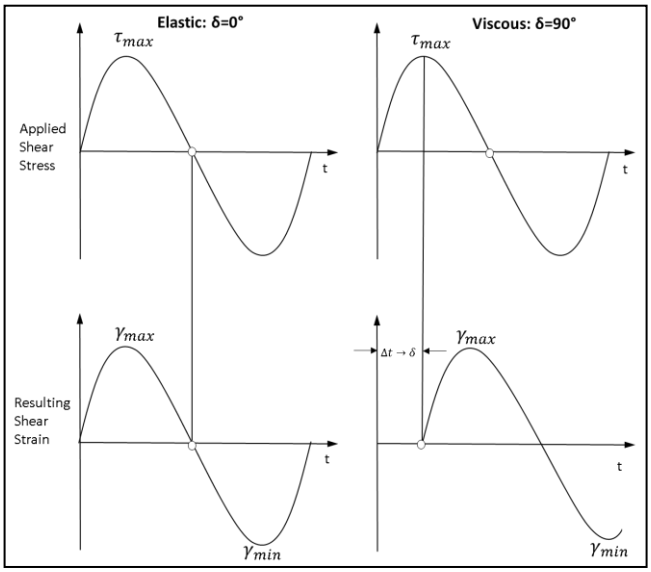

Figura 2-6 Respuesta esfuerzo-deformación para cargas dinámicas

2.5 SUSCEPTIBILIDAD DEL ASFALTO.

2.5.1 Efecto de la Temperatura y frecuencia de carga.

Un aumento en la temperatura (> 60°C) del asfalto es equivalente a disminuir la frecuencia de carga. En verano o en zonas desérticas o cuando es sometido a cargas sostenidas como vehículos a baja velocidad, el betún asfáltico tendrá un comportamiento de líquido viscoso.

De manera análoga una disminución en la temperatura es similar a un aumento en la frecuencia de carga, como es el caso de climas fríos, invierno o cuando el asfalto está bajo cargas rápidas como un vehículo a alta velocidad. El betún posee un comportamiento de sólido elástico, es decir, se deforma a ser cargado pero al retirar la carga vuelve a su estado original. Pero a muy bajas temperaturas el asfalto se transforma en un material demasiado frágil y tiende a agrietarse ante la aplicación de una carga. Pero en general el asfalto está presente en el pavimento a temperaturas intermedias en donde presenta un comportamiento mixto.

Dentro de una mezcla asfáltica el efecto que posee la temperatura y el tiempo de carga en el asfalto es de suma importancia, ya que al momento de mezclar y compactar el betún a altas temperaturas funciona como un lubricante facilitando ambos procesos. Al disminuir la temperatura, el betún actúa como pegamento para mantener unidos los agregados.

2.5.2 Efecto de envejecimiento

El asfalto es muy reactivo al oxígeno, lo que implica que este material se oxide generando cambios en la estructura y composición de las moléculas del betún, formando un material más frágil y duro. Este fenómeno de oxidación generalmente ocurre a un ritmo lento en los pavimentos, pero si el pavimento posee una mala compactación o el clima donde está instalado el pavimento es cálido, ocurre de manera temprana. Por este motivo los pavimentos de mayor vida útil poseen una mayor susceptibilidad al agrietamiento.

Durante la vida del pavimento, su más alto nivel de oxidación se da en la planta de mezclado donde se combinan con los agregados a altas temperaturas por tiempos prolongados, provocando un proceso de oxidación más acelerado que en el medio ambiente.

Otros factores importantes que afectan al envejecimiento, son la volatilización y el endurecimiento físico. La primera ocurre durante el proceso de mezclado y construcción, cuando las componentes del asfalto tienen a evaporarse provocando que el asfalto se vuelva más rígido. La segunda ocurre cuando el asfalto se coloca a bajas temperaturas (generalmente, <0°C), por periodos de tiempo prolongados.

El envejecimiento de la mezcla asfáltica se clasifica en dos etapas:

- Envejecimiento primario:

  Corresponde al envejecimiento que ocurre durante el proceso de mezclado en planta, almacenamiento y compactación de la mezcla asfáltica., donde a altas temperaturas las componentes más volátiles del asfalto se evaporan. Este procedimiento se simula en laboratorio al realizar el método chileno 8.302.33 del Manual de Carretera, Volumen 8 [4] o internacional ASTM D2872-12 [9], utilizando el Horno rotatorio de película delgada (HPDR).

- Envejecimiento secundario:

  Corresponde al envejecimiento que sufre el asfalto durante la vida de servicio del pavimento. El cual está ligado a las condiciones ambientales que afecten al pavimento y por la oxidación de los vacíos de aire presenten en la mezcla asfáltica. Este efecto se simula en laboratorio al realizar el método de ensaye chileno 8.302.23 del Manual de Carretera, Volumen 8 [4] o internacional ASTM D6521-13 [10], utilizando la cámara de presión de envejecimiento acelerado (PAV).

2.6 TIPOS DE BETUNES ASFALTICOS

En Chile existen dos tipos de ligante asfáltico que son utilizados en mezclas para pavimentos. Estos son:

2.6.1 Asfaltos Tradicionales

Los asfaltos tradicionales son obtenidos generalmente mediante procesos de destilación del petróleo. Las características de éstos dependen de las operaciones de refinería y de la composición química que posea el petróleo. Algunos se obtienen en

base a procesos de soplado, donde se somete a temperaturas entre 240°C a 320°C de manera de transformar elementos de su estructura molecular y así obtener un residuo con mayor rigidez y menor susceptibilidad térmica.

2.6.2 Asfaltos Modificados

Los asfaltos modificados se forman en base a betunes tradicionales, a los cuales se les incorporan aditivos y procesos en planta determinados, de manera de obtener un comportamiento específico y contribuyan a aumentar la resistencia del asfalto ante ciertos tipos de deterioros en los pavimentos. Por ejemplo, si se quiere prevenir la falla por deformación permanente, se debe utilizar un modificador que permita aumentar la rigidez del betún a temperaturas altas de servicio.

Según la Clasificación PG, cuando la diferencia entre la temperatura más alta (PG-XX) y la temperatura más baja (PG-YY) esperada en el pavimento es mayor que 92°C, se deben utilizar asfaltos modificados.

Los tipos de elementos modificadores son variados, e incluyen la utilización de polímeros, fibras, procesos especiales de refinación, entre otros.

2.7 MODOS DE FALLA CRITICOS DE LOS PAVIMENTOS

2.7.1 Ahuellamiento

El ahuellamiento en el pavimento asfáltico se produce por la excesiva acumulación de deformación plástica. La principal característica, de si un pavimento sufre o no ahuellamiento están dadas por las propiedades de la mezcla y su granulometría, pero las propiedades del betún también juega un papel importante. La Figura 2-7 muestra un ejemplo de falla por ahuellamiento.

Figura 2-7 Falla por ahuellamiento de calzada [33]

En una calzada con altos niveles de acumulaciones de carga, es más conveniente colocar un asfalto modificado con polímeros que uno tradicional, ya que estos están diseñados para mejorar la resistencia de la mezcla asfáltica ante este deterioro.

El ahuellamiento es ocasionado por problemas estructurales más que materiales y siendo más común un espesor insuficiente en el diseño de la calzada, ya que no se logra reducir los esfuerzos a niveles que la base y sub-base puedan tolerar. En general, este tipo de ahuellamiento es producido en capas inferiores del pavimento y no en su carpeta asfáltica.

Cuando el ahuellamiento es producido en la sub-rasante esta absorbe la deformación irrecuperable y las capas superiores tienden a reflejar la deformación, como se muestra en la Figura 2-8.

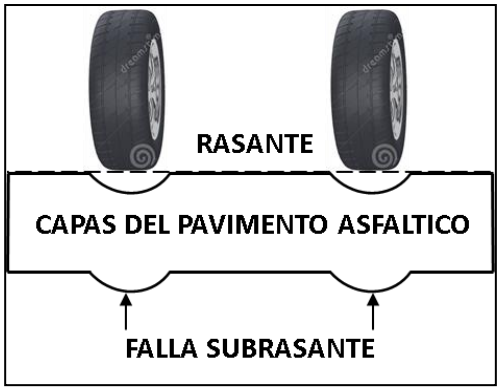

Figura 2-8 Ahuellamiento por falla en sub-rasante

Si el ahuellamiento tiene lugar en su carpeta asfáltica se ve influenciada por las propiedades del betún, debido a la acumulación de deformación permanente en la carpeta asfáltica, por una respuesta insuficiente a los esfuerzos de corte, generando desplazamientos laterales y verticales de la mezcla asfáltica, como se muestra en la Figura 2-9.

Figura 2-9 Ahuellamiento por falla de mezcla asfáltica

El ahuellamiento se ve intensificado en las estaciones de primavera o verano y cuando el tráfico vehicular que circula lo hace a baja velocidad.

Gran parte de la resistencia al ahuellamiento está relacionada con el agregado mineral y su granulometría. Sin embargo es importante estudiar y mejorar la parte proporcionada por el ligante asfáltico con el objetivo de aumentar la cohesión y evitar el inicio de la deformación permanente

Una forma de disminuir la acumulación de deformaciones plásticas, es asegurar que el ligante asfaltico tenga la resistencia para soportar los esfuerzos de corte inducidos por las cargas de tráfico. Para ello se busca que el ligante sea duro y con un comportamiento elástico a temperaturas relativamente elevadas, para que el asfalto sea capaz de recuperarse.

Otra forma de aumentar la resistencia al ahuellamiento en la mezcla asfáltica es usar agregados pétreos que posean un alto grado de fricción interna, que se relaciona con la rugosidad de las partículas y con una buena granulometría, mejorando así su trabazón interna.

2.7.2 Agrietamiento por fatiga

El agrietamiento por fatiga, se relaciona con las excesivas repeticiones de carga de tráfico o debido a que éstas son más pesadas que las de diseño del pavimento. Se produce a temperaturas intermedias de servicio y consiste en agrietamiento de la carpeta asfáltica en el sector donde los vehículos ejecutan el contacto con el pavimento asfáltico.

Este tipo de falla tiende a ocurrir en etapas tardías de la vida de servicio del pavimento, dado que el asfalto se hace más rígido. Por ello para poder estudiar el ligante en etapa a finales de su vida útil SUPERPAVE creó equipos apropiados para simular el envejecimiento a corto y largo plazo.

La manera de identificar la aparición de este deterioro consiste en la formación de pequeñas fisuras longitudinales en la superficie del pavimento que dejan los vehículos al circular. Estas pequeñas grietas con el tiempo comenzaran a unirse formando el deterioro tipo ‘’piel de cocodrilo’’, donde finalmente por la acción del clima y del tráfico, estos bloques son removidos o desintegrados creando “baches”. La Figura 2-10 muestra un ejemplo de este deterioro.

Figura 2-10 Deterioro por fatiga de calzada [33]

Las principales causas del agrietamiento por fatiga son: la presencia de cargas cíclicas de tráfico, en conjunto con un mal drenaje de la sub-base, que genera un pavimento más blando y con una alta deflexión en la carpeta. Por otro lado, un pavimento con un mal diseño o mal construido puede sufrir grandes deformaciones cuando es sometido a cargas de tráfico.

Una forma de prevenir la aparición del agrietamiento por fatiga es tener una ejecución adecuada del diseño de drenaje de la sub-base, como también estimar de manera adecuada las solicitaciones de tráfico del sector.

Para la construcción de mezclas es importante usar una selección adecuada de materiales que resistan grandes deformaciones. Por ello el asfalto elegido debe ser elástico con un ángulo de fase adecuado que asegure la recuperación de la deformación y resistir las solicitaciones de tráfico.

Por último es importante utilizar materiales que no pierdan sus propiedades mecánicas ante la presencia de humedad. Existen casos extremos donde las capas intermedias pueden separarse del agregado pétreo, manifestándose como agrietamiento por fatiga o simplemente la posibilidad que la humedad se acumule en las bases granulares, que en conjunto con un exceso de material fino, dificultan el drenaje de la estructura, lo que repercute en un debilitamiento en las capas inferiores causando daños en las capas superiores.

2.7.3 Agrietamiento térmico

Este tipo de falla es provocada, debido a una disminución en la temperatura que producen esfuerzos de tracción en las capas asfálticas del pavimento, formando grietas transversales que se encuentran relativamente equidistantes entre sí. La principal causa de este deterioro es producido a temperaturas de servicio muy bajas y en asfaltos con alta susceptibilidad térmica o en betunes que muestran altos índices de rigidez a bajas temperaturas. La Figura 2-11 representa un caso clásico de falla por agrietamiento térmico.

Figura 2-11 Falla por agrietamiento térmico en pavimentos [34]

El agrietamiento a bajas temperaturas aparte de producir tensiones internas en la carpeta asfáltica, produce un endurecimiento que reduce la capacidad de deformación del ligante. Es más susceptible su aparición en lugares donde el asfalto es sometido a una temperatura más baja que la crítica, o bien por un ciclo repetido de ascenso y descenso de temperatura.

Los asfaltos envejecidos son propensos a sufrir este tipo de deterioro. Por lo tanto, es recomendable prevenir usando asfaltos menos rígidos y mezclas con menor contenido de vacíos para evitar una excesiva oxidación.

3 INCORPORACIÓN DE RAP EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

El RAP se utiliza para ser mezclado con nuevas mezclas asfálticas mediante un tratamiento. Su objetivo es formar una mezcla de pavimento asfáltico donde no se vea alterada su resistencia a la acción del agua, ahuellamiento, agrietamiento térmico y fatiga.

Hoy en día la reutilización de pavimento asfáltico en la construcción de carreteras, es parte de la agenda industrial en algunos países. La razón que impulsa el reciclado o re uso de materiales en el ámbito vial, incluyendo las mezclas asfálticas se resume en:

- Restricción creciente en el uso de materiales vírgenes.
- Viabilidad técnica; existen diferentes técnicas de comprobado comportamiento, con creciente calidad en el material final y convenientes relaciones costo/efectividad que aseguran un buen producto final.
- Reducción y optimización de recursos para la administración de carretera.
- Legislación restrictiva, generalmente medioambientales.

Dentro de las principales ventajas de reciclar pavimento asfáltico, es el bajo costo de construcción y mantención de los caminos y carreteras.

En términos energéticos, todos los procesos de explotación y transporte asociados a la extracción de materias primas utilizadas para crear una nueva mezcla bituminosa se ven reducidos. Por esta causa las ventajas de reciclar también son ambientales, ya que se evita la explotación indiscriminada de agregados pétreos y asfalto, como también se reduce el volumen de pavimento asfáltico en botaderos.

Otro aspecto positivo del RAP tiene relación a la disminución en los tiempos de intervención de caminos, reduciendo los plazos de trabajos, ejecutándose de manera más rápida y eficiente, debido a reducción en los plazos de fabricación y transporte.

Cuando se emplea RAP en una mezcla asfáltica en caliente el producto final puede presentar características mecánicas distintas a las de una mezcla confeccionada con materiales vírgenes. Algunos autores plantean que el comportamiento de la mezcla asfáltica con tasas de hasta un 30% de RAP presenta un comportamiento similar al de una mezcla convencional. Sin embargo otros, concluyen en sus investigaciones que existe una pérdida de cohesión y propiedades mecánicas de la mezcla. Estudios revisados sobre mezclas asfálticas con altas tasas de RAP no entregan pautas claras sobre el comportamiento de este tipo de mezcla, debido a la variabilidad en sus resultados.

Existen diversos tipos de clasificación de pavimento asfáltico reciclado, entre ellos se destacan los siguientes:

- Según donde se realiza: In Situ (en el lugar) o en Planta.
- Según la Temperatura de trabajo: En frío o en caliente.

Dentro de los tratamientos utilizados In situ, en la actualidad se destacan tres tipos que son el termoreperfilado, termoregeneraccion y termoreciclado. Para efectos de esta memoria se explicará el sistema en planta en Caliente el cual es el proceso que se simuló en laboratorio al momento de crear las Mezclas asfálticas con RAP.

En Chile las MAC con RAP se han incorporado y hasta la fecha se sabe que se ejecutaron dos tramos de prueba con la combinación de ambas mezclas. El primero en el "sector de Orozco, Quilpué entre el tramo DM 17.578,35 a DM 29.497,99, provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso" [29]., la cual consistía en una mezcla IV-A-12 con 20% de RAP. Se conformó una estructura de calzada de 3,5 [m] de ancho que está compuesta por una carpeta de rodado con 50 [mm] de espesor donde se usó la mezcla asfáltica con RAP, 9 [cm] de espesor de binder con mezcla tradicional sobre 29 [cm] de capa granular.

El segundo tramo está ubicado en el "camino Cruce Ruta G-78-(Malloco)-Cruce G-78 (Puangue), Rol, G-78" [29]. En cuya mezcla también fue incorporado un 20% de RAP.

3.1 EXTRACCIÓN DE MATERIAL RECICLADO Y PROCESO DE TRATAMIENTO EN PLANTA.

La procedencia del material recuperado puede ser por:

- Fresado de pavimentos asfálticos:
- Trozos de demolición de pavimentos asfálticos.
- Excesos de producción en planta.

El RAP antes de ser incorporado en la mezcla asfáltica es procesado en una planta de áridos para poder ser separado en al menos dos fracciones, una gruesa y otra fina. La fracción gruesa corresponde al agregado que pasa por el tamiz N° 3/4'', mientras que la parte fina corresponde al material que pasa bajo el tamiz N° 3/8''. Se debe determinar la granulometría y contenido de asfalto, para cada fracción, por lo cual se considera un muestreo luego de la separar ambas fracciones. Los controles en ningún caso son inferiores a uno por cada fracción de 600 [m^3] procesados y su cantidad mínima de muestra es de 10 [kg], obtenida en base a un cuarteo de acuerdo a la norma chilena 8.202.1 y 8.202.2 establecida en el Manual de Carreteras, Volumen 8 [4]. Los ensayos para la caracterización del RAP estas descritos en base a las pistas de prueba ejecutadas por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas [29] y son los siguientes:

Para caracterizar el agregado del RAP deben ser:

- Granulometría: 8.202.3 Manual de Carreteras, Volumen 8 [4].
- Densidad Aparente: 8.202.19 Manual de Carreteras, Volumen 8 [4].
- Densidad Real, Neta y Absorción: 8.202.20, 8.202.21 y 8.302.37 Manual de Carreteras, Volumen 8 [4].

Para el caso de la caracterización del cemento asfáltico se debe analizar:

- Porcentaje de asfalto: 8.302.36 Manual de Carreteras, Volumen 8 [4].
- Ligante recuperado: 8.302.36 y 8.302.58 Manual de Carreteras, Volumen 8 [4].

Bajo esta misma causa en Chile se establecen limitaciones y requisitos para el uso del RAP, que son:

- El tamaño máximo del RAP debe ser igual al tamaño máximo del árido de la mezcla.

- El porcentaje de cemento asfáltico que posee el RAP debe ser mayor a 3,0% de lo contrario debe considerarse solo como un árido más dentro de la mezcla.
- La temperatura a la cual se debe calentar el RAP corresponde al mismo rango considerado para los áridos.
- El RAP es un árido más dentro de la mezcla, tomando en cuenta el porcentaje de asfalto que posee.
- Si se incorpora entre 10% y 20% de RAP en la mezcla, el material debe ser cortado en dos fracciones con el fin de tener mayor control sobre los acopios y la correcta caracterización de cada fracción de RAP y su contenido de asfalto.
- Si la procedencia del RAP es única y se conoce la trazabilidad de producción, es posible incorporar más de un 20% de RAP en la mezcla.
- Si se incorpora más de un 20% de RAP en la MAC, el material se debe cortar en tres o más fracciones para tener mayor control sobre los acopios y la correcta caracterización de cada fracción de RAP y su contenido de asfalto.

Si se utiliza un porcentaje menor a 10% de RAP en la mezcla se caracteriza sólo el cemento asfáltico virgen. De lo contrario, se caracteriza el ligante resultante de la combinación del cemento virgen con el recuperado de acuerdo al porcentaje de RAP que se adiciona a la mezcla.

