UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2018

EFECTO DEL PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO EN PRUEBAS DE DESEMPEÑO RUEDA DE HAMBURGO (HWT), TRACCION INDIRECTA (TSR) Y ADHERENCIA PASIVA

QUEZADA QUEZADA, JENNIFER KARINA

http://hdl.handle.net/11673/42722

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

“EFECTO DEL PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO EN PRUEBAS DE DESEMPEÑO RUEDA DE HAMBURGO (HWT), TRACCION INDIRECTA (TSR) Y ADHERENCIA PASIVA”

Memoria de Título presentada por

JENNIFER KARINA QUEZADA QUEZADA

Como requisito parcial para optar al título de

Constructor Civil

Profesor Guía

Juan Cea Chacón

Profesor Correferente

Carlos Wahr Daniel

Octubre 2018

Agradezco al Centro de Desarrollo e Investigación, por brindarme el espacio y los materiales para poder desarrollar la presente investigación. Especialmente agradezco a mi profesor guía Juan Cea y laboratoristas (Don Gustavo, Don Jaime y Don Renato) por todo el aprendizaje adquirido durante esa etapa.

Agradezco al Profesor Sr. Carlos Wahr, por su guía primero como profesor de los ramos de Vialidad en la Universidad y posteriormente en la elaboración de la presente investigación.

Agradezco a mis padres, Paola y Richard por educarme con alas, apoyándome y aconsejándome en todas las decisiones que me han llevado a ser quien soy hoy y ahora.

Finalmente agradezco a mi Jorge por el apoyo, comprensión, consejo y el amor que me entrega cada día.

“EFECTO DEL PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO EN PRUEBAS DE DESEMPEÑO RUEDA DE HAMBURGO (HWT), TRACCION INDIRECTA (TSR) Y ADHERENCIA PASIVA”

RESUMEN

Esta memoria, desarrolla una investigación para evaluar el efecto de la variación del % de cemento asfáltico en pruebas de desempeño: Rueda de Hamburgo (HWT) usando norma UNE 12697-22 y AASHTO T324-14; Tracción Indirecta (TSR) según norma AASHTO T283-14 y Adherencia Pasiva según norma XP T66-043. El árido proviene del Pozo de Confluencia y es utilizado en plantas asfálticas de Bitumix Sur. El diseño de la mezcla en estudio lo provee el Centro de Desarrollo e Investigación (CDI) de Constructora Bitumix S.A. en Santiago. Y establece un contenido óptimo de asfalto de 5,1% ± 0,3 de CA-24.

En la presente investigación, se realizan mezclas utilizando un 4,7%, 5,1% y 5,5% de CA-24, también para el óptimo de asfalto de 5,1% de CA-24 se realizan mezclas con aditivo mejorador de adherencia (5,1% CA-24 + AMA) y aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% CA-24 + AMT). En total se evalúa el desempeño de cinco mezclas en estudio.

De los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño de las mezclas, donde se varía el contenido de asfalto con respecto al óptimo (4,7%, 5,1% y 5,5% de CA-24), se concluye, que el desempeño de las mezclas no envejecidas, depende del contenido de asfalto, donde a menor contenido de asfalto con respecto al óptimo, la mezcla sufre menor ahuellamiento, pero es más susceptible a sufrir daños producto de la humedad, mientras que si se aumenta el contenido de asfalto con respecto al óptimo, la mezcla sufre mayor ahuellamiento, pero es menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad. Este comportamiento también se observa en mezclas envejecidas, donde a mayor contenido de asfalto con respecto al óptimo, existe una mayor deformación plástica y la mezcla es menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad.

Al analizar los resultados, desde el punto de vista en que se mantiene el contenido óptimo de asfalto (5,1% CA-24) y se le agregan aditivo mejorador de adherencia (5,1% CA-24 + AMA) y aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% CA-24 + AMT), se concluye que, en mezclas envejecidas y no envejecidas, al lograr mayor adherencia entre el CA y el árido, la mezcla sufre menor ahuellamiento y ésta es menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad.