Luego de que el pavimento asfáltico reciclado es estudiado y clasificado, se incorpora a la mezcla asfáltica en caliente por medio de distintos procedimientos en planta.

3.2 SISTEMA EN PLANTA EN CALIENTE

El reciclado de mezcla asfáltica en planta en caliente consiste en la reutilización de mezclas bituminosas retiradas de capas envejecidas, realizando un tratamiento al RAP en la planta de fabricación de mezcla. En este tratamiento se añade a las mezclas antiguas otro árido y ligante nuevo y/o a veces un agente rejuvenecedor para el asfalto. Esta mezcla asfáltica fabricada debe cumplir con las mismas prescripciones exigidas a las mezclas bituminosas en caliente convencionales.

En términos prácticos, el proceso se resume en: retirar las mezclas de la carretera de dos maneras. Si se trata de la eliminación completa del conjunto del pavimento se retira en forma de bloques, extraídos con palas, martillos neumáticos o masas de caída libre. Si solo se quiere eliminar una parte de la capa bituminosa se ejecuta el procedimiento de fresado. El material retirado es trasladado a una planta de fabricación de mezclas bituminosas en la que, después de un eventual proceso de machaqueo y de una clasificación granulométrica, se mezcla con una nueva MAC, así como agentes rejuvenecedores, obteniéndose una mezcla bituminosa compuesta en parte por el material reciclado y destinada normalmente para capas inferiores y arcenes, aunque en ocasiones también para capa de rodadura.

La ejecución de una mezcla bituminosa reciclada en planta en caliente contiene las siguientes operaciones hasta su colocación en terreno:

1. Acopio de material procedente de pavimentos bituminosos envejecidos.
2. Tratamiento del material bituminoso a reciclar en bruto.
3. Caracterización y acopio del material bituminoso a reciclar tratado.
4. Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.
5. Fabricación de la mezcla de acuerdo con la fórmula de trabajo.
6. Transporte de la mezcla al lugar de empleo.
7. Preparación de la superficie sobre la que se va a extender la mezcla.
8. Extensión y compactación de la mezcla.

La fabricación de mezclas en caliente con aportación de material reciclado puede realizarse en ambos tipo de planta (con tambor mezclador o discontinua). En el caso de plantas con tambor mezclador se debe tener especial cuidado en evitar el contacto del material fresado con la llama del quemador del tambor secador. Para ello se pueden utilizar plantas con tambores continuos de manera que los áridos se calienten y seque en el primer tambor y el RAP se incorpora en el segundo. En plantas de tambor secador mezclador suelen disponer de un anillo intermedio por donde se incorpora el RAP.

La diferencia entre estos dos tipos está en el dispositivo necesario en la planta para la fabricación. Generalmente cuando se usa planta discontinua el material fresado se incorpora a temperatura ambiente y el árido se sobrecalienta para conseguir que la mezcla final tenga una temperatura tal que permita su transporte, extendido y compactación adecuada.

El material fresado suele presentar un contenido alto de humedad lo que supone un consumo importante de energía para el secado cuando se mezcla con los áridos.

En base a lo anterior se pueden definir los siguientes tipos de plantas más usadas para la mezclar MAC con RAP.

3.2.1 Reciclado en planta discontinua:

En este tipo de planta se sobrecalienta el agregado, en un secado convencional antes de ser incorporado el RAP en la mezcla. Donde posteriormente son combinadas ambas mezclas (MAC con el RAP) en una mezcladora como se indica en la Figura 3-1. La transferencia de calor por conducción del agregado nuevo hacia el RAP hace que la mezcla quede con la temperatura necesaria para su transporte y posterior colocación.

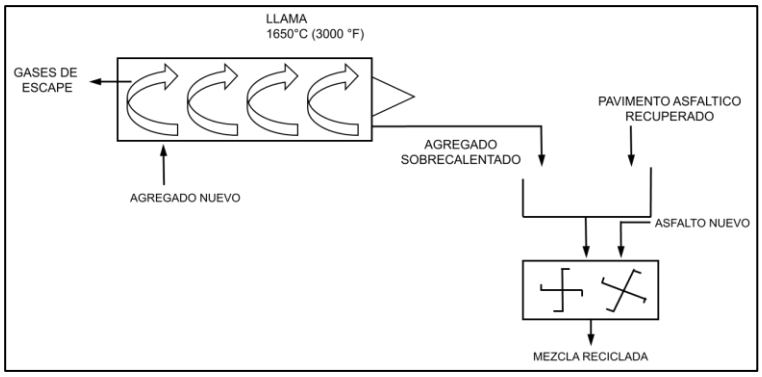

Figura 3-1 Reciclado en planta discontinua [30]

3.2.2 Reciclado en tambor mezclador:

En este tipo de planta los agregados se calientan y mezclan con el asfalto en el mismo tambor mezclador. En los primeros intentos con este tipo de planta se obtuvieron buenos resultados en cuanto a la mezcla resultante, pero poseían altos niveles de contaminación del aire debido a la exposición del pavimento asfáltico recuperado en la llama del quemador y los gases de combustión extremadamente calientes, como otros problemas con compuestos de agregado fino y asfalto que quedaban en las aletas metálicas y en las placas finales del equipo.

Por este motivo los fabricantes y contratistas diseñaron nuevas plantas de reciclado en caliente como es el caso de tambor dentro de un tambor. En este tipo de planta se incorpora un tambor de menor diámetro en el extremo de la carga de una unidad convencional donde se alimenta el agregado nuevo dentro de este tambor y se calienta a una temperatura a 150-260°C para posteriormente ser mezclado con el RAP dentro de un tambor de mayor diámetro como se muestra en la Figura 3-2.

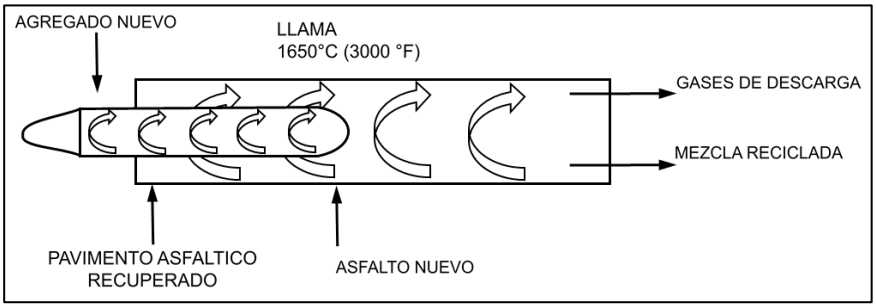

Figura 3-2 Reciclado de tambor dentro de un tambor [30]

En la Figura E-1 del anexo E se puede apreciar los detalles de un tambor dentro de un tambor

Otro tipo de planta derivada del tambor mezclador se encuentra el reciclado con alimentacion dividida.En este tipo de planta el agregado ingresa en el extremo donde se encuentra el quemador, en donde se seca y sobrecalienta. Luego es ingresado el RAP en el tambor en un punto donde no entre en contacto con la llama y los gases calientes. La figura 3-3 muestra un esquema del reciclado en planta dividida.

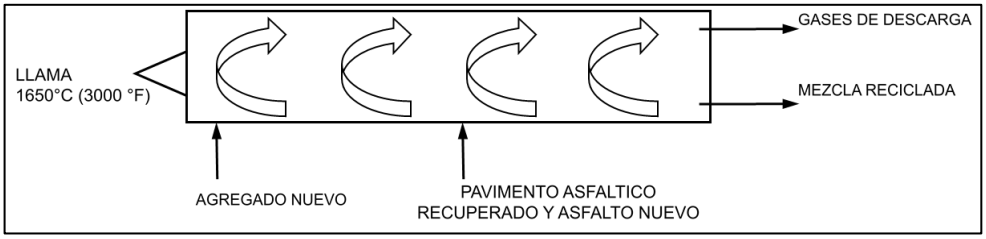

Figura 3-3 Reciclado con alimentación dividida [30]

Finalmente cabe mencionar el tambor mezclador con convección a bajas temperaturas. En este tipo de tambor se inserta una cámara de combustión con una defensa cónica para el calor entre el quemador y el tambor. Consiste básicamente en hacer pasar aire refrigerado antes que los gases de combustión pasen a través de esta defensa, la cual funciona como un cono mezclador, descargando gases de combustión a temperaturas y velocidades uniformes. Como muestra la Figura 3-4 el RAP ingresa al tambor solo o con el material granular agregado, en el extremo del quemador.

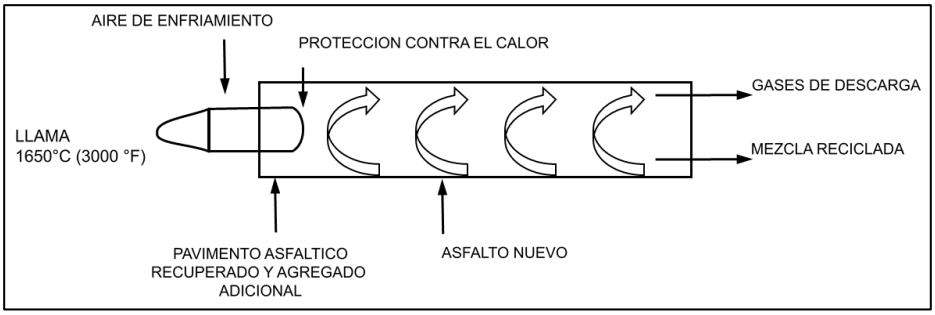

Figura 3-4 Tambor mezclador con convección a baja temperatura [30]

En la Figura E-2 del anexo E se puede apreciar los detalles de un tambor mezclador con convección a baja temperatura.

3.3 SITUACIÓN DEL RECICLADO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN EL MUNDO.

El 94% de las carreteras en Europa son asfálticas. La producción anual de mezcla en caliente en Europa ronda las 300 millones de toneladas y existen más de 4000 plantas fijas que estarían en condiciones de reciclar y más de 700 plantas móviles.

Los países europeos que utilizan la mayor cantidad de pavimentos asfálticos recuperados (RAP) son: Hungría, Luxemburgo, Austria, Alemania, Holanda y Dinamarca. El total de RAP disponible es alrededor de 56 millones de toneladas, asegurándose más del 85% de re uso del mismo. La principal tendencia europea son el fresado selectivo y el almacenamiento por cubierto y separado del RAP, intentando reducir su humedad. El objetivo es llegar a utilizar el 100% del RAP producido, ya que la técnica y tecnología avanzan de manera que hacen el producto cada vez más confiable.

Para estimular el uso del RAP en Europa, se recurre a ciertos argumentos, como: el ahorro de materiales vírgenes, el ahorro de recursos naturales minimizando el impacto ambiental, la calidad de las mezclas con RAP, igualando la calidad de los materiales vírgenes, evitando vertidos y cargas para las próximas generaciones y generando una buena imagen para la industria. Además en Europa, existen estándares para el RAP y el mensaje más importante es que las mezclas asfálticas son 100% reciclables. Las autoridades viales europeas son las dueñas del RAP de los caminos, por lo tanto, son responsables de su uso en el continente europeo.

Por otra parte, en Estados Unidos el 90 % de las carreteras son de asfalto y la producción anual de mezcla en caliente es prácticamente la misma que en el continente europeo, 332 millones de toneladas. El número de plantas asfálticas en el país es de 1091 en 18 estados y el máximo de porcentaje de RAP disponible es el 36% versus el 85% que presenta Europa.

Se debe destacar que aquellos estados que generan menos RAP lo reutilizan en mayor medida en la producción de mezclas asfálticas, y en cambio algunos de los que más generan son los que menos lo reutilizan, como en el caso del estado de Florida, donde el 30% del total es reportado como generación y solo el 22% de re uso en las nuevas mezclas.

4 ESPECIFICACIONES POR GRADO DE DESEMPEÑO SUPERPAVE

4.1 ESPECIFICACIONES SUPERPAVE

La especificación SUPERPAVE representa las condiciones del pavimento mediante una doble numeración. En esta clasificación, los grados del ligante se definen por PG XX-YY, donde XX e YY corresponden a las temperaturas máximas y mínimas respectivamente.

La componente PG XX corresponde a la temperatura promedio más alta registrada en el pavimento a lo largo de 7 días consecutivos a 20 [mm] bajo la superficie del pavimento durante un año. Dado que la temperatura en el pavimento es diferente a las ambientales existe un algoritmo especializado que puede estimar la temperatura interna del pavimento. La segunda componente YY corresponde a la temperatura mínima registrada anualmente durante un año.

Según el criterio SUPERPAVE, la temperatura se estima utilizando registro de al menos 20 años.

A modo de ejemplo, si se desea construir un camino en un lugar donde la temperatura máxima predicha para un pavimento será de 64°C y la temperatura mínima de -16°C, las condiciones de ahuellamiento y fatiga deberán cumplirse para temperaturas de hasta, los 64°C, por otro lado, las condiciones de agrietamiento térmico deberán cumplirse para temperaturas de hasta los -16°C.

Se debe tener particular cuidado con la temperatura intermedia, que refleja la temperatura al interior de la carpeta asfáltica. En este caso la temperatura intermedia esperada es de 28°C. Si la temperatura que se encuentra al interior del asfalto se encuentra sobre este valor, a pesar de no sobrepasar los 64°C en el exterior, el asfalto podría presentar problemas relacionados con la fatiga y sería necesario mejorar el desempeño a bajas temperaturas.

4.2 ENSAYOS Y EQUIPOS UTILIZADOS

En la clasificación por Grado de Desempeño los betunes asfálticos son sometidos a distintos ensayos reológicos a diferentes temperaturas y diferentes niveles de envejecimiento (ver Tabla C-1 del anexo C o TABLE 1 de la norma ASTM D6373-15 [5]) a modo de predecir el real impacto en el desempeño del pavimento. Los ensayos y equipos con los que se determina la especificación se indican en este apartado. Fotografías y Figuras de los equipo se pueden encontrar en el anexo C.

4.2.1 Método para determinar los puntos de inflamación y combustión usando la Copa Abierta de Cleveland.

El punto de inflamación se utiliza para evaluar el peligro de inflamabilidad de un material y puede indicar la posible presencia de materiales altamente volátiles e inflamables en un material.

El ensayo está basado en la norma ASTM D92-12b [12]. Básicamente la prueba se basa en subir la temperatura de la muestra según lo indicado por la norma hasta alcanzar una temperatura determinada donde se comienza a pasar una pequeña llama sobre la muestra a intervalos de temperatura controlados. Cuando se alcanza el primer destello en la superficie del material se informa la temperatura como el punto de inflamación. Si se desea conocer el punto de combustión se sigue calentando el asfalto a una razón contante hasta que el ligante se inflame por un mínimo de 5 [s] e informar como la temperatura del punto de combustión.

4.2.2 Medición de la viscosidad mediante el Viscosímetro rotacional de Brookfield

El Viscosímetro rotacional de Brookfield mide las viscosidades del ligante asfáltico a altas temperaturas. Este ensayo es ejecutado para asegurar que el betún posee la fluidez requerida para poder ser bombeado y manipulado en la planta, además de tener una consistencia adecuada para ser mezclado y puesto en terreno.

El procedimiento ASTM D4402/D4402M-15 [6]., se basa en medir el par torsor necesario para mantener una velocidad de rotación de 20 [rpm] de un vástago que se encuentra inserto en una muestra a una temperatura de 135°C. Para ello se debe calentar la muestra a esta temperatura hasta que el ligante esté lo suficientemente fluido para luego ser vertido en el recipiente del equipo.

Se incorpora el contenedor en el equipo, se coloca el vástago y se verifica que el asfalto lo cubra por completo. Se acondiciona la muestra por 30 [min] y se esperan 10 [min] hasta que se estabilice.

Se configura el equipo para comenzar el ensayo a una velocidad de giro de 20 [rpm] y se ajusta el equipo para ejecutar una lectura de viscosidad en [Pa·s]. Se ejecutan 3 lecturas de viscosidad a intervalos de 3 [min], para posteriormente expresar el valor de viscosidad como el promedio de 3 mediciones realizadas.

4.2.3 Método de ensaye de película delgada rotatoria.

El Horno de Película Delgada Rotatoria fue creado con la finalidad de simular el envejecimiento a corto plazo (envejecimiento primario) del betún. En términos prácticos representa los efectos de envejecimiento que sufre el asfalto en el proceso de fabricación y colocación de la mezcla en terreno. En esta etapa el asfalto es sometido a altas temperaturas para su mezclado con los agregados, lo que provoca una oxidación acelerada y volatilización de los constituyentes más livianos.

El ensayo ASTM D2872-12[9], consiste en verter cuidadosamente 35±0,5 [g] de asfalto en los vasos de ensaye. Luego rellenar los 8 contenedores con los vasos en el equipo HPDR. Una vez adentro se cierra la puerta y se hace rotar el portador a una velocidad de 15±0.2 [rpm], posteriormente se acciona el flujo de aire a razón de 4±0.3 [l/min]. Todo el procedimiento anterior se ejecuta a una temperatura de ensaye constante de 163±0.5°C la cual se debe alcanzarse dentro de los primeros 10 [min] una vez cerrada la puerta del equipo. El ensayo tiene una duración de 85 [min].

Al término del ensaye se sacan los contenedores del horno y son vertidos en un recipiente. Es importante tener presente que el material obtenido del ensayo debe ser ocupado dentro de 24 [hr] de ejecutado el envejecimiento.

Cabe destacar que mediante el procedimiento del ensaye HPDR se puede determinar la pérdida de masa provocada por la evaporación de gases del betún, como indica la norma ASTM D2872-12 [9].

4.2.4 Método de envejecimiento acelerado en PAV.

El equipo PAV fue diseñado con el fin de aparentar el envejecimiento a largo plazo del asfalto, es decir, el envejecimiento que sufre el asfalto durante su vida útil.

El procedimiento SUPERPAVE, ASTM D6521-13 [10], consiste en someter al betún a alta presión y temperatura para simular el envejecimiento de entre 5 a 10 años. La muestra utilizada en este método es la obtenida en el ensayo HPDR.

La cantidad de muestra que se coloca en cada bandeja de acero inoxidable es de 50±5 [g], lo que producirá una película de ligante asfáltico de 3,2 [mm] de espesor. Luego se coloca las bandejas en la repisa y se ingresan a la cámara del equipo PAV, la cual se encuentra a una temperatura de 100±0,1°C. Se cierra la cámara y se aplica una presión de 2,1±0,1 [MPa]. Este procedimiento tiene una duración de 20 [hr].

Posteriormente se coloca la muestra en un contenedor especial en la cámara desgasificadora la cual está a una temperatura de 170°C, donde se aplica vacío a una presión de 15±2,5 [kPa], para retirar la mayor cantidad de aire del betún. Una vez finalizado el vacío se vierte el contenido en un recipiente y se almacena.

4.2.5 Medición de las propiedades reológicas mediante el DSR.

El reómetro de corte dinámico, es un equipo que se utiliza para caracterizar las propiedades viscosas y elásticas de ligante asfaltico a temperaturas altas e intermedias, con el fin de obtener su desempeño frente a fallas por ahuellamiento y fatiga.

El procedimiento está basado en la norma ASTM D7175-15 [7]. En resumen el ensayo consiste en colocar una cantidad determinada de muestra para cada geometría de platos respectiva. Para la geometría de 25 [mm] la cantidad de muestra debe ser 0,5211 [g] y la masa necesaria para el plato de 8 [mm] debe ser 0,1125 [g].

Luego la muestra se lleva a temperatura de acondicionamiento hasta que el asfalto ocupe completamente el plato. Posteriormente se lleva a temperatura de ensaye según la geometría de cada plato y se toma mediciones a intervalos crecientes o decrecientes según se indique el Manual del Usuario del equipo DSR [4] para cada geometría. Cuando el ensayo se inicia el plato superior comienza a oscilar en el plano horizontal produciendo un movimiento oscilatorio. El ensayo termina cuando la muestra falle en base a los criterios establecidos por la norma ASTM D6373-15 [5].

Los ensayos realizados por este equipo se controlan mediante un software llamado Rheoplus™, el cual se encarga de realizar los cálculos correspondientes. Previo a cada ensayo se debe ingresar al panel del equipo e ingresar los datos y condiciones de medición.

4.2.6 Medición de rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas mediante el BBR

La finalidad de este ensayo es, estudiar el comportamiento del ligante a bajas temperaturas, determinando la rigidez o fluencia en flexión bajo carga constante en función del tiempo. Para ello se usa el betún con envejecimiento secundario, es decir,

envejecido en el equipo PAV, debido a que representa el caso más desfavorable del ligante ya que al final de su vida útil el comportamiento del ligante es más rígido y más propenso al agrietamiento.

Mediante la teoría de elasticidad de los materiales el equipo entrega el valor del módulo de rigidez S(t) en el tiempo y el valor de m (m-value), que corresponde a la pendiente de la curva log-log de rigidez v/s tiempo (curva maestra de rigidez).

El valor de m representa la capacidad del asfalto de relajar esfuerzos cuando es sometido a tensiones.

El ensayo está ejecutado en base a la norma ASTM D6648-09 [8]. Antes de comenzar cada ensayo es necesario verificar el equipo, ya que su nivel de sensibilidad y precisión es alto y tiende a desconfigurarse fácilmente.

En resumen el ensayo consiste en preparar la muestra en base a las especificaciones y condiciones que indica la norma, con ayuda de un molde compuesto de acero inoxidable, desmoldante y láminas plásticas como se muestra en la Figura A-1 del anexo A.

Luego que la muestra esté preparada se coloca en el baño de alcohol del equipo BBR, donde se acondiciona a temperatura de ensayo por 60±5 [min]. El siguiente paso es ajustar las cargas aplicadas en la viga las cuales son:

- Aplicando el sistema manual fijar la carga de contacto de 35±10 [mN], para asegurar el contacto entre el vástago de carga y la viga.
- Luego aplicar el sistema automático de ensaye y colocar una carga de 980±50 [mN].

Posteriormente se comienza el ensayo en modo automático aplicando una carga de 980±50 [mN], durante 1,0±0,1 [s], en seguida se reduce la carga a 35 ±10 [mN] y permitir recuperarse por 20±0,1 [s].

Es necesario destacar que la carga de 980±50 [mN], debe mantenerse en un rango de ±50 [mN] los primeros 5 segundos y ±10 [mN] durante el resto del ensaye.

Al finalizar el ensaye verificar que la viga retorna a 35±10 [mN], en la pantalla del computador y comenzar a ensayar la siguiente viga. El procedimiento se repite hasta que el valor de la rigidez sea mayor a 300 [MPa] o cuando el valor de m, sea menor que 0,3. Cuando cualquiera de estas dos condiciones no cumpla se considera que la probeta falla. La temperatura de ensaye comienza en 0°C y se va disminuyendo -6°C hasta que la viga falla en cualquiera de estas dos condiciones.

El software calcula automáticamente el valor de la rigidez y la pendiente en los tiempo de 8, 15, 30, 60, 120 y 240 segundos. El valor que se considera válido para la falla, es el obtenido a los 60 segundos.

4.2.7 Método de ensaye de Tracción Directa

El método y equipo de tracción directa (DTT) entrega una medida del módulo de rigidez y módulo de relajación. Se utiliza en conjunto con el equipo BBR para obtener el grado PG a bajas temperaturas. Debido a que este equipo no se encuentra en las instalaciones del LEMCO, no ha sido incorporado en la clasificación PG.

El procedimiento se basa en método ASTM D6723-12 y está referido a la medición de esfuerzos y deformaciones de una muestra de asfalto, la que es traccionada hasta la rotura. El objetivo es analizar si la falla del material es dúctil o frágil.

4.3 OTROS ENSAYOS SUPERPAVE PARA ESTUDIO DEL LIGANTE

4.3.1 Determinación de la deformación Creep y recuperación elástica mediante el equipo DSR.

El ensayo, también denominado Creep And Recovery, se utiliza para predecir el comportamiento del betún a deformaciones permanentes, aplicando ciclos de carga y recuperación en una muestra, utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR).

El procedimiento se basa en la norma internacional ASTM D7405-05-10a [11]. La muestra debe ser envejecida primariamente en el equipo HPDR, previo al ensayo. De este asfalto envejecido se debe extraer una masa de 0,5211 [g] de muestra para el plato de 25 [mm].

Luego se selecciona el ensayo Creep and Recovery en el software del equipo. Colocar la muestra y acondicionarla hasta que la muestra ocupe la totalidad del plato. Posteriormente se disminuye la temperatura a la adecuada para comenzar el ensayo.

El ensayo tiene una duración de 200 segundos. Donde se aplica los 100 primeros segundos del ensayo (10 primeros ciclos) un esfuerzo de 0,1 [KPa] durante 1 segundo, seguido de 9 segundos de recuperación en donde no se aplica carga. Los otros 100 segundos poseen 10 ciclos de en los cuales se aplica una carga de 3,2[KPa] durante 1 segundo, seguido de 9 de recuperación

Una vez finalizado el ensayo se deben ejecutar los cálculos establecidos en el punto 9.3 de la norma, ASTM D7405-05-10a [11].

5 EXTRACCIÓN Y RECUPERACIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO.

5.1.1 Separación del asfalto de un testigo, por centrifugado, para posterior recuperación

El método está basado en la norma chilena 8.302.36 del Manual de Carreteras, Volumen 8 [4], la cual es similar al método A de la norma ASTM D2172/D2172M-11 [13]. Este método describe los procedimientos para obtener una solución de ligante asfáltico de una mezcla o testigo, mediante dos procesos de centrifugado, usando dicloroetileno.

Primeramente se debe colocar la mezcla en un horno a 40°C por 24 [hr] para asegurarnos que esté seca y libre de humedad. Luego se calienta la mezcla a 110±5°C en una bandeja plana hasta que sea manipulable para poder ser separada.

El tamaño de la muestra para el centrifugado debe estar dado según su tamaño máximo nominal del agregado, como se muestra en la tabla 8.302.36.A [4] de la norma.

El procedimiento en resumen consiste en colocar la mezcla en el bol de la centrífuga AS-94, donde se cubre la totalidad de la mezcla con dicloroetileno. Se deja reposar 1,5 [hr] para que se separe el ligante de los áridos. Luego se ejecuta el primer centrifugado aumentando lentamente la velocidad del equipo hasta 3.600 [rpm] y

manteniéndola hasta que el solvente deje de fluir. Posteriormente se debe colocar 800 [ml] de dicloroetileno y dejar reposar 20 a 25 [min] para centrifugar nuevamente hasta que el material pétreo este lo más limpio posible de asfalto. El solvente obtenido antes de ser colocado en la segunda centrífuga, es necesario tamizarlo para que esté libre de suciedad que pueda dañar el equipo y se filtren un poco los finos.

El segundo centrifugado es una alternativa adoptada por el laboratorio para liberar la disolución de la mayor cantidad de finos antes del proceso de recuperación. Se coloca el papel filtro en la centrifuga AS-07 y el picnómetro de capacidad de 4.000 [ml] con un filtro que va debajo de la manguera que expulsa el solvente libre de finos. El centrifugado se ejecuta a una velocidad de 11.000 [rpm] y se va colocando 500 [ml] de solvente, hasta agotarlo. Se hacen 3 pasadas para que el asfalto quede libre de finos. Finalmente se deja 12 [hr] a 40°C el solvente final en un horno con aire incorporado. Para que se evapore el dicloroetileno y la solución está más concentrada de asfalto. Trascurrido el tiempo se traspasa el líquido a un picnómetro 4.000 [ml]. En el anexo A, se pueden encontrar Foto A-7 y A-8 de ambas centrífugas.

5.1.2 Recuperación del ligante asfáltico mediante el Método con Destilador Rotacional

En base a la norma chilena 8.302.58 del Manual de Carreteras, Volumen 8 [4]. Mediante destilación se recupera el betún asfáltico del solvente obtenido en el método descrito el punto 5.1.1, utilizando un destilador rotatorio este método es similar al descrito en la norma ASTM D5404/5404M-12 [14], cambiando ciertos parámetros de flujo de gas, temperatura y presión de vacío.

En primer lugar se debe comprobar la impermeabilidad al aire del aparato de destilación. Para ello se monta el conjunto, sellando las partes con silicona hasta que estén ajustadas, se cierra la válvula de admisión y se hace girar el matraz de destilación a 75 [rpm]. Se pone en funcionamiento el sistema de vacío y se reduce gradualmente la presión a unos 80 [mbar]. En estas condiciones se aísla el aparato del sistema de vacío cerrando la llave correspondiente al manómetro y se comprueba por 5 [min] que no se producen aumentos de presión en el manómetro, en caso contrario se ajustan las piezas una por una y se comprueba el vacío hasta descubrir la falla.

Para comenzar a destilar la muestra se introducen en el matraz unos 350 a 400 [cc] de disolución y se sumerge el matraz en el baño de aceite a base de silicona hasta enrasar con el nivel de la muestra. Se inicia entonces una primera fase de destilación, calentando el baño a temperatura de 40±1°C, con una velocidad de rotación del matraz de 70 [rpm] y una presión reducida de 500 [mbar]. Se continúa con estas condiciones por 45 [min] hasta que la presión baje unos 5 [mbar]. Se debe repetir este procedimiento hasta agotar el recipiente con disolución.

Se eleva la temperatura a 160°C y reducir la presión a 80 [mbar] en 20 [min]. Luego se continúa en estas condiciones por 15 [min], debiendo verificar que ya no hay burbujas en la muestra. En caso contrario se continúa la destilación por 5 [min] más, y si persisten las burbujas se repite todo el ensayo.

Terminado el proceso de destilación se debe saca el matraz del baño y se restablecen en el aparato la presión atmosférica. Se desmonta el matraz y se vierte el betún recuperado en un recipiente. Se presenta una fotografía del destilador rotacional en la Foto A-9 del anexo A.

5.1.3 Extracción y recuperación de un ligante asfaltico mediante el método propuesto por la SHRP.

El método de la SHRP basado en la norma AASHTO T319-15 [17], cosiste en un conjunto completo de extracción y recuperación de una mezcla asfáltica. Su característica principal que la diferencia de los otros métodos radica en el método de extracción, el cual ocupa un recipiente de extracción con 3 tamices continuos en la base de medidas N°10, N°50 y N°200 (ver Figura A-2 del anexo A), el cual mediante el proceso de centrifugado va filtrando el material fino de la mezcla, permitiendo recuperar el agregado en óptimas condiciones para una buena graduación y el la solución del ligante con menor cantidad de finos.

El proceso comienza usando una muestra de 1000 a 1100 [gr] obtenida por cuarteo, para lograr conseguir una cantidad de 50 a 60 [gr] de ligante asfáltico. Se seca la muestra en un horno a 110°C. Determinar los pesos de los filtros y la muestra.

Colocar la muestra en el recipiente de extracción y asegurar la tapa. Luego añadir 600 [ml] de disolvente (bromuro de n-propilo o tolueno). Inyectar gas nitrógeno en el recipiente a una velocidad de 1000 [ml/min] durante un minuto. Se hace girar el recipiente por 5 ± 1 [min] a 30 [rpm].

Mediante una línea de vacío se conecta el recipiente de extracción con un matraz de recuperación. Se introduce nitrógeno en el recipiente a una velocidad de 400 [ml/min]. Aplicar un vacío de 93±0,7 [kPa] (700±5 [mm hg]) al recipiente y extraer en el primer frasco de recuperación la solución. A continuación se cambia el vacío para extraer el fluido del primer matraz, a través de un filtro de cartucho de 0,020 [mm] al segundo matraz. Finalmente se conecta nuevamente el vacío hasta trasferir el asfalto diluido al matraz del destilador rotacional.

Una vez que la disolución de asfalto este en el frasco de recuperación se comienza la destilación primaria. Se destila la disolución de asfalto a un vacío de 93±0,7 [kPa] en un baño de aceite de 100±2,5°C mantener el frasco de destilación un tercio lleno en todo momento.

Ir repitiendo el proceso anterior agregando 400 [ml] de disolvente y rotar el recipiente de extracción por 10 [min]. Luego agregar 400 [ml] de disolvente más y rotar el recipiente de extracción por 30 [min] hasta que el fluido recuperado tome un color café claro. Seguir con la destilación primaria hasta que el matraz este a un tercio del total.

Verter este fluido en botellas para centrifuga y centrifugar el solvente con asfalto por 25 [min] a 3600 [rpm]. Luego vierta nuevamente el fluido centrifugado en el matraz de destilación. Aumentar la temperatura del baño a 174±2,5°C y continuar con el vacío hasta que la velocidad de condensación sea un goteo por 30 segundos. Introducir el nitrógeno en el matraz a una velocidad de 1000 [ml/min] por 30±1 [min]. Finalmente vierta el contenido de asfalto recuperado para posteriormente ser ensayado. En la Figura A-3 del anexo A, se presenta un esquema del proceso.

6 ASFALTO RECICLADO EN SUPERPAVE

Las investigaciones realizadas por el Strategic Highway Reasearch Program al momento de ejecutar el método SUPERPAVE no abordan las interrogantes asociadas al uso del RAP en mezclas asfáltica en caliente. Es por ello que en el año 2000 se desarrolló un proyecto preparado por la National Cooperative Highway Reasearch Program el cual busca como objetivo desarrollar directrices para incorporar el RAP en el sistema SUPERPAVE y preparar un manual que pueda ser usado por técnicos de laboratorio e ingenieros del área.

El Proyecto D9-12 [35] utiliza dos ligantes asfálticos vírgenes con grado de desempeño PG 52-34 y PG 64-22 y tres RAP de Arizona, Connecticut y Florida. Se determinó que una cantidad de RAP, generalmente bajo el 15 por ciento, no presenta cambios en el grado del ligante asfáltico. Para cantidades de RAP entre un 15 a 25 por ciento, el grado del ligante asfáltico de la mezcla cambia levemente y se controla con un asfalto virgen más suave (6 °C menos) que es usado en la mezcla asfáltica en caliente. En mezclas que contengan más de un 25 por ciento de RAP, el ligante asfáltico del RAP tendrá un efecto significativo y deben ejecutar los procedimientos para estimar las propiedades reológicas de la mezcla con RAP siguiendo los procedimientos de la norma AASTHO M323-13[1] [15] o el Manual de Usuario publicado por la NCHRP [37].

6.1 EXTRACCION Y RECUPERACION

Existen tres combinaciones conocidas para el proceso de extracción y recuperación del ligante asfáltico, las cuales son las siguientes:

1. Método de extracción de ligante asfáltico mediante centrifugado, ASTM D2172/D2172M-11 [13] y Método Abson de recuperación de ligante asfáltico, ASTM D1856-09(2015) [16].
2. Método de extracción de ligante asfáltico mediante centrifugado, ASTM D2172/D2172M-11 [13] y Método de recuperación mediante un Rotovapor, ASTM D5404/D5404M-12 [14].
3. Método de extracción y recuperación de ligante asfaltico de una mezcla, AASHTO T319-15 [17].

Existen 5 métodos de extracción en la norma ASTM D2172/D2172M-11 [13]. El método A es la extracción del material asfaltico mediante un proceso de centrifugado. Este método es el mismo que se encuentra descrito en la norma 8.302.36 del Manual de Carreteras, Volumen 8 [4]. El método B, C y D consiste en extraer el ligante mediante flujo del solvente sometiéndolo a altas temperaturas. El método E se basa en la extracción del solvente aplicando vacío. Dentro las investigaciones realizadas por la NCHRP se determinó que el mejor método de extracción es el A seguido por el método E. Los métodos B, C y D demostraron al someter la solución a altas temperaturas provocaba un envejecimiento en el ligante asfáltico recuperado final.

El proyecto de la NCHRP [35] evalúa los 3 procedimientos de extracción y recuperación existentes para determinar su exactitud, precisión, velocidad y facilidad de tratar el RAP. También adapta el nuevo método actual AASHTO T319-15 [17].

Es importante destacar que el método del Destilador Rotacional descrito en la norma 8.302.58 del Manual de Carreteras, Volumen 8 [4], es una adaptación del método de recuperación ASTM D5404/D5404M-12 [14].

Dentro de este estudio se determinó que el método de recuperación Abson no es aceptable ya que presenta coeficientes de variación demasiados altos (38%-69%) para las muestras de RAP probadas y su rigidez es una de las más bajas comparadas con los dos procedimientos anteriores. Estos datos se muestran en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1Rigidez a alta Temperatura y temperatura crítica alta del ligante recuperado [36]

Extraction	Centr.	Centr.	SHRP	SHRP	SHRP	Centr.	Centr.	SHRP	SHRP
Recovery	Abson	Rotavap	Rotavap	Rotovap	Rotavap	Abson	Rotavap	Rotavap	Rotavap
Solvent	TCE	Tol/Eth	Tol/Eth	NPB	TCE	TCE	Tol/Eth	Tol/Eth	NPB
G*/sin δ	KY	KY	KY	KY	KY	FL	FL	FL	FL
64C	6.34	33.16	24.43	26.74	21.47	3.00	9.29	7.33	4.22
COV-64	69%	12%	11%	26.2%	14%	48%	20%	5%	20.6%
70C	2.98	13.84	10.13	11.12	9.02	1.43	3.96	3.18	1.85
COV-70	64%	11%	12%	24.0%	12%	44%	21%	5%	20.1%
76C	1.42	5.81	4.36	4.77	3.92	0.70	1.77	1.44	0.85
COV-76	60%	12%	13%	20.5%	10%	38%	20%	5%	23.0%
T_c	77.8	88.1	86.4	87.0	85.8	72.4	80.2	78.8	74.7
COV-T_c	5.6%	1.0%	1.2%	1.1%	0.5%	4.7%	1.8%	0.4%	2.3%

En la Tabla 6-1 se apreciar que la combinación del método de extracción y recuperación del punto B y C obtuvieron un coeficiente de variación similar. La combinación del punto B obtuvo una rigidez mayor que la del punto C, esto se debe posiblemente a que en la combinación del punto B el ligante recuperado retiene mucho más finos que la combinación del punto C.

Parece claro que La combinación del punto C es:

- Más repetible que la combinación del punto A e igualmente repetible comparado con la combinación del punto B.
- El tiempo del proceso es igual que el del punto B (6 horas) y ligeramente más largo que el del punto A (4 horas).

Es importante recalcar que para obtener un diseño volumétrico apropiado del agregado del RAP y el agregado virgen, se debe conocer las bandas de granulométricas del agregado del RAP. Por ello es importante extraer el agregado lo más completo posible. La Tabla 6-2 nos entrega las bandas granulométricas promedios extraída de los 3 métodos ya conocidos para dos mezclas de RAP distintas.

Tabla 6-2 Bandas granulométricas promedio del agregado del RAP [36]

Extraction	Centr.	Centr.	SHRP	SHRP	Centr.	Centr.	SHRP	SHRP
Recovery	Abson	Rotavap	Rotavap	Rotavap	Abson	Rotavap	Rotavap	Rotavap
Solvent	TCE	Tol/Eth	Tol/Eth	NPB	TCE	Tol/Eth	Tol/Eth	NPB
Sieve,mm	KY	KY	KY	KY	FL	FL	FL	FL
25	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19	100.0	99.2	99.2	99.1	100.0	100.0	100.0	100.0
12.5	97.2	96.7	97.0	95.1	99.8	99.7	99.6	99.3
9.5	93.7	92.3	93.9	92.5	98.8	98.8	99.2	98.5
4.75	72.4	71.1	73.1	73.1	84.4	84.3	85.1	82.2
2.36	53.8	53.5	54.8	55.4	66.2	66.6	67.9	62.9
1.18	40.9	41.2	42.0	42.7	56.1	56.6	57.9	53.6
0.6	30.1	31.0	31.9	32.1	45.9	46.1	48.0	44.8
0.3	18.8	20.3	21.7	21.1	32.5	32.4	34.9	32.9
0.15	13.1	14.8	16.4	15.6	19.8	19.4	22.7	21.2
0.075	10.6	12.3	14.1	13.4	12.9	12.4	16.0	15.0

En base a la Tabla 6.2 se puede determinar que las bandas granulométricas son comparables para las tres combinaciones de métodos de extracción y recuperación.