ABSTRACT

The memory develops a research to evaluate the CA % effect in performance tests for Hamburg Whell-Track Testing (HWT) using UNE 12697-22 and AASHTO T324-14 specification; (TSR) Tensile Strength according to AASHTO T283-14 specification and Passive Adhesion in agreement to XP T66-043 standard. Using aggregate from Confluencia well situated in Bitumix Sur plant. The study design mix is provided by Centro de Desarrollo e Investigación (CDI), Bitumix Santiago. The design stablishes an optimal asphalt content from 5,1% ± 0,3 to CA-24.

In the present research are made mixtures using a 4,7%, 5,1% and 5,5% to CA-24, also by the optimal asphalt from 5,1% to CA-24 mixtures are made with adhesion improver workability (5,1% CA-24 + AMT). In total, the performance of five mixtures under study is evaluated.

From the results obtained in the test performance of the mixtures where the asphalt content is varied with respect to the optimum (4,7%, 5,1% and 5,5% to CA-24). It is concluded that the performance of the non-aged mixtures depends on the asphalt content, where the lower the asphalt content with respect to the optimum, the mixture suffers less rutting, but is more susceptible to damage due to humidity, whereas if the increases the asphalt content with respect to the optimum, the mixture suffers more rutting, but is less susceptible to damage due to moisture. This behavior is also observed in aged mixtures, where the higher the asphalt content with respect to the optimum, there is a greater plastic deformation and the mixture is less susceptible to damage due to humidity.

At the moment to analyze the results from the point of view in which the optimum content of asphalt is maintained (5,1% CA-24) and additive adhesion improver is added (5,1% CA-24 + AMA) and workability improvement additive (5,1% CA-24 + AMT). It is concluded that, in aged and non-aged mixtures, by achieving greater adherence between the CA and the aggregate, the mixture undergoes less rutting and this is less susceptible to damage due to humidity.

GLOSARIO

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials.
CA	: Cemento Asfáltico.
HWT	: Hamburg Wheel-Track Testing.
UNE	: Una Norma Española.
TSR	: Tensile Strength Ratio.
CDI	: Centro de Desarrollo e Investigación.
AMA	: Aditivo Mejorador de Adherencia.
AMT	: Aditivo Mejorador de Trabajabilidad.
MAC	: Mezcla Asfáltica en Caliente.
HMA	: Hot Mix Asphalt.
SUPERPAVE	: Superior Perfoming Asphalt Pavements.
SHRP	: Strategic Highway Research Program.
Gb	: Gravedad específica del asfalto.
Gsb	: Gravedad específica neta total del agregado.
Gmb	: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.
Gsa	: Gravedad específica aparente.
Gse	: Gravedad específica efectiva.
Gmm	: Gravedad específica máxima de la mezcla.
Pba	: Contenido de asfalto absorbido por el agregado (%).
Pbe	: Contenido de asfalto efectivo (%).
Pb	: Porcentaje de asfalto.
Ps	: Porcentaje de agregado.
Va	: Vacíos de aire (%).
VAM	: Vacíos en el agregado mineral (%).
VFA	: Vacíos llenos con asfalto (%).
LEMCO	: Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras.
WTS	: Pendiente de deformación promedio.
RD	: Deformación promedio.
SIP	: Punto de inflexión Stripping.

“EFECTO DEL PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO EN PRUEBAS DE DESEMPEÑO RUEDA DE HAMBURGO (HWT), TRACCION INDIRECTA (TSR) Y ADHERENCIA PASIVA”

INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 13

1.1. ANTECEDENTES GENERALES 13

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO 14

1.2.1. Objetivos generales 14

1.2.2. Objetivos específicos 14

1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO 15

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO 16

1.4.1. Marco teórico conceptual 16

1.4.2. Desarrollo experimental 16

1.4.3. Análisis de resultados 16

1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA 17

2. MARCO TEÓRICO 18

2.1. MARCO CONCEPTUAL 18

2.1.1. Cemento asfáltico o ligante 18

2.1.2. Agregados pétreos o áridos [13] 21

2.1.3. Mezclas asfálticas 25

2.1.4. Deformación plástica en pavimentos 35

2.1.5. Adherencia entre cemento asfáltico – agregado 38

2.1.6. Humedad en pavimentos 42

2.2. ESTADO DEL ARTE 47

2.2.1. Deformación plástica o ahuellamiento 47

2.2.2. Adherencia entre el par cemento asfáltico-agregado y susceptibilidad al daño por humedad 53

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL 57

3.1. MEZCLAS ASFÁLTICAS Y SUS COMPONENTES 59

3.1.1. Agregados pétreos o áridos 59

3.1.2. Cemento asfáltico o ligante 60

3.1.3. Diseño de la mezcla asfáltica 61

3.2. CONFECCIÓN DE PROBETAS 63

3.2.1. Secado del árido 63

3.2.2. Tamizado o corte del áridos 63

3.2.3. Preparación de bandejas 63

3.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS 63

3.3.1. Ensayo Rueda de Hamburgo 63

3.3.2. Procedimiento para el ensayo de Tracción Indirecta (TSR) 69

3.3.3. Procedimiento para el ensayo Adherencia Pasiva 72

4. RESULTADOS Y ANALISIS 73

4.1. ENSAYO DE DEFORMACIÓN EN RUEDA DE CARGA HAMBURGO (HWT) 73
4.1.1. Resultados ensayo HWT según norma UNE 12697-22 73
4.1.2. Análisis de resultados ensayo HWT, según norma UNE 12697-22 83
4.1.3. Resultados ensayo HWT según norma AASHTO T324-14 85
4.1.4. Análisis de resultados ensayo HWT, según norma AASHTO T 324-14 95

4.2. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA 98
4.2.1. Resultados ensayo TSR 98
4.2.2. Análisis de resultados 99

4.3. ENSAYO DE ADHERENCIA PASIVA SEGÚN NORMA XP T66-043 101
4.3.1. Resultados ensayo de Adherencia Pasiva 101
4.3.2. Análisis de resultados 101

4.4. CORRELACIÓN ENTRE ENSAYOS ($R2$) Y ANÁLISIS 103
4.4.1. Correlación entre ensayos TSR vs HWT 104
4.4.2. Correlación entre ensayos TSR vs Adherencia Pasiva 106
4.4.3. Correlación entre ensayos HWT vs Adherencia Pasiva 107

5. CONCLUSIONES 109

6. REFERENCIAS 112

7. ANEXOS 116

7.1. RESULTADOS DE ENSAYOS FÍSICO QUÍMICO DE LIGANTES CON ADITIVOS 116

7.2. ANTECEDENTES DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA MEZCLA DISEÑADA 117

7.3. CONFECCION DE PROBETAS SEGÚN TIPO DE COMPACTACIÓN 119
7.3.1. Confección de probetas tipo COMPACTADOR GIRATORIO (PCG). 119
7.3.2. Confección de probetas tipo MARTILLO MARSHALL. 120

7.4. EJEMPLO DE INFORME ENTRAGADO POR LA MÁQUINA PARA ENSAYO HWT 121
7.4.1. Profundidad de la huella v/s Nº de pasadas entregado por la máquina 122
7.4.2. Curva de Temperatura entregado por la máquina 122
7.4.3. Perfil longitudinal de la Probeta 1 123
7.4.4. Perfil longitudinal de la Probeta 2 123