Algo que está muy relacionado con los procesos de extracción y recuperación del ligante es saber que disolvente es ideal. El tricloroetileno es uno de los más potentes para extraer el asfalto pero uno de los más tóxicos y ha reportado muchos problemas de salud de los laboratoristas. El tolueno/etanol es un poco más seguro y posee un comportamiento aceptable en la recuperación, pero aun así es clasificado como un material toxico para la salud humana. En el proyecto D9-12 de la NCHRP [35] se determina que el bromuro de n-propilo consigue resultados comparables con los dos disolventes anteriores y sus niveles de toxicidad son mucho menores.

6.2 GRADO DE DESEMPEÑO EN MEZCLAS CON RAP

Solo la normativa AASHTO integra el diseño de mezclas asfálticas con RAP en el método SUERPAVE. Se recomienda 3 niveles para el uso del RAP en SUPERPAVE, los que se presentan en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3 Recomendaciones para la selección de ligante asfáltico

	%RAP		
	Grado del RAP Recuperado		
Recomendación de Ligante Grado de ligante asfaltico Virgen	**PG XX-22**	**PG XX-16**	**PG XX-10**
No hay cambios en la selección del ligante	< 20%	< 15%	< 10%
Selección del ligante virgen un grado más bajo que el normal (*)	20 - 30%	15 - 25%	10 - 15%
Seguir el procedimiento de los gráficos de la mezcla	> 30%	> 25%	> 15 %

(*)Ejemplo: Seleccionar un PG 58-28 si se usa un PG 64-22.

El primer nivel plantea que para estos porcentajes de RAP no es necesario hacer estas pruebas debido a que el RAP no aporta suficiente ligante envejecido para presentar cambios en las propiedades del ligante final. En el segundo nivel se recomienda usar un ligante asfaltico un grado más blando, en base al grado de desempeño que se determina por la norma ASTM D6373-15 [5]. A contenidos de RAP más altos es necesario extraer y recuperar el ligante asfaltico del RAP y determinar sus propiedades siguiendo los procedimientos establecidos en el punto 5 de esta memoria.

Como se puede apreciar en la Tabla 6-3 para ligantes asfálticos con RAP recuperados que son rígidos, el porcentaje de RAP recomendado es hasta un 15% debido a que sobre este valor se presentan no linealidades en la Ecuación 6-9, por otro lado, para ligantes de RAP recuperados que presenten una rigidez intermedia el porcentaje de RAP recomendado está limitado hasta un 25%, finalmente para ligantes de RAP de baja rigidez el porcentaje de RAP puede llegar hasta un 30%. En base a los estudios realizados por la NCHRP porcentajes de RAP sobre un 40% presentan no linealidades en la Ecuación 6-9, por lo tanto, no es recomendado.

Para determinar el grado de desempeño de una mezcla con RAP se debe implementar el siguiente procedimiento:

1. Determinar el grado de desempeño del ligante asfáltico virgen en base a la norma ASTM D6373-15 [5].
2. Determinar el grado de desempeño del RAP como indica la norma AASHTO M323-15.
3. Conociendo el porcentaje de RAP en la mezcla se debe estimar la temperatura critica alta, intermedia y baja de la mezcla con RAP en base a la ecuaciones X.1.11 o X1.12 indicadas en la norma AASHTO M323-15 o la ecuación 6-9 o 6-10 de esta memoria.
4. Determinar el grado de desempeño del ligante recuperado de la mezcla con RAP en base a la norma ASTM D6373-15. Se trabaja el asfalto recuperado como original una vez recuperado.

Este procedimiento se resume en la Figura B-1 del anexo B. En la Tabla B-1 del anexo B se comparan los ensayos realizados a las 3 muestras de asfalto.

6.3 DETERMINACION DEL GRADO DE DESEMPEÑO DE UN RAP

Se determinar el grado de desempeño de un RAP siguiendo el procedimiento basado en la norma AASHTO M323-13 [15] y el Manual publicado por la NCHRP en el reporte 452 [37]:

1. Recuperar el ligante asfáltico siguiendo el método AASHTO T319-15 [17]. En base a las investigaciones, se determina que éste método es comparable con la combinación del método de extracción por centrifugado y recuperación mediante el destilador rotacional.
2. Determinar la temperatura crítica alta original en el equipo DSR, basado en los valores del DSR donde G*/sin(δ)=1,00 [kPa]. Para calcular la temperatura crítica alta se usa la Ecuación 6-1.

$$T_c(alta) = \left[\frac{log(1{,}00) - log(G_1)}{a}\right] + T1$$

Ecuación 6-1 Temperatura crítica alta de la muestra original

Donde:

a= pendiente de la cueva de rigidez - temperatura.

$$a = \frac{\Delta \log\left(\frac{G^*}{sin\delta}\right)}{\Delta T}$$

Ecuación 6-2 Pendiente de la curva rigidez-temperatura, DSR

G_1= el valor G*/sin(δ), especifico de T_1, [kPa].

T_1= temperatura más cercana al valor G*/sin(δ) del criterio (1,00 [kPa]) para minimizar el error, [°C].

3. Realizar el envejecimiento en el Horno de Película Delgada Rotatorio al ligante asfáltico recuperado.
4. Ensayar la muestra envejecida en el equipo DSR, para determinar la temperatura alta crítica en base al valor del criterio del DSR envejecido en HPDR (G*/sin(δ)=2,20 [kPa]). Para calcular la temperatura crítica alta se usa la Ecuación 6-3.

$$T_c(alta) = \left[\frac{log(2{,}20) - log(G_1)}{a}\right] + T1$$

Ecuación 6-3Temperatura crítica alta de la muestra envejecida en HPDR

Donde:

a= pendiente de la cueva de rigidez - temperatura (ver Ecuación 6-2).

G_1= el valor G*/sin(δ), especifico de T_1, [kPa]

T_1= temperatura más cercana al valor G*/sin(δ) del criterio (2,20 [kPa]) para minimizar el error, [°C].

5. La temperatura alta del grado de desempeño, será la menor entre la obtenida en el ensayo DSR original y DSR envejecida en HPDR.
6. Determinar la temperatura crítica intermedia en el equipo DSR con la muestra envejecida en el HPDR como si hubiera sido envejecida en PAV. Para calcular la temperatura crítica intermedia se usa la Ecuación 6-4.

$$T_c = \left[\frac{log(5000) - log(G_1)}{a}\right] + T1$$

Ecuación 6-4 Temperatura crítica intermedia de la muestra envejecida en HPDR

Donde:

a= pendiente de la cueva de rigidez – temperatura (ver Ecuación 6-2).

G_1= el valor G*/sin(δ), especifico de T_1, [kPa].

T_1= temperatura más cercana al valor G*/sin(δ) del criterio (5000 [kPa]) para minimizar el error, [°C].

7. Determinar la temperatura crítica baja en el equipo BBR, T_c(S) o T_c(m), en base a la rigidez y el valor de m, con la muestra envejecida en el HPDR como si hubiera sido envejecido en PAV.
   a. Para calcular T_c(S) se usa la Ecuación 6-5.

$$T_c(S) = \left[\frac{log(300) - log(S_1)}{a}\right] + T1$$

Ecuación 6-5 Temperatura baja crítica respecto a su rigidez

Donde:

a= pendiente de la cueva de rigidez - temperatura.

$$a = \frac{\Delta \log(S)}{\Delta T}$$

Ecuación 6-6 Pendiente de la curva rigidez- temperatura, BBR

S_1= rigidez para T_1, [MPa].

T_1= temperatura más cercana al valor S del criterio (300 [MPa]) para minimizar el error, [°C].

b. Para calcular T_c(m) se usa la ecuación 6-7.

$$T_c(m) = \left[\frac{log(0{,}300) - log(m_1)}{a}\right] + T1$$

Ecuación 6-7 Temperatura baja crítica respecto a su valor m

Donde:

a= pendiente de la cueva de valor m - temperatura.

$$a = \frac{\Delta \log(m)}{\Delta T}$$

Ecuación 6-8 Pendiente de la curva valor m – temperatura, BBR

m_1= rigidez para T_1, [MPa].

T_1= temperatura más cercana al valor m del criterio (0,300) para minimizar el error, [°C].

8. Se determina la temperatura baja del grado de desempeño como la más alta entre la T_c(S) y T_c(m).

Determinar el grado de desempeño del ligante asfáltico recuperado del RAP es uno de los elementos importantes dentro del diseño de una mezcla asfáltica en caliente con asfalto reciclado.

En base al grado de desempeño ligante asfáltico final deseado en la mezcla y el grado de desempeño del ligante asfaltico recuperado, se pueden determinar el porcentaje de RAP en la mezcla o bien el ligante asfáltico virgen necesario para conseguir el grado de desempeño deseado. Ambos métodos depende de las variables como las especificaciones del mandante, costo de producción de la mezcla, etc.

El grado de desempeño del ligante asfáltico virgen se consigue conociendo el grado de desempeño final requerido en la mezcla, el porcentaje de RAP de la mezcla y determinado las propiedades del asfáltico recuperado del RAP (temperatura alta, intermedia y baja), para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Extraer y recuperar el ligante asfáltico del RAP usado en la mezcla.
2. Determinar la temperatura crítica alta, intermedia y baja del ligante recuperado del RAP, basado en el procedimiento anterior.
3. Determinar el grado de temperatura máxima y mínima del asfalto virgen.
4. Determinar mediante la Ecuación 6-9. la temperatura crítica alta, intermedia y baja.

$$T_{Virgen} = \frac{T_{Mezcla} - (\%RAP \times T_{RAP})}{(1 - \%RAP)}$$

Ecuación 6-9 Temperatura crítica del asfalto virgen

Donde:

T_{Virgen}=Temperatura crítica del asfalto virgen (alta, intermedia o baja).

T_{Mezcla}=Temperatura crítica de la ligante de la mezcla (alta, intermedia y baja).

T_{RAP}=Temperatura crítica del asfalto recuperado del RAP (alta, intermedia o baja).

%RAP=porcentaje de RAP, expresado en decimales.

5. Seleccionar mediante la Tabla C-1 del anexo C o la TABLE 1 de la norma ASTM D6373-15 [5] la clasificación por grado de desempeño del ligante asfáltico virgen.

Por otro lado, si el mandante especifica el ligante asfáltico virgen dentro del contrato para conseguir un grado de desempeño final determinado, es necesario determinar que rango de porcentaje de RAP es necesario para conseguir el grado final deseado. Por ello conociendo el grado de desempeño final requerido en la mezcla, determinando las propiedades ligante asfáltico virgen y el ligante asfáltico recuperado del RAP (temperatura alta, intermedia y baja), se siguen los siguientes pasos:

1. Determinar la temperatura crítica alta, intermedia y baja del asfalto virgen usando el procedimiento establecido en la norma ASTM D6373-15 [5].
2. Extraer y recuperar el ligante asfáltico del RAP usado en la mezcla.
3. Determinar su temperatura crítica alta, intermedia y baja, del ligante asfáltico recuperado del RAP con mediante el procedimiento ya descrito.
4. Determinar mediante la Ecuación 6-10 el porcentaje de RAP para cada temperatura crítica (alta, intermedia y baja).

$$\%RAP = \frac{T_{Mezcla} - T_{Virgen}}{T_{RAP} - T_{Virgen}}$$

Ecuación 6-10 Porcentaje de RAP para cada temperatura

Donde:

%RAP=porcentaje de RAP, expresado en decimales.

T_{Virgen}=Temperatura crítica del asfalto virgen (alta, intermedia o baja).

T_{Mezcla}=Temperatura crítica de la ligante de la mezcla (alta, intermedia y baja).

T_{RAP}=Temperatura crítica del asfalto recuperado del RAP (alta, intermedia o baja).

5. Seleccionar el rango del porcentaje de RAP que satisfaga los requisitos de las 3 temperaturas críticas.

Un esquema y ejemplo de cada procedimiento descrito anteriormente puede ser encontrar en el anexo B.

6.4 EFECTOS DE MANIPULACION DEL RAP

Es importante conocer los efectos del tiempo y la temperatura en el ligante asfáltico de un RAP al momento de calentarse en el Horno. El Project D9-12 [35] abordo esta interrogante. El RAP se calienta a diferentes temperaturas y tiempos, posteriormente se recupera el ligante de RAP de las mezclas para determinar en el equipo DSR su valor de G* para las temperaturas de 22°C y 31°C. De esta manera se puede saber sí el ligante asfáltico del RAP sufrió algún tipo de envejecimiento.

La Figura 6-1 y 6-2 muestran los dos resultados de este estudio de la NCHRP.

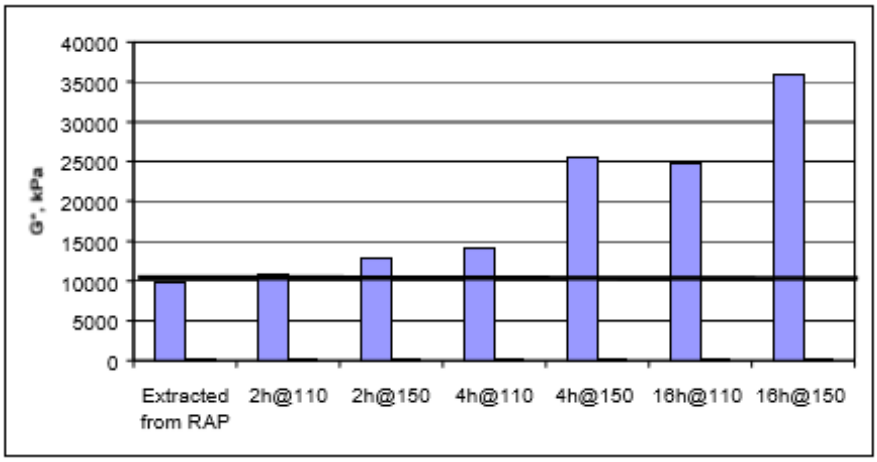

Figura 6-1 Valor promedio de G* obtenida en el equipo DSR a 31°C para las muestras de prueba

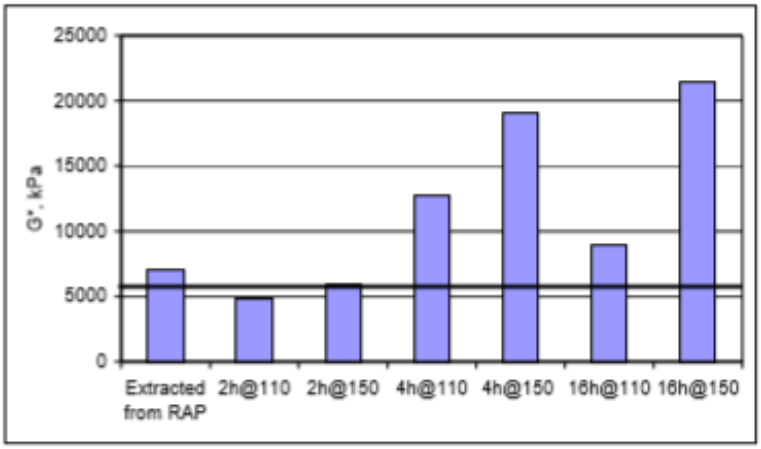

Figura 6-2 Valor promedio de G* obtenida en el equipo DSR a 22°C para las muestras de prueba

Como se muestra en la Figura 6-1 y 6-2 el valor de G* es mayor a medida que la temperatura es más alta. En tiempos sobre las dos horas el ligante asfaltico recuperado del RAP comienza a presentar un envejecimiento volviéndose el ligante más rígido, aumentando su valor de G*. Por lo tanto, el RAP debe ser calentado suavemente a una temperatura entre los 110°C a 150°C por un tiempo no mayor a dos horas, para evitar cambios en las propiedades del ligante asfáltico del RAP.

7 FASE EXPERIMENTAL

7.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS BETUNES ASFALTICOS ANALIZADOS.

Las muestras analizadas corresponden a tres ligantes asfalticos. Un betún tradicional CA-24, un betún recuperado de una mezcla IV-A-12 con un 8% de RAP grueso y uno correspondiente a una mezcla IV-A-12 con un 12% de RAP grueso y un 6% de RAP fino.

Para efectos prácticos de la presente memoria a cada muestra de asfalto se les nombrará con las siguientes siglas, como se muestra en la Tabla 7-1:

Tabla 7-1 Designación de asfaltos utilizados

Clasificación	Tipo de Betún	Sigla
CA-24	Tradicional	Betún 1
IV-A-12 con 8% RAP grueso	Recuperado	Betún 2
IV-A-12 con 12% RAP grueso y 6% RAP fino	Recuperado	Betún 3

Las recuperaciones de las mezclas fueron hechas en base a las normativas chilenas 8.302.36 y 8.302.58 Manual de Carreteras, Volumen 8 [4], mencionadas en el punto 5 de la presente memoria. Se consideró que las muestras están en un estado de envejecimiento primario una vez finalizada la recuperación del ligante, por lo tanto, sólo fueron sometidas a envejecimiento secundario en el equipo PAV. A estos dos betunes solo se ejecutó el ensayo DSR a temperatura intermedia y BBR a bajas temperaturas, debido a la incertidumbre del estado de envejecimiento que presenta el asfalto.

El Betún 1 fue envejecido primaria y secundariamente, donde se le ejecutó una clasificación PG completa en base a la norma ASTM D6373-15 [5].

Estudios han determinado que el asfalto tradicional CA-24 corresponde a una clasificación por grado de desempeño PG 64-22, por lo que se espera que el Betún 1 cumpla con esta categorización.

7.2 CLASIFICACION PG.

7.2.1 Condiciones de ensayo

7.2.1.1 Temperatura de ensayo

En base a la norma ASTM D6373-15 [5] las temperaturas de los ensayos realizados a las muestras asfálticas varían según el estado de envejecimiento que presente el ligante.

- En estado original y envejecido en HPDR, las temperaturas aumentan a medida que avanza el ensayo y van desde los 46 hasta los 82°C, realizando mediciones con el equipo DSR cada 6°C.

- En el caso de envejecimiento secundario, las temperaturas disminuyen a medida que avanza el ensayo y van desde 40°C hasta 4°C, realizando mediciones con el DSR cada 3°C.

Los ensayos hechos con el reómetro de viga en flexión, se realizan para temperaturas decrecientes, desde los 0°C hasta que la viga no cumpla alguna de las condiciones exigidas en la norma, disminuyendo 6°C.

7.2.1.2 Frecuencia de ensayo

El ensayo mediante el equipo DSR deben tener una frecuencia de 10 [rad/s], que simula el paso de un vehículo a 90 [km/hr].

7.2.1.3 Tiempos de carga

Los ensayos en el equipo BBR tienen un tiempo de duración total de 240 [s], tomando mediciones a los 8, 15, 30, 60, 120 y 240 [s]. La rigidez y el valor m que determinan la clasificación PG debe ser medida a los 60 [s].

7.2.1.4 Tensiones y deformación

El equipo DSR se detiene cuando se alcanza un valor mínimo del parámetro G*/sen(δ) y un valor máximo del parámetro G* sen(δ), según corresponda al tipo de envejecimiento del betún, como se aprecia en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2 Valores máximos y mínimos de tensiones y deformaciones

Betún	Valores mínimos y máximos
Original	G*/sen(δ) ≥ 1 [kPa]
Envejecida en HPDR	G*/sen(δ) ≥ 2,2 [kPa]
Envejecida en PAV	G*·sen(δ) ≤ 5000 [kPa]

El equipo BBR aplica una carga constante de 980 [mN] en el centro de la viga.

Las pruebas a baja temperatura, se detienen cuando S(t=60 [s]) supera un valor máximo, o m(t=60 [s]) alcanza un valor mínimo. Lo que ocurra primero.

- Asfalto envejecido en PAV: S (t=60 [s]) ≤ 300 [MPa].
- Asfalto envejecido en PAV: m (t=60 [s]) ≥ 0,3.

7.2.2 Tolerancia y precisión

Las tolerancias para determinar la repetitividad por un mismo operador se encuentra descrita en la norma, para los ensayos ejecutados en el DSR. En la tabla 6-3 se encuentran los coeficientes de variación máximos al tener dos resultados por ensayo para un mismo operador.

Para que la repetitividad sea aceptable, el coeficiente de variación obtenido de los resultados debe ser menor a los estipulados en la tabla 7-3

Tabla 7-3 Tolerancias (d2s%) para un mismo operador DSR

Rango aceptable de 2 resultados		
Asfalto	**Parámetro**	**CV d2s%**
Original	G*/sen δ	6,4
HPDR	G*/sen δ	9,0
PAV	G* sen δ	13,8

En la Tabla 7-4 se presenta el valor máximo para d2s% al realizar ensayos en el equipo BBR, para un mismo operador.

Tabla 7-4 Precisión para un mismo operador BBR

Rango aceptable de 2 resultados		
Asfalto	**Parámetro**	**CV d2s%**
PAV	S (t=60)	9,1
PAV	M (t=60)	4,0

7.2.3 Metodología de ensayo.

Para efectos de la presente memoria se implementó la siguiente metodología de ensayo:

1. Determinar el grado de desempeño del ligante asfáltico virgen en base a la norma ASTM D6373-15 [5].
2. Extracción y recuperación del ligante asfáltico de las mezclas con 8% y 18% de RAP mediante la normativa chilena MC 8.302.36 y 8.302.58 del Manual de Carreteras, Volumen 8 [4].
3. Ejecutar el envejecimiento secundario en el equipo PAV con las muestras de asfalto recuperadas mediante el procedimiento 4.2.4 de esta memoria.
4. Determinar la temperatura intermedia exacta de las muestras recuperadas y envejecidas en PAV en el equipo DSR mediante el procedimiento descrito en el punto 4.2.5 de esta memoria.
5. Determinar la temperatura baja exacta de las muestras recuperadas y envejecidas en PAV en el equipo BBR mediante el procedimiento descrito en el punto 4.2.6 de esta memoria.

7.2.4 Resultados

Los resultados de la clasificación PG para las 3 muestras de betunes se presenta en la Tabla 7-5. En ella se encuentran los valores y criterios de aproximación de la norma ASTM D6373-15 [5]. Por otro lado, se presentan en la misma tabla los valores exactos entregados por los equipos, los cuales cumplen todos los criterios de falla.

Tabla 7-5 Resumen de resultados de clasificación por grado de desempeño

Temperatura de Ensayó	Asfalto CA-24	Asfalto 8% RAP	Asfalto 18% RAP
Alta Temperatura	68,45	--	--
Baja Temperatura	-18,00	-18,23	-12,15
Clasificación Grado de Desempeño Exacta	PG 68-18	PG XX-18	PG XX-12
Clasificación Grado de Desempeño ASTM D6373-15	PG 64-22	PG XX-22	PG XX-16

Los resultados de las temperaturas intermedias obtenidas a través del equipo DSR para las muestras envejecidas en PAV, se presentan en la Tabla 7-6. Las temperaturas intermedia esperadas se calculan mediante la semisuma entre la temperatura máxima y mínima obtenida por la clasificación por Grado de Desempeño más 4°C. Se debe cumplir la condición que la temperatura exacta (entrega el equipo DSR) sea menor que la esperada. En el caso que no se cumpla el criterio el ligante fallará por fatiga.

$$Temperatura\ intermedia\ [°C] = \frac{xx - yy}{2} + 4$$

Ecuación 7-1 Temperatura intermedia esperada

Tabla 7-6 Resultados de temperaturas intermedias obtenidas

Dato Del Betún			Temperatura Intermedia [°C]	
Betún	**Tipo de muestra**	**RAP**	**Exacta**	**Esperada**
CA-24	**1**	**-**	21,6	25
CA-24	**2**	**8% RAP grueso**	21,0	-
CA-24	**3**	**12 % RAP grueso y 6% RAP fino**	21,8	-

7.3 ENSAYO CREEP AND RECOVERY

7.3.1 Condiciones de ensayo

7.3.1.1 Temperatura de ensayo

La temperatura de ensayo es la temperatura crítica alta obtenida elegida en la clasificación por Grado de Desempeño, como indica en la norma ASTM D7405-10a [11].

7.3.1.2 Tensiones aplicadas y Tiempos de carga

Las tensiones aplicadas son de dos magnitudes una de 0,1 [kPa] en los 10 primeros segundos y una de 3,2 [kPa] en los siguientes 10 ciclos.

Los tiempos de cada ciclo son de 10 segundos, y se componen por 1 segundo de aplicación de carga y 9 segundos de recuperación sin aplicar carga.

7.3.2 Metodología del ensayo.

Los procedimientos seguidos en esta etapa están resumidos en el punto 4.3 de la presente memoria.

7.3.3 Tolerancia y precisión

Las tolerancias se encuentran especificadas en la norma ASTM D7405-10a [11], las cuales se deben cumplir con los siguientes valores de la Tabla 7-7:

Tabla 7-7 Coeficientes de variación para ensayo Creep And Recovery

Condición	Coeficiente de variación	Caso
R% 0,1 [kPa]	2,4%	1s%
R% 3,2 [kPa]	3,0%	1s%
Jnr 0,1 [1/kPa]	4,6%	Caso >1
Jnr 3,2 [1/kPa]	5,7%	Caso >1

La cantidad mínima de ensayos es de 2, si se realizan más se debe aplicar los siguientes multiplicadores que se encuentran en la Tabla D-1, del anexo D.

Para esta memoria solo se realizaron dos ensayos, por lo que es válida solo la Tabla 6-7, como criterio de comparación.

7.3.4 Resultados

Los resultados obtenidos del ensayo Creep And Recovery, aplicado al Betún 1, son presentados en la Tabla 7-8.

Tabla 7-8 Resumen de resultados ensayos Creep And Recovery

Tipo de Betún	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR0,1 [1/kPa]	JNR3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
CA-24 Promedio	**4,51**	**0,85**	**2,43**	**2,54**	**81,09**	**4,56**

8 ANALISIS DE RESULTADOS

8.1 CLASIFICACIÓN POR GRADO DE DESEMPEÑO

8.1.1 Análisis general.

En base a los betunes analizados es coherente que presenten diferencias en sus resultados debido a los cambios en su composición química que pueden sufrir al incorporar RAP a la mezcla IV-A-12. Los resultados de la clasificación PG del Betún 1, fue PG 64-22, cuya clasificación es común para un asfalto CA-24 tradicional.

A bajas temperaturas al incorporar un 18% de RAP a la mezcla IV-A-12, el asfalto se vuelve más rígido, alcanzando una temperatura de falla de -16°C, fallando 6 °C antes que el Betún 1. A temperaturas intermedias los ligantes se comportan de manera similar

y sus resultados reflejan pequeñas diferencias, prácticamente despreciables. Los resultados se detallan en el Anexo C.

8.1.2 Análisis específico.

8.1.2.1 Análisis frente al agrietamiento por fatiga

El Betún 1 cumple con el criterio de no exceder la temperatura esperada, en base a la norma cumple la restricción y el ligante tiene una menor probabilidad de fallar frente al agrietamiento por fatiga. Cabe destacar que este criterio no es suficiente para asegurar que el Betún 1 no falle frente al agrietamiento por fatiga, ya que existen otros factores que afectan a una mezcla asfáltica en servicio.

Por otro lado, los resultados de las temperaturas intermedias exactas son muy similares teniendo leves decimas de diferencia el Betún 2 y 3 respecto al Betún 1.

El Betún 3 alcanza la temperatura de falla más alta a los 21,8°C, como se muestra en la Figura 8-1.

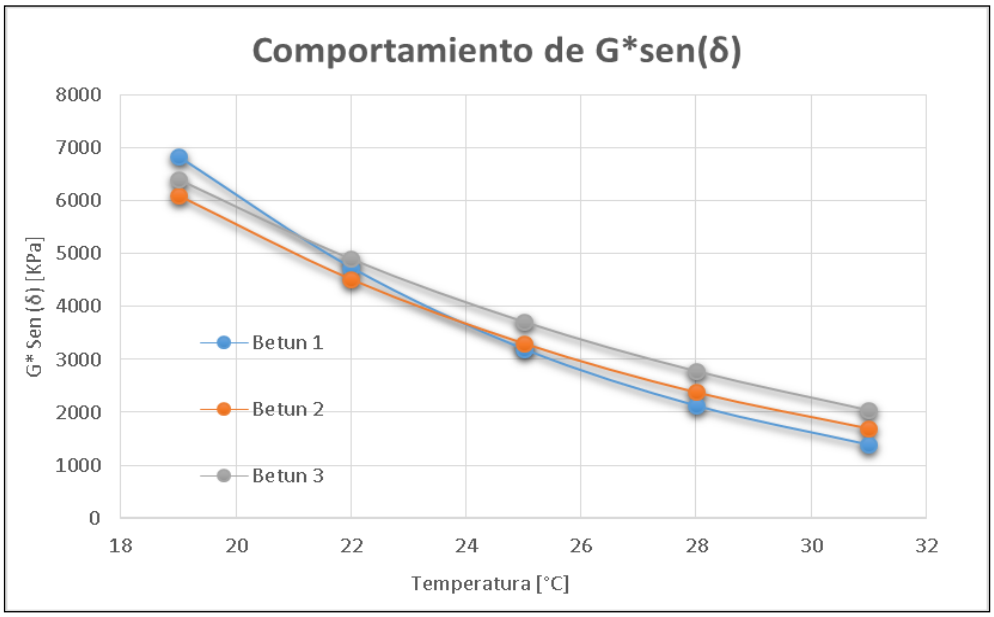

Figura 8-1 Comportamiento de G* sen (δ) en betunes envejecidos en PAV

8.1.2.2 Análisis frente al Ahuellamiento.

Para la prevención del ahuellamiento, se estudian los resultados en estado original y envejecido en HPDR, obtenidos a altas temperaturas, tomando en cuenta como resultado la temperatura más desfavorable entre ambos ensayos.

El Betún 1, alcanza su valor límite de G*/ sen (δ) a 68°C, obteniendo una clasificación PG a alta temperatura de 64°C. Por lo tanto si la temperatura interna del pavimento supera los 68°C el pavimento tiene mayor probabilidad de fallar por ahuellamiento.

8.1.2.3 Análisis frente al agrietamiento térmico.

En base a los resultados exactos obtenidos en el equipo BBR, podemos observar que para el Betún 3, su valor de m (t=60 [s]) falla a una temperatura de -16°C. Mientras que el Betún 2 y 1, consiguió un desempeño a baja temperatura de -22°C. Por lo tanto, el Betún 3 falla 6°C antes, siendo más susceptible que el pavimento falle por agrietamiento térmico, ya que el Betún 3 es mucho más rígido a bajas temperaturas.

8.2 CREEP AND RECOVERY

8.2.1 Análisis general.

En base a los resultados expuestos en punto 5.3.4, el Betún 1 presenta una pequeña recuperación a pequeñas deformaciones, pero a grandes deformaciones éstos no se recuperan prácticamente nada, siguiendo una tendencia a deformarse en los ciclos de recuperación. Esto se puede deber a que se aplica una carga en torsión y este ligante posee una recuperación tardía. Los resultados se detallan en el Anexo B.

8.2.2 Análisis específico.

En la Tabla 8-1 se resumen los resultados de dos muestras obtenidas del Betún 1.

Tabla 8-1 Resultados ensayos Creep And Recovery de muestra 1 y 2

Tipo de Betún	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR0,1[1/kPa]	JNR3,2[1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	**4,39**	**0,84**	**2,48**	**2,58**	**80,87**	**3,86**
Muestra 2	**4,62**	**0,86**	**2,37**	**2,49**	**81,32**	**5,26**

En la Figura D-3 del anexo D, se grafica detalladamente los resultados de ambas muestras y se aprecia que el ligante posee un mejor nivel de recuperación a bajas solicitaciones de carga (0,1[KPa]) que a altas (3,2 [KPa]) en donde no se recupera prácticamente nada el ligante y continua acumulando deformación.

9 CONCLUSIONES

Terminado el proceso de investigación se puede concluir que:

- Los datos de esta memoria obtenidos en el estudio de laboratorio no son representativos para la clasificación de Grado de Desempeño de un ligante asfáltico de una mezcla con RAP debido a que no están basados en el método oficial impuesto. En la tabla E-1 del anexo E compara ambos métodos.
- Se verifico la clasificación por Grado de Desempeño PG 64-22 para el ligante asfáltico tradicional CA-24, la cual es común para un ligante tradicional como éste.
- El ligante asfáltico recuperado con 8% de RAP grueso (3/4”), alcanzó una temperatura intermedia y baja de 21°C y -22°C con leve diferencia respecto al asfalto tradicional CA-24. A temperatura intermedia obtuvo una diferencia negativa con el ligante tradicional de -0.6°C. Por otro lado, a baja temperatura obtuvo una leve diferencia de +0,23°C respecto a sus temperaturas exactas. Por lo tanto, si se le agrega un porcentaje del ocho por ciento de RAP grueso a una mezcla asfáltica IV-A-12, no varía el comportamiento del ligante frente al agrietamiento por fatiga y térmico.
- El ligante asfáltico recuperado con 18% RAP alcanzó una temperaturas intermedias y bajas de 21,8°C y -16°C, volviéndose más rígido a baja temperatura siendo más susceptible al agrietamiento térmico que el ligante asfáltico CA-24. A temperaturas intermedias, alcanzó un comportamiento similar al asfalto CA-24, adquiriendo una diferencia positiva en su temperatura intermedia exacta de +0.2°C. Por lo tanto, si se agrega un porcentaje de RAP de dieciocho porciento a una mezcla IV-A-12, es probable que el ligante se vea afectado de manera negativa frente al agrietamiento térmico a bajas temperaturas, no obstante, no afecta a su comportamiento frente al agrietamiento por fatiga.
- Para futuros estudios se propone implementar el procedimiento descrito en el punto 6.2 de esta memoria para obtener el Grado de Desempeño del RAP de acuerdo a la metodología oficial y comparar los resultados con esta memoria.
- Tanto el equipo DSR, VR y BBR son muy sensibles y puede descalibrarse ante pequeños golpes, condiciones del medio ambiente, cantidad de aire, falta de agua en el equipo e incluso pequeñas vibraciones generan cambios en los resultados. Es por esto que los equipos se manipularon minuciosamente y se verificaron las condiciones previas antes de su uso.

10 REFERENCIAS

LIBROS

1. Asphalt Institute, ‘’The Asphalt Handbook’’, Manual Series N°3, 7a ed., Estados Unidos, 2007.

PUBLICACIONES, REVISTAS TÉCNICAS, DOCUMENTOS Y PAPERS

2. Wahr C., Apuntes del Curso Ingeniería Vial, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, 2014.
3. Valenzuela C., Wahr C., Delgadillo R., García G., Zuñiga R., Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas con RAP, 12° Congreso Internacional PROVIAL 08 al 12 de agosto de 2016, Valparaíso.

NORMAS Y ESPECIFICACIONES

4. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, ‘’Manual de Carreteras’’, Volumen 8, Edición 2016.
5. American Society for testing Materials, ‘’Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder’’, D6373-15.
6. American Society for testing Materials, ‘’Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer’’, D4402/D4402M-15.
7. American Society for testing Materials, ‘’Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer’’, D7175-15.
8. American Society for testing Materials, ‘’Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)’’, D6648-09.
9. American Society for testing Materials, ‘’Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling thin-Film Oven Test)’’, D2872-12.
10. American Society for testing Materials, ‘’Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)’’, D6521-13.
11. American Society for testing Materials, ‘’Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer’’, D7405-10a.
12. American Society for testing Materials, ‘’Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester”, D92-12b.
13. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures1, ASTM D2172/D2172M-11.
14. Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator1, ASTM D5404/5404M-12.

15. Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design, AASHTO M323-13.
16. Standard Test Method for Recovery of Asphalt from Solution by Abson Method1, ASTM D1856-09 (2015).
17. Quantitative extraction and recovery of asphalt Binder from Asphalt Mixtures, AASTHO T319-15.

TESIS Y MEMORIAS

18. González A., Wahr C., ‘’Determinación de las Propiedades Viscoelásticas de Betunes Asfalticos Tradicionales y Modificados Mediante la Utilización del Reómetro de Corte Dinámico’’, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2012.
19. Campos R., Wahr C., ‘’Primeros Ensayos con Reómetro de Viga en Flexion (BBR) en Chile’’, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2008.
20. García E., Wahr C., ‘’Construcción de Curvas Maestras Para Asfaltos Chilenos Utilizando el Reómetro de Viga en Flexión (BBR) y el Reómetro de Corte Dinámico (DSR) ’’, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2013.
21. López L., Wahr C., “Determinación de las Propiedades de Betunes Asfálticos Tradicionales y Modificados Mediante Ensayos Tradicionales y El Reómetro De Corte Dinámico (DSR)”, Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2013.