7.5. PROPIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DE PROBETAS UTILIZADAS EN ENSAYO TSR 124

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Representación esquemática de una Refinería de Crudo de Petróleo [6]. 19
Figura 2-2. Comportamiento visco-elástico del cemento asfáltico [11]. 20
Figura 2-3. Forma de las Partículas de Agregado Pétreo [13] 23
Figura 2-4. Ilustración de los parámetros de diseño volumétrico [18]. 29
Figura 2-5. Representación de los volúmenes en una mezcla asfáltica compactada. Fuente: Elaboración propia. 34
Figura 2-6. Proceso de deformaciones permanentes [22]. 35
Figura 2-7. Fuerzas de adhesión y cohesión entre cemento asfáltico y áridos [24}. 38
Figura 2-8. Tipos de fallos en la unión CA-Agregado [24}. 39
Figura 2-9. Ángulo de contacto entre el cemento asfáltico y el agregado [24}. 40
Figura 2-10. Despegue de película de cemento asfáltico de la superficie del árido [24]. 42
Figura 2-11. Fuentes de humedad en una estructura de Pavimentos Flexibles [35]. 45
Figura 2-12. Simulador de tráfico LCPC [22]. 49
Figura 2-13. Ensayo de simulación de tráfico a escala real desarrollado por la Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil [22]. 50
Figura 2-14. Preparación de la cinta de caucho presurizada y probetas en ensayo APA. 51
Figura 2-15. Máquina para ensayo de Rueda de Hamburgo. 52
Figura 3-1. Diagrama de ensayos. Fuente: Elaboración propia. 57

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1. Gravedad específica neta. 27
Ecuación 2-2. Gravedad específica efectiva. 28
Ecuación 2-3. Gravedad específica máxima de la mezcla. 29
Ecuación 2-4. Contenido de asfalto absorbido. 30
Ecuación 2-5. Contenido de asfalto efectivo. 31
Ecuación 2-6. Porcentaje de vacíos de aire. 31
Ecuación 2-7. Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral. 32
Ecuación 2-8. Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral. 32
Ecuación 2-9. Porcentaje de vacíos llenados de asfalto con respecto al VAM. 33
Ecuación 2-10. Porcentaje de vacíos llenados de asfalto con respecto a la mezcla compactada. 33
Ecuación 3-1. Pendiente de deformación para ensayo de rodadera en **aire** y/o **agua** 65
Ecuación 3-2. Fórmula para determinar el punto de inflexión stripping (SIP) 67
Ecuación 3-3. Ecuación de la recta. 68
Ecuación 3-4. Volumen de agua absorbido por la muestra. 70
Ecuación 3-5. Grado de saturación de las probetas. 70
Ecuación 3-6. Resistencia media a la tracción indirecta. 70
Ecuación 3-7. Resistencia a la tracción indirecta (TSR) 71
Ecuación 4-1. Relación entre la Deformación en (mm) y el Nº de pasadas en ensayo Rueda de Hamburgo. 103

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1. Representación gráfica de resultados en pruebas típicas de deformación permanente [23]. 36

Gráfico 3-1. Banda granulométrica de áridos usados para la confección de probetas. 62

Gráfico 3-2. Curva característica de ensayo de Rueda de Hamburgo. 67

Gráfico 4-1. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas **en agua**, norma UNE 12697-22. 74

Gráfico 4-2. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas en **seco**, norma UNE 12697-22 74

Gráfico 4-3. Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT en seco y en agua para probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, según norma UNE 12697-22. 75

Gráfico 4-4. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas en **seco**, norma UNE 12697-22 79

Gráfico 4-5. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas **en agua**, norma UNE 12697-22. 79

Gráfico 4-6. Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT en seco y en agua para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma UNE 12697-22. 80

Gráfico 4-7. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos d**e pasadas** para probetas ensayadas en **seco**, norma A**ASHTO T324-14.** 86

Gráfico 4-8. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos d**e pasadas** para probetas ensayadas en **agua**, norma A**ASHTO T324-14**. 86

Gráfico 4-9. Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT, en seco y en agua para probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, según norma AASHTO T324-14. 87

Gráfico 4-10. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas en **seco**, norma AASHTO T324-14 91

Gráfico 4-11. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas **en agua**, norma AASHTO T324-14. 91

Gráfico 4-12. Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT, en seco y en agua para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma AASHTO T324-14. 92

Gráfico 4-13 (a). Gráfico Valor de TSR v/s **Distintos contenidos de ligante**, según norma AASHTO T 283-14. 98

Gráfico 7-1. Profundidad de la huella vs Nº de pasadas ensayo Rueda de Hamburgo. 122

Gráfico 7-2. Curva de Temperatura en ensayo Rueda de Hamburgo. 122

Gráfico