DIRECCIONES WEB

22. Pavement Interative, Dinamic Shear Rheometer, Bending Beam Rheometer.

    http://www.pavementinteractive.org/
23. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.

    http://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/hif11038.pdf
24. Universidad Politécnica de Cataluya, Barcelona.
    a. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6624/06.pdf?sequence=7
    b. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6270/06.pdf?sequence=7&isAllowed=y
    c. http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/6721/2046632.pdf
25. Ediciones especiales, El Mercurio “Pavimentos y construcción de Caminos desde una mirada Sustentable”.

    https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6624/06.pdf?sequence=7

26. ResearchGate, “Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en Caliente Fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición”.

    file:///C:/Users/Patricia/Downloads/Propiedades_mecanicas_de_mezclas_bituminosas_en_ca.pdf

27. Alarón J.,“Reciclado de pavimentos asfálticos en caliente en planta”, Tesis Doctorales en Red, Capitulo 3.

    http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5906/10CAPITULO3.pdf?sequence=10

28. Pérez F., “Reciclado en planta de Mezclas bituminosas en caliente”.

    http://www.crp.pt/docs/A19S-6Misturas%20betuminosas%20recicladas%20a%20quente%20em%20central.doc

29. Zuñiga R., “Mezclas asfálticas en caliente con pavimentos asfalticos Recuperados, RAP”, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Publicas Chile, 2016.

    http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezcla%20con%20RAP%20Marzo%202016.pdf

30. Instituto Chileno del asfalto, “Tecnología del asfalto y prácticas de construcción”, 1985.

    http://www.ichasfalto.cl/wp-content/uploads/2.TECNOLOGIA-DEL-ASFALTO-Y-PRACTICAS-DECONSTRUCCION.pdf

31. LIAOYUAN, Tipos de plantas asfálticas actuales.

    http://www.planta-de-asfalto.com/

32. Tipos de falla de pavimentos flexibles.

    http://fallasenpavimentoflexible.blogspot.cl/2014/05/tipos-de-fallas-en-pavimento-flexible.html

33. Falla por ahuellamiento y fatiga, Figura 2-7 y 2-10.

    http://www.vanguardia.com/santander/comunera/196346-iniciaron-obras-cerca-al-peaje

34. Falla por agrietamiento térmico, Figura 2-11.

    http://www.ryk.com.uy/images/dsc01400.jpg

35. Project NCHRP 09-12, “Incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave System”.

    http://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=948

36. Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method, 2000, NCHRP.

    a. Parte 1: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w30-a.pdf
    b. Parte 2: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w30-b.pdf

c. Parte 3: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w30-c.pdf

37. NCHRP REPORT 452, Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual, 2000.

    http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_452.pdf

38. NCHRP RESEARCH RESULTS DIGEST, Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Guidelines, 2001

    http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rrd_253.pdf

39. RAP and Superpave: An Excellent Blend

    https://www.fhwa.dot.gov/publications/focus/02apr/rap.cfm

40. Using RAP in the SUPERPAVE Mix Design System, Mike Aderson, Asphalt Institut, 2005.

    http://www.ctaa.ca/wp-content/uploads/2012/02/Anderson_CUPGA-2005-RAP.pdf

ANEXO A

Figuras y fotografías de equipos y ensayos

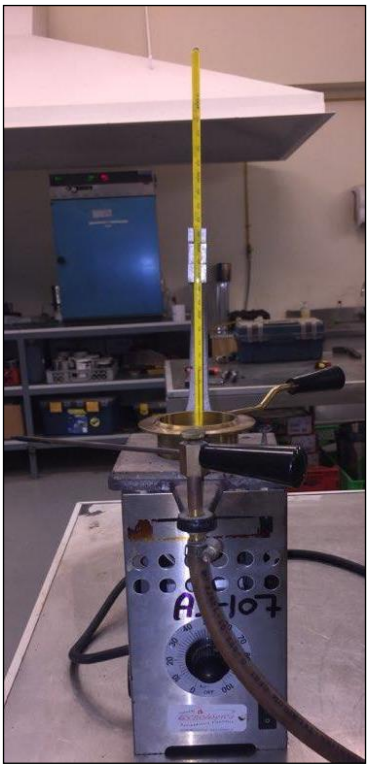

Foto A - 1 Copa abierta de Cleveland

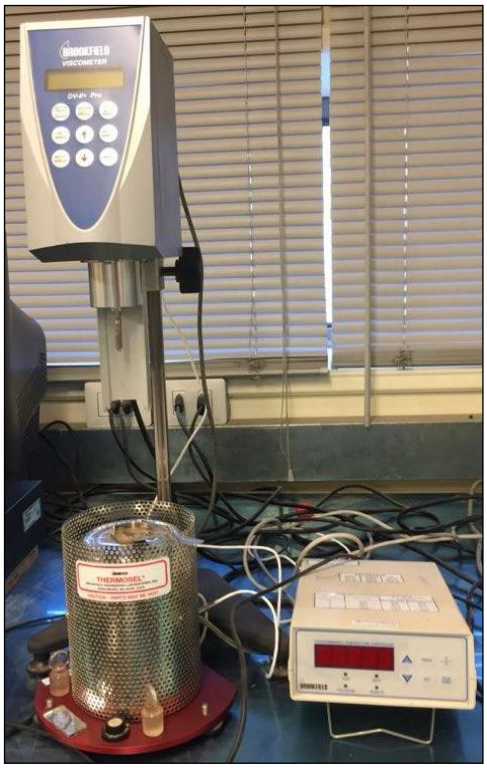

Foto A - 2 Viscosímetro Rotacional de Brookfield

Foto A - 3 Horno Rotatorio de Película Delgada

Foto A - 4 Cámara de envejecimiento acelerado

Foto A - 5 Reómetro de Corte Dinámico

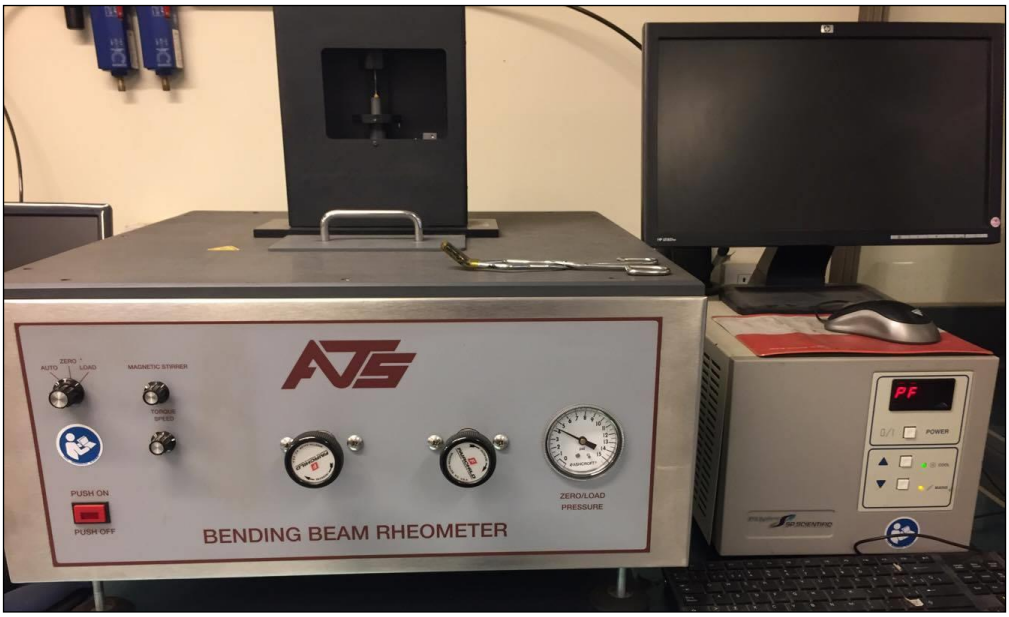

Foto A - 6 Reómetro de Viga en Flexión

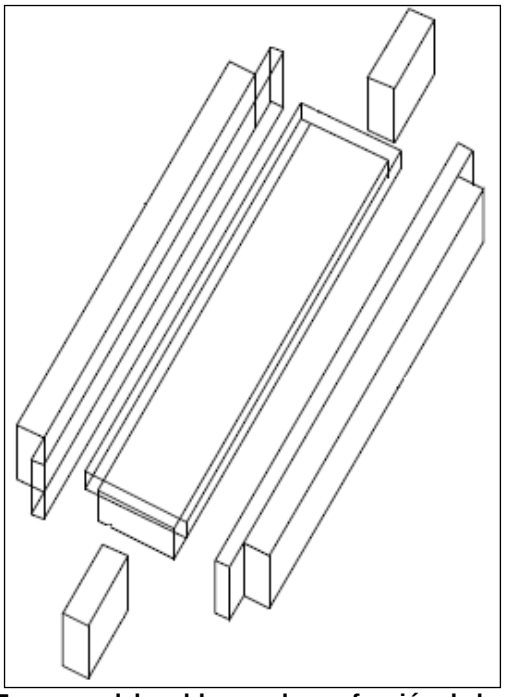

Figura A - 1 Esquema del molde para la confección de la viga, BBR [8]

Foto A - 7 Centrífuga AS-94.

Foto A - 8 Centrífuga AS-07

Foto A - 9 Destilador Rotatorio

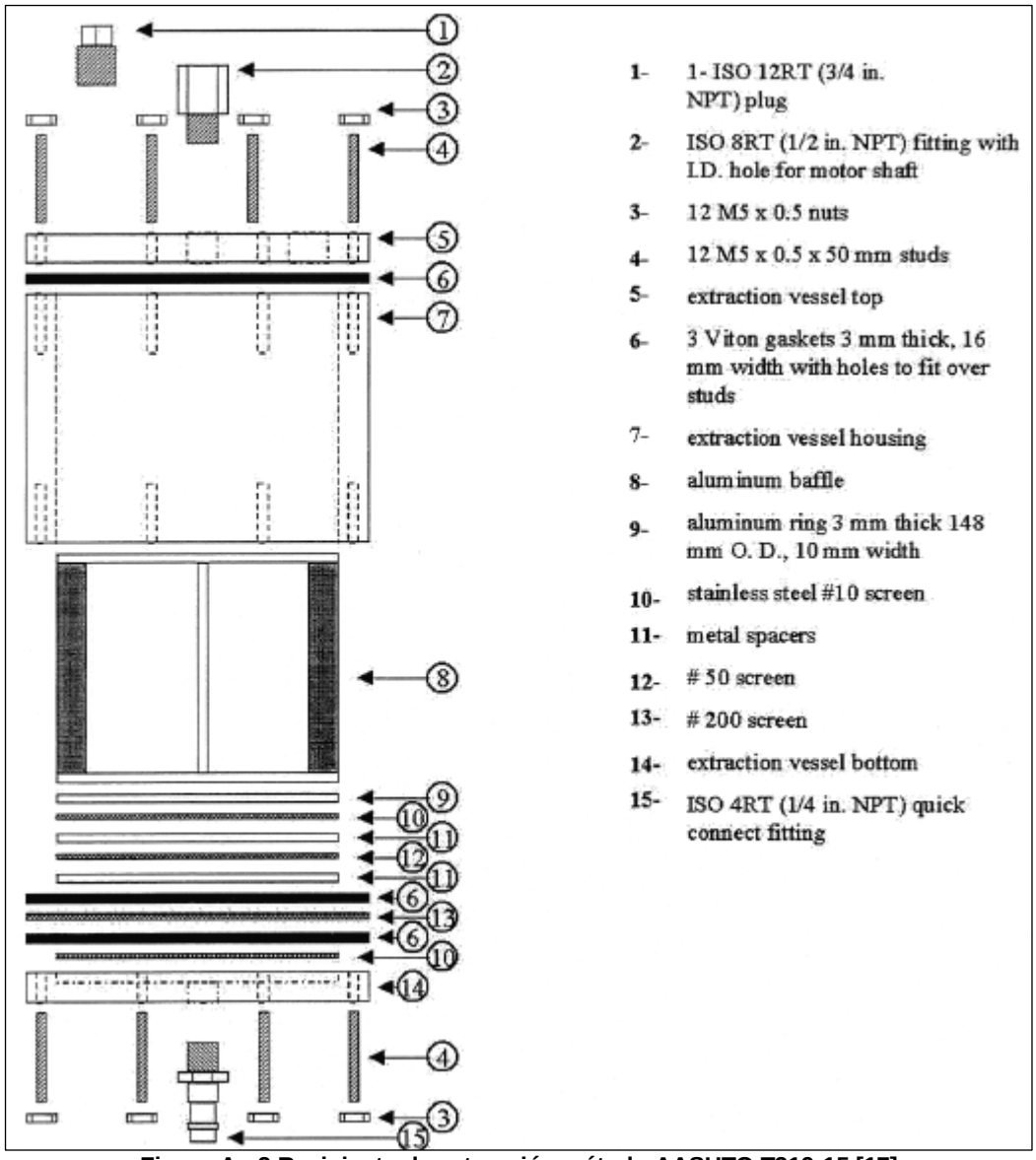

Figura A - 2 Recipiente de extracción método AASHTO T319-15 [17]

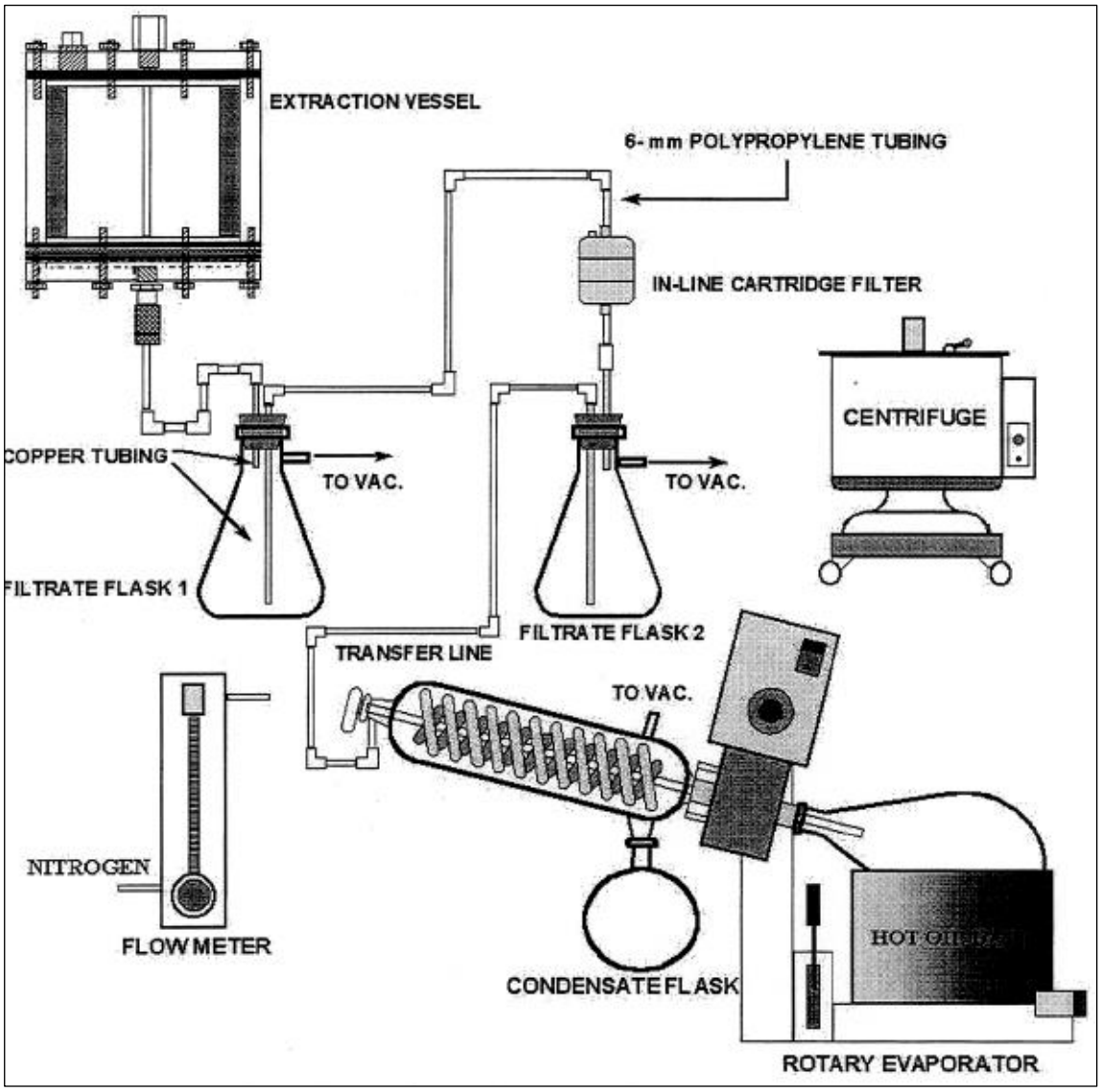

Figura A - 3 Aparato de extracción y recuperación método AASHTO T319-15 [17]

ANEXO B

Esquemas y ejemplos para determinar el rango de porcentaje de RAP o el ligante asfaltico virgen para una mezcla asfáltica, en base a la norma AASHTO M323-13.

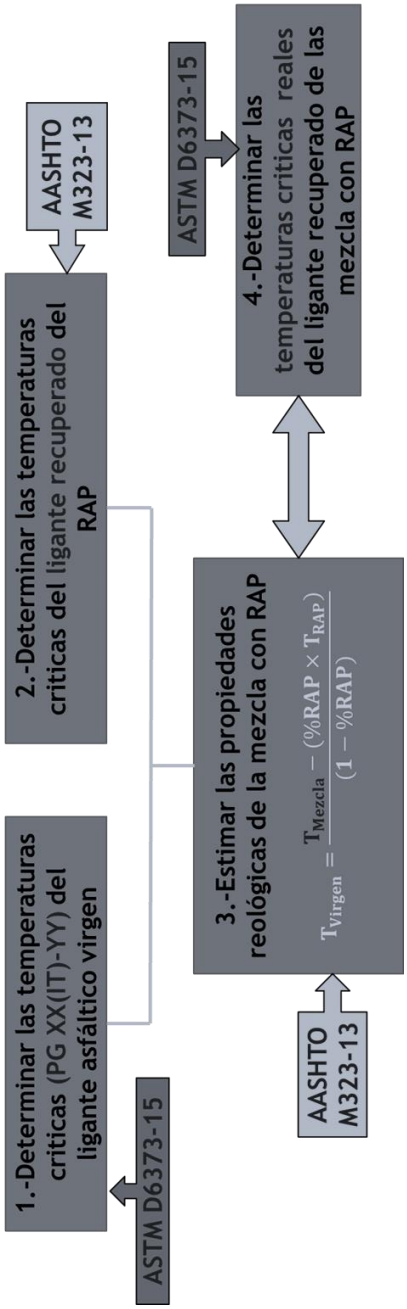

Figura B - 1 Esquema Método para Determinar el grado de desempeño de una mezcla con RAP.

Tabla B - 1 Comparación de metodología de ensayo para asfalto virgen, RAP y mezclas con RAP

ENSAYO	PG Asfalto Virgen	PG Asfalto recuperado del RAP	PG Asfalto recuperado de la mezcla con RAP
Extracción	(*)	AASHTO T319-15	1.- ASTM D2172-11 2.- AASHTO T319-15
Recuperación	(*)		1.- ASTM D1856-09 2.- ASTM D5404-12 3.- AASHTO T319-15
Temperatura alta **DSR-Original**	ASTM D7175-15	ASTM D7175-15	ASTM D7175-15 (2)
Envejecimiento Primario **HPDR**	ASTM D2872-12	ASTM D2872-12	ASTM D2872-12
Temperatura Alta **DSR-HPDR**	ASTM D7175-15 DSR-HPDR	ASTM D7175-15 DSR-HPDR	ASTM D7175-15 DSR-HPDR
Envejecimiento Secundario **PAV**	ASTM D6521-13	(*)	ASTM D6521-13
Temperatura Intermedia **DSR-PAV**	ASTM D7175-15 DSR-PAV	ASTM D7175-15 DSR-HPDR (1)	ASTM D7175-15 DSR-PAV
Temperatura Baja **BBR-PAV**	ASTM D6648-09 BBR-PAV	ASTM D6648-09 BBR-HPDR (1)	ASTM D6648-09 BBR-PAV

(*) No se ejecuta este ensayo.

(1) Se analizan la muestra como si estuvieran envejecidas en PAV.

(2) se considera la muestra como original una vez recuperada.

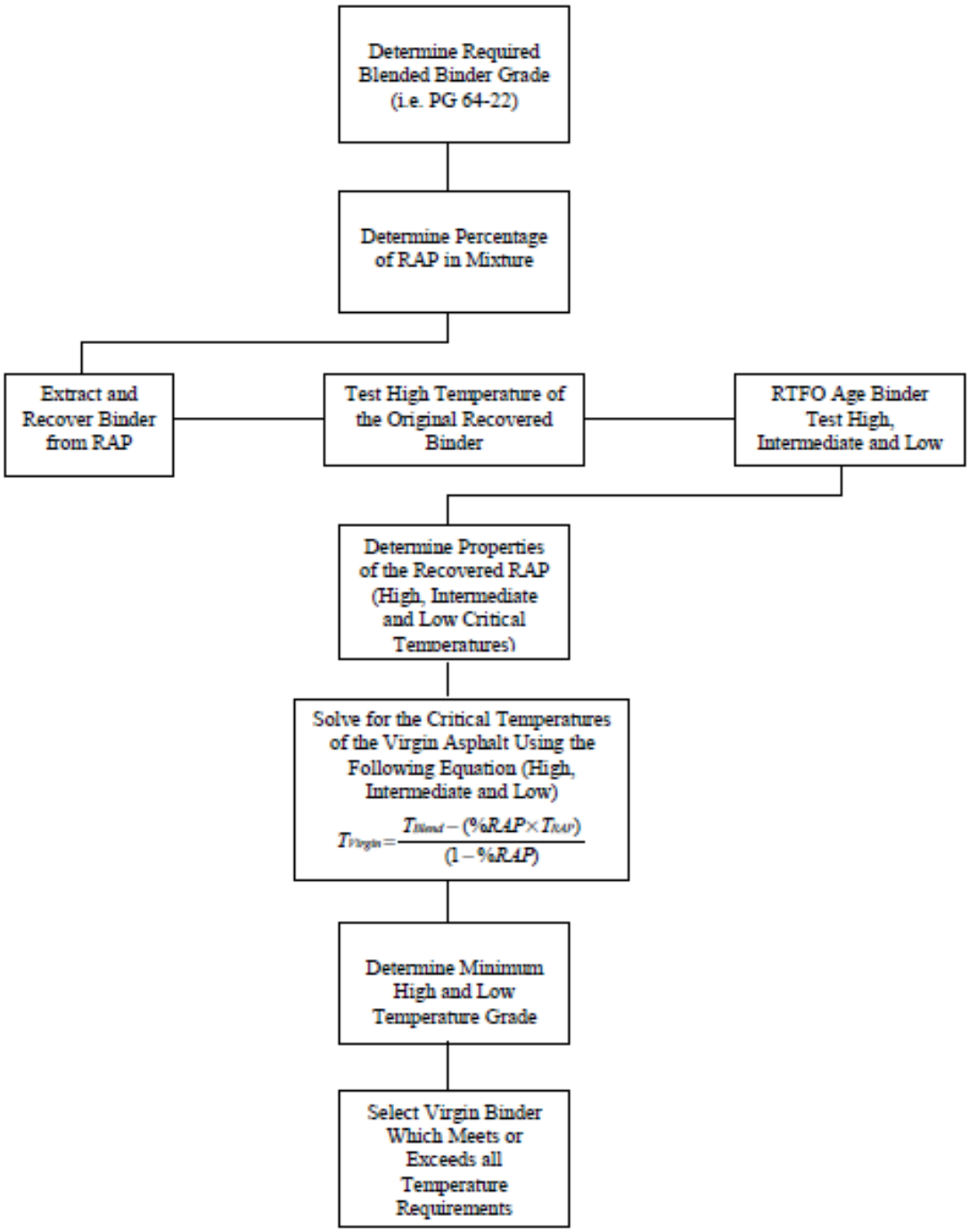

Figura B - 2 Esquema Método A para determinar el ligante asfáltico virgen en una mezcla con RAP [36]

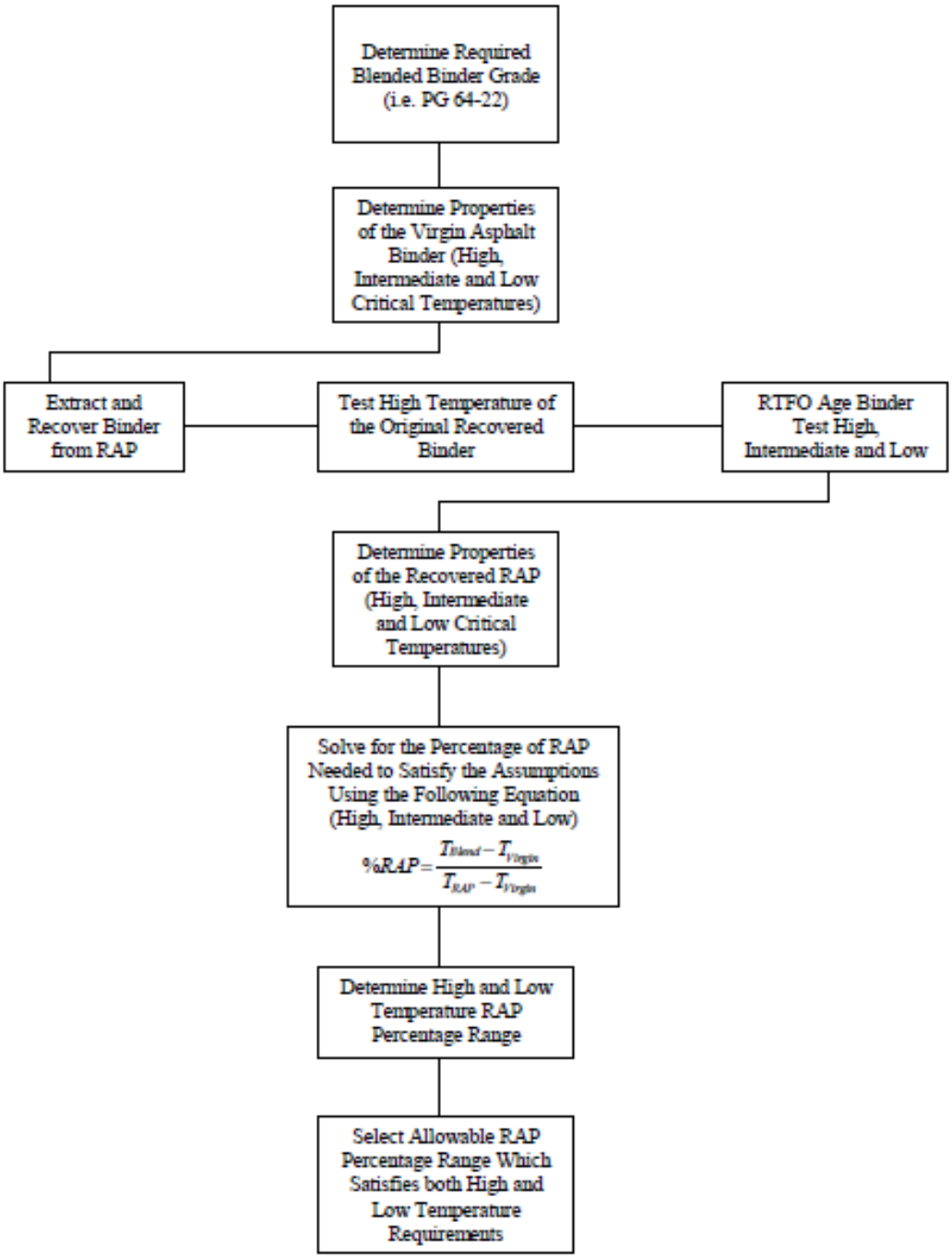

Figura B - 3 Esquema Método B para determinar el rango del porcentaje de RAP en una mezcla [36].

Ejemplo: Método A, Determinar el Grado de Desempeño del ligante asfáltico virgen.

- Se desea un Grado de Desempeño final = PG64-22.
- El contenido de asfalto = 30%
- El RAP recuperado es un PG 82-10 y sus propiedades se presentan en la Tabla B-2.

Tabla B - 2 Propiedades del ligante asfáltico recuperado del RAP PG 82-10 [37]

Aging	Property	Critical Temperature, °C	
Original	DSR $G^*/\sin$	High	**86.6**
RTFO	DSR $G^*/\sin$	High	88.7
PAV*	DSR $G^*\sin$	Intermediate	**30.5**
	BBR S-value	Low	−4.5
	BBR m-value	Low	**−1.7**
	PG	Actual	PG 86-11
		MP1	PG 82-10

Mediante la Ecuación 6-9 se determinan las temperaturas críticas estimadas del ligante Virgen y se ejecutan los gráficos que se muestran en la Figura B-4, B-5 y B-6, para posteriormente ser elegido su Grado de Desempeño final mediante la norma ASTM D6373-15, como se muestra en la Tabla C-1.

.

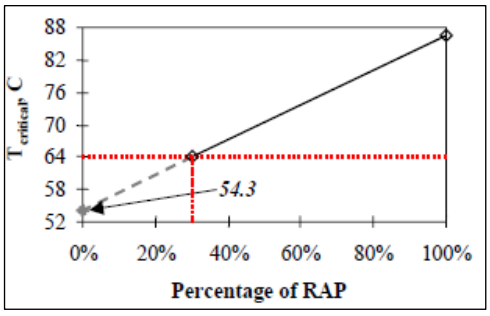

Figura B - 4 Alta temperatura del asfalto virgen [37]

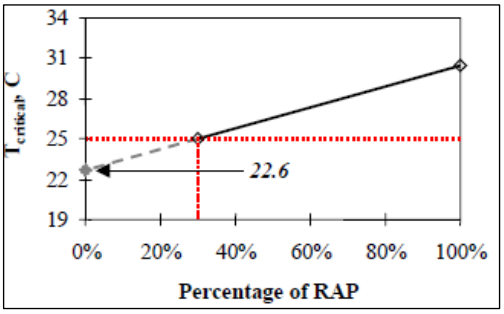

Figura B - 5 Temperatura intermedia del asfalto virgen [37]

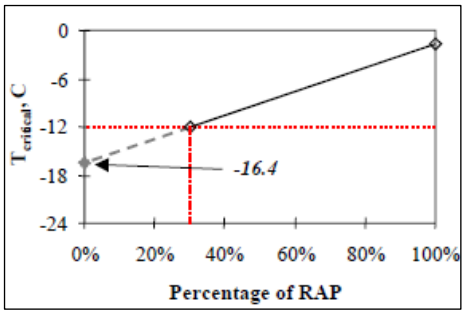

Figura B - 6 Temperatura baja del asfalto virgen [37]

Tabla B - 3 Temperaturas críticas estimadas del ligante asfáltico virgen [37]

Aging	Property	Critical Temperature, °C	
Original	DSR $G^*/\sin\delta$	High	**54.3**
RTFO	DSR $G^*/\sin\delta$	High	53.4
PAV	DSR $G^*\sin\delta$	Intermediate	**22.6**
	BBR S-value	Low	–15.2
	BBR m-value	Low	**–16.4**
	PG	Actual	PG 54-26
		MP1	PG 58-28

En base a los resultados obtenidos se determina que el ligante asfáltico virgen seleccionado será un PG 58-28.

Para cumplir con el grado de temperatura intermedio (G*sen δ) de la Figura B-5, el ligante asfáltico virgen necesitaría tener una temperatura intermedia crítica no superior a 22,6 ° C. Debido a que la temperatura intermedia crítica máxima para un asfalto PG 58-28 es 19ºC, el ligante asfaltico seleccionado debe cumplir fácilmente todos los requisitos de aglutinante mezclado.

Ejemplo: Método B, Determinar el rango del porcentaje de RAP en la mezcla.

- Se desea un Grado de Desempeño final = PG64-22.
- El grado del ligante virgen es un PG 58-28, sus temperaturas críticas se presentan en la Tabla B-4.
- El RAP recuperado es un PG 82-10 y sus propiedades se presentan en la Tabla B-4.

Tabla B - 4 Propiedades del ligante asfáltico virgen y recuperado del RAP [37]

		Critical Temperature, °C		
Aging	Property	Temperature Range	Virgin Binder	RAP Binder
Original	DSRG^*/sin	High	**60.5**	**86.6**
RTFO	DSRG^*/sin	High	61.0	88.7
PAV*	DSRG^*sin	Intermediate	**14.2**	**30.5**
	BBRS-value	Low	–22.2	–4.5
	BBRm-value	Low	**–19.0**	**–1.7**
	PG	Actual	PG 60-29	PG 86-11
		MP1	PG 58-28	PG 82-10

Utilizando la Ecuación 6-10, con las temperaturas crítica alta, intermedia y baja por separado, se determina el rango del porcentaje de RAP necesario para satisfacer las suposiciones. Los resultados se indican en Tabla B-5 y los gráficos de la Figura B-7, B-8 y B-9.

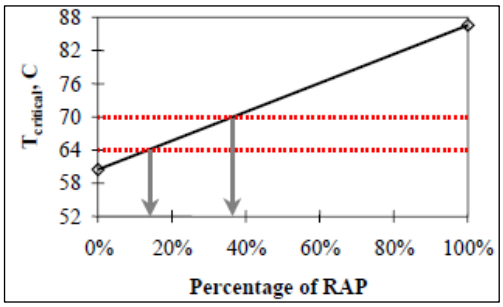

Figura B - 7 Porcentaje de RAP de la temperatura alta original y envejecida en HPDR [37]

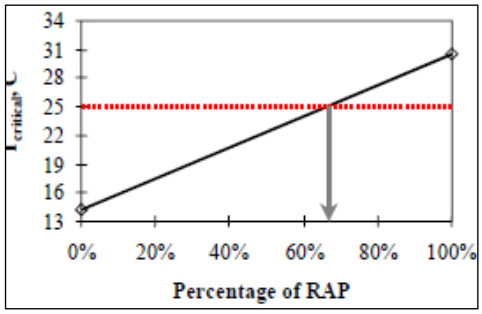

Figura B - 8 Porcentaje de RAP de la temperatura intermedia [37]

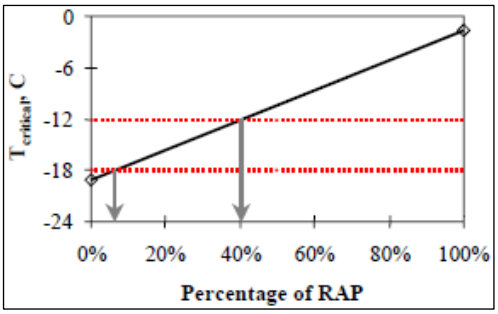

Figura B - 9 Porcentaje de RAP de la temperatura baja [37]

Tabla B - 5 Estimación del rango de porcentajes de RAP final [37]

			Percentage of RAP to Achieve	
Aging	Property	Temperature	PG 64-22	PG 70-28
Original	DSR $G^*/\sin\delta$	High	**13.4%**	**36.4%**
RTFO	DSR $G^*/\sin\delta$	High	10.8%	32.5%
PAV	DSR $G^*\sin\delta$	Intermediate	**66.3%**	—
	BBR S-value	Low	57.6%	23.7%
	BBR m-value	Low	**40.5%**	**5.8%**

Como se indica en la Tabla B-5 y grafico de la Figura B-7, un porcentaje de RAP entre el 14 por ciento y el 36 por ciento debe satisfacer los requisitos de alta temperatura para conseguir el Grado de Desempeño deseado en la mezcla (PG 64-22). Obsérvese que para lograr el Grado de Desempeño mínimo PG 64-xx, se redondea el porcentaje de RAP. Para conseguir un grado de PG 64 - xx máximo (es decir, no se desea un grado de PG 70 - xx), el porcentaje de RAP se redondea hacia abajo.

La Tabla B-5 y el grafico de la Figura B-9 indican que un porcentaje de RAP entre el 6 y el 40 por ciento debe satisfacer los requisitos de baja temperatura para conseguir el Grado de Desempeño deseado en la mezcla (PG 64-22). Obsérvese que para alcanzar el PG Xx-22 grado, el porcentaje de RAP se redondea hacia abajo. Para conseguir un grado máximo de PG xx-22 (es decir, no se desea un grado de PG xx-28), se redondea el porcentaje de RAP.

A partir de la Tabla B-5 y de la Figura B-7 y B-9, un porcentaje de RAP entre 14 por ciento y 36 por ciento cumpliría todos los requisitos del ligante asfáltico PG 64-22 de la mezcla. Si el grado máximo de alta temperatura no es un problema el porcentaje de RAP podría aumentarse hasta 40% sin cambiar el grado de baja temperatura deseado del ligante asfáltico de la mezcla.

Para satisfacer el grado de temperatura intermedia (G * sin δ) de la figura B-8 la Tabla B-5, el porcentaje de RAP debería ser inferior al 66 por ciento.

ANEXO C

Tablas y Resultados de los ensayos.

Tabla C - 1 Resumen del método SUPERPAVE [5]

T° máx 7 días seguidos, °C	PG 46			PG 52							PG 58					PG 64						PG 70						PG 76					PG 82				
T° Min. Absoluta, °C	-34	-40	-45	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34
LIGANTE ORIGINAL																																					
≥230°C	(PUNTO DE INFLAMACION) FP																																				
≤ 3Pa·s (135°C)	(VISCOCIMETRO ROTACIONAL) VR																																				
≥ 1,00 kPa	(REOMETRO DE CORTE DINAMICO) DSR G*/sen(δ)																																				
	45			52							58					64						70						76					82				
ENVEJECIMIENTO EN HPDR PERDIDA DE MASA <1,00%																																					
≥ 2,20 kPa	(REOMETRO DE CORTE DINAMICO) DSR G*/sen(δ)																																				
	45			52							58					64						70						76					82				
ENVEJECIDO EN PAV																																					
20 Horas, 2,1 MPa	90			90							100					100						100 (110)						100 (110)					100 (110)				
≤ 5000 kPa	(REOMETRO DE CORTE DINAMICO) DSR G*sen(δ)																																				
	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	47	37	34	31	28
S ≤300 MPa 0,300≤m	(REOMETRO DE VIGA EN FLEXION) BBR																																				
	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Reportar valor	(REOMETRO DE VIGA EN FLEXION) BBR																																				
≥ 1,00%	(TRACCION DIRECTA) DT																																				
	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

Tabla C - 2 Resultados de la temperatura alta del ensayo DSR-Original

Clasificación PG Estado Original								
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [kPa]						
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]			Falla a 1,0 [KPa]			
		58	64	70	Temp. [°C]	CV d2s%		Temp. Promedio [°C]
Betún 1	1	3,49	1,66	0,83	68,4	0,1	CUMPLE	68,5
	2	3,66	1,71	0,84	68,5			

Tabla C - 3 Resultados temperatura alta del ensayo DSR-HPDR

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)								
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [kPa]						
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]			Falla a 1,0 [KPa]			
		58	64	70	Temp. [°C]	CV d2s%		Temp. Promedio [°C]
Betún 1	1	7,81	3,58	1,70	67,9	0,1	CUMPLE	67,9
	2	7,56	3,51	1,69	67,8			

Tabla C - 4 Resultados de la temperatura intermedia del ensayo DSR-PAV

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV)										
Datos del Betún		Parámetro G* sen(δ) [kPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 5000[kPa]			
		31	28	25	22	19	Temp. [°C]	CV d2s%		Temp. Promedio [°C]
Betún 1	2	1440	2210	3330	4940	7150	21,9	2,30	CUMPLE	21,6
	3	1330	2040	3070	4550	6540	21,2			
Betún 2	1	1760	2470	3440	4710	6370	21,4	2,69	CUMPLE	21,0
	2	1640	2300	3180	4330	5830	20,6			
Betún 3	2	2010	2740	3680	4870	6390	21,7	0,33	CUMPLE	21,8
	3	2070	2820	3750	4930	6420	21,8			

ANEXO D

Resultados ensayo Creep and Recovery

Tabla D - 1 Multiplicador para coeficiente de variación, ensayo Creep and Recovery

N° Ensayos	Multiplicador	Coeficiente de Variación Final			
		R%0,1 [kPa]	R%3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]
2	2,8	6,7	8,4	12,9	16,0
3	3,3	7,9	9,9	15,2	18,8
4	3,6	8,6	10,8	19,4	19,8
5	3,9	9,4	11,7	21,1	21,5
6	4,0	9,6	12,0	21,6	22,0
7	4,2	10,1	12,6	22,7	23,1
8	4,3	10,3	12,9	23,2	23,7
9	4,4	10,6	13,2	23,8	24,2
10	4,5	10,8	13,5	24,3	24,8

Tabla D - 2 Cálculos Ensayo Creep and Recovery, Betún 1, muestra 1

Muestra 1										
Nº Ciclos	ε0	εc	εr	ε1	ε10	εr(Carga,N)	εr(Carga,N)	R	Jnr	Jnr
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]
1	0	0,275	0,264	0,275	0,264	0,011	4	4,393	2,64	2,48
2	0,264	0,534	0,523	0,27	0,259	0,011	4,074		2,59	
3	0,523	0,789	0,777	0,266	0,254	0,012	4,511		2,54	
4	0,777	1,04	1,03	0,263	0,253	0,01	3,802		2,53	
5	1,03	1,29	1,27	0,26	0,24	0,02	7,692		2,4	
6	1,27	1,53	1,52	0,26	0,25	0,01	3,846		2,5	
7	1,52	1,77	1,76	0,25	0,24	0,01	4		2,4	
8	1,76	2,01	2	0,25	0,24	0,01	4		2,4	
9	2	2,25	2,24	0,25	0,24	0,01	4		2,4	
10	2,24	2,49	2,48	0,25	0,24	0,01	4		2,4	
11	2,48	11	10,9	8,52	8,42	0,1	1,174	0,841	2,631	2,576
12	10,9	19,4	19,4	8,5	8,5	0	0		2,656	
13	19,4	27,9	27,8	8,5	8,4	0,1	1,176		2,625	
14	27,8	36,2	36,1	8,4	8,3	0,1	1,19		2,594	
15	36,1	44,5	44,4	8,4	8,3	0,1	1,19		2,594	
16	44,4	52,7	52,6	8,3	8,2	0,1	1,205		2,563	
17	52,6	60,8	60,8	8,2	8,2	0	0		2,563	
18	60,8	68,9	68,9	8,1	8,1	0	0		2,531	
19	68,9	77	76,9	8,1	8	0,1	1,235		2,5	
20	76,9	85	84,9	8,1	8	0,1	1,235		2,5	
							Rdiff	**80,865**	**Jnr-diff**	**3,856**

Tabla D - 3 Cálculos Ensayo Creep and Recovery, Betún 1, muestra 2

Muestra 2										
Nº Ciclos	ε0	εc	εr	ε1	ε10	εr(Carga,N)	εr(Carga,N)	R	Jnr	Jnr
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]
1	0	0,259	0,248	0,259	0,248	0,011	4,247	4,624	2,48	2,37
2	0,248	0,503	0,492	0,255	0,244	0,011	4,314		2,44	
3	0,492	0,745	0,733	0,253	0,241	0,012	4,743		2,41	
4	0,733	0,983	0,972	0,25	0,239	0,011	4,4		2,39	
5	0,972	1,22	1,21	0,248	0,238	0,01	4,032		2,38	
6	1,21	1,46	1,44	0,25	0,23	0,02	8		2,3	
7	1,44	1,69	1,68	0,25	0,24	0,01	4		2,4	
8	1,68	1,92	1,91	0,24	0,23	0,01	4,167		2,3	
9	1,91	2,15	2,14	0,24	0,23	0,01	4,167		2,3	
10	2,14	2,38	2,37	0,24	0,23	0,01	4,167		2,3	
11	2,37	10,6	10,5	8,23	8,13	0,1	1,215	0,864	2,541	2,495
12	10,5	18,7	18,6	8,2	8,1	0,1	1,22		2,531	
13	18,6	26,8	26,7	8,2	8,1	0,1	1,22		2,531	
14	26,7	34,8	34,8	8,1	8,1	0	0		2,531	
15	34,8	42,8	42,7	8	7,9	0,1	1,25		2,469	
16	42,7	50,8	50,7	8,1	8	0,1	1,235		2,5	
17	50,7	58,7	58,6	8	7,9	0,1	1,25		2,469	
18	58,6	66,6	66,5	8	7,9	0,1	1,25		2,469	
19	66,5	74,4	74,4	7,9	7,9	0	0		2,469	
20	74,4	82,2	82,2	7,8	7,8	0	0		2,438	
							Rdiff	**81,316**	**Jnr-diff**	**5,261**

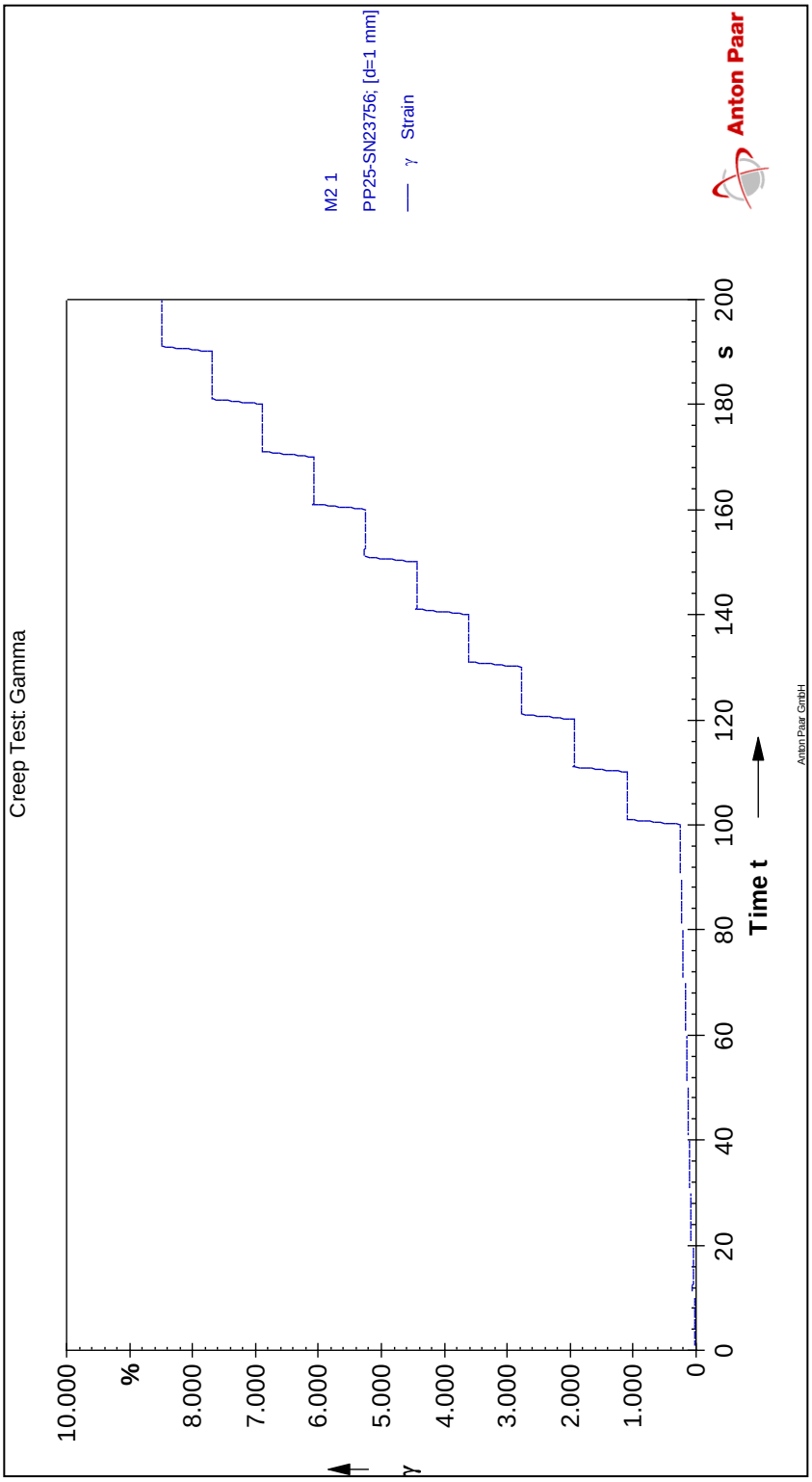

Figura D - 1 Grafico Creep and Recovery, Betún 1, muestra 1

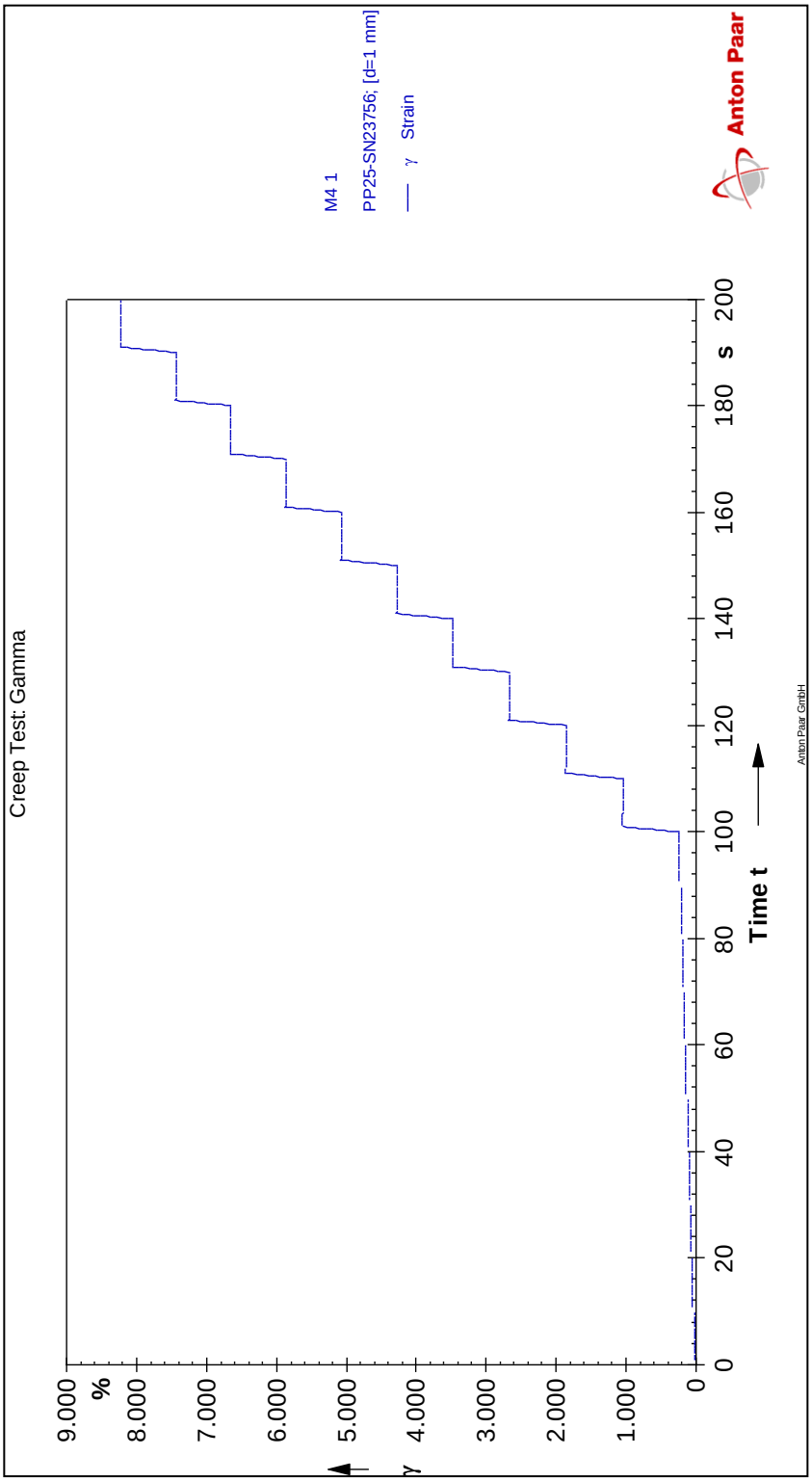

Figura D - 2 Grafico Creep and Recovery, Betún 1, muestra 2

Tabla D - 4 Resumen de resultados Creep and Recovery, Tipo de betún 1

RESUMEN						
	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR0,1[1/kPa]	JNR3,2[1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	4,39	0,84	2,48	2,58	80,87	3,86
Muestra 2	4,62	0,86	2,37	2,49	81,32	5,26
Desviación Estándar	0,163	0,017	0,078	0,057	0,319	0,994
Promedio	**4,51**	**0,85**	**2,43**	**2,54**	**81,09**	**4,56**
Coef. Variación 1S%	**3,62**	**1,94**	**3,21**	**2,26**		
Condición	**CUMPLE**	**CUMPLE**	**CUMPLE**	**CUMPLE**		

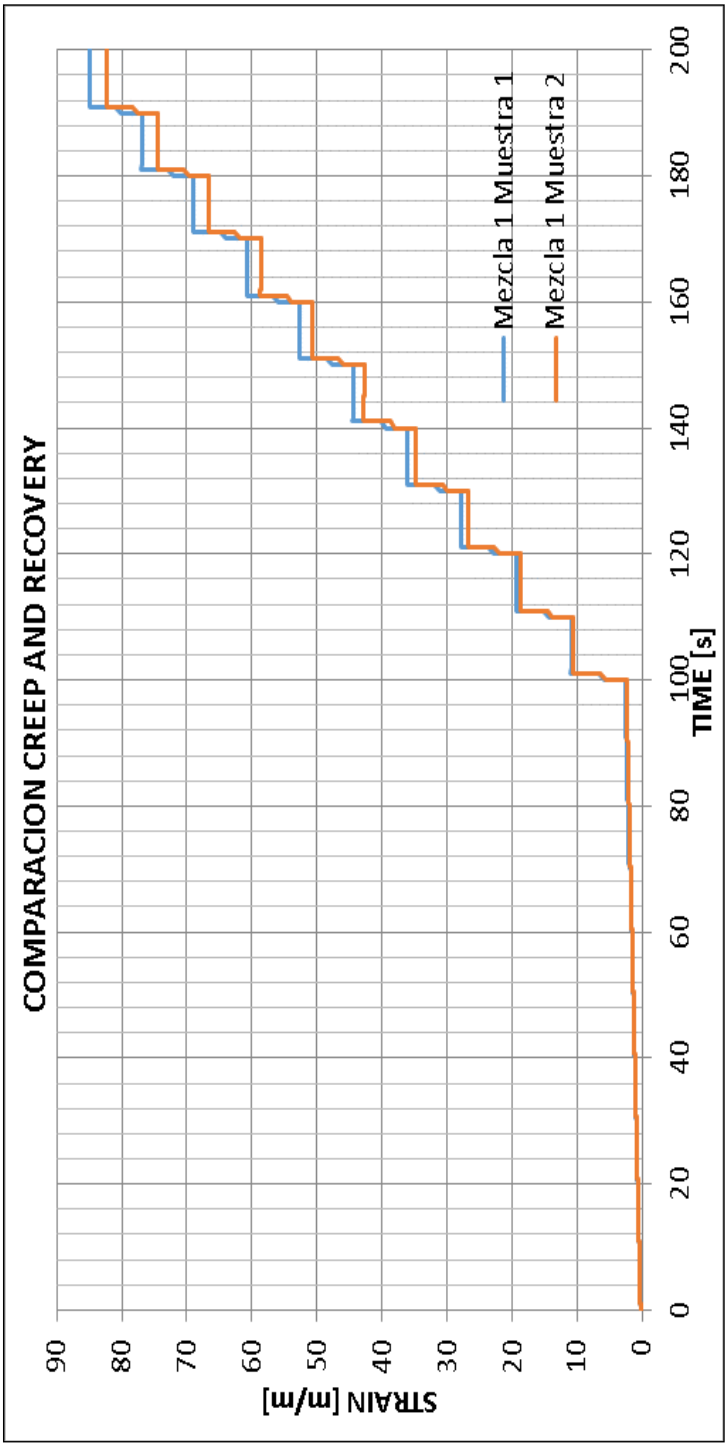

Figura D - 3 Resumen de grafico de resultados de Creep and Recovery de la muestra 1 y 2.

ANEXO E

Fotografías e imágenes de plantas de mezcla asfáltica y Otros.

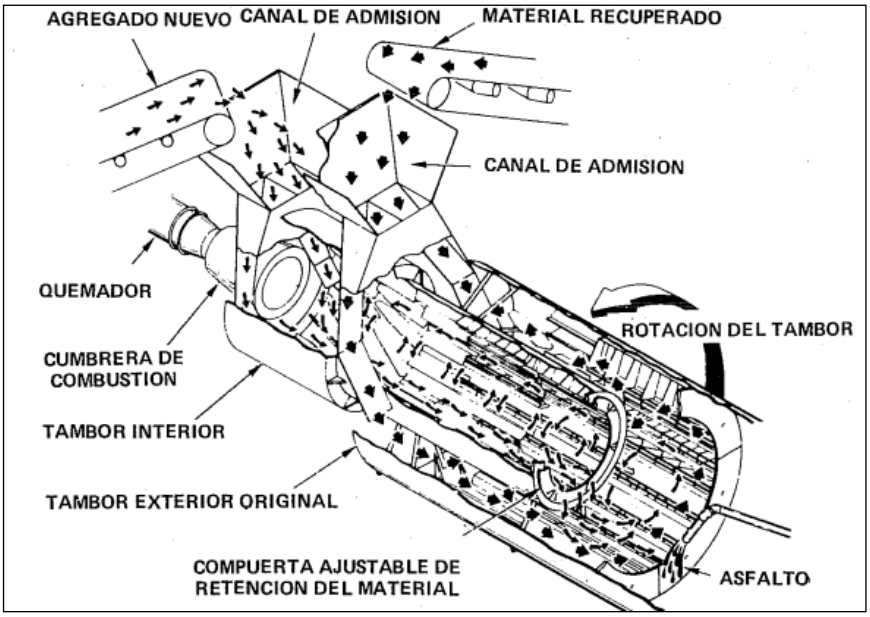

Figura E - 1 Detalles del tambor dentro de un tambor [30]

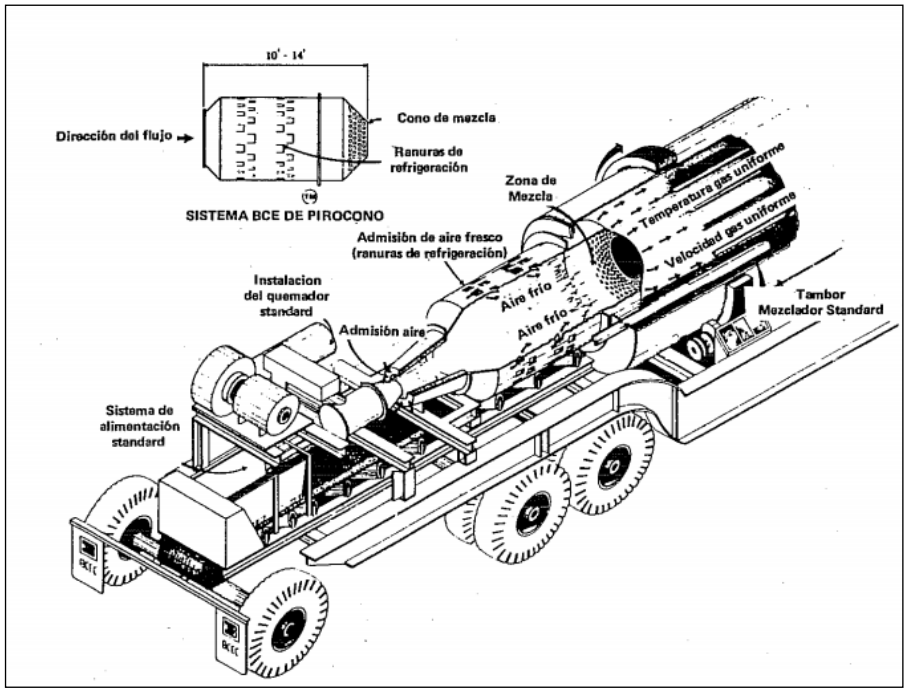

Figura E - 2 Detalles de tambor mezclador con convección a baja temperatura [30]

Figura E - 3 Planta asfáltica discontinua, Modelo LB4000, provisto por la empresa LYAOYUAN [31]

Figura E - 4 Planta asfáltica discontinua, Modelo LB4000, provisto por la empresa LYAOYUAN [31]

Figura E - 5 Planta asfáltica continua, Modelo SLB-8, provisto por la empresa LYAOYUAN [31]

Figura E - 6 Planta asfáltica continua, Modelo SLB-8, provisto por la empresa LYAOYUAN [31]

Tabla E - 1 Comparación del método experimental y oficial del estudio de una mezcla con RAP

ENSAYO	PG Asfalto recuperado de la mezcla con RAP (Experimental)	PG Asfalto recuperado de la mezcla con RAP (Oficial)
Extracción	MC 8.302.36	1.- ASTM D2172-11 2.- AASHTO T319-15
Recuperación	MC 8.302.52	1.- ASTM D1856-09 2.- ASTM D5404-12 3.- AASHTO T319-15
Temperatura alta **DSR-Original**	(*)	ASTM D7175-15 (2)
Envejecimiento Primario **HPDR**	(*)	ASTM D2872-12
Temperatura Alta **DSR-HPDR**	(*)	ASTM D7175-15 DSR-HPDR
Envejecimiento Secundario **PAV**	ASTM D6521-13	ASTM D6521-13
Temperatura Intermedia **DSR-PAV**	ASTM D7175-15 DSR-PAV	ASTM D7175-15 DSR-PAV
Temperatura Baja **BBR-PAV**	ASTM D6648-09 BBR-PAV	ASTM D6648-09 BBR-PAV

(*) No se ejecuta este ensayo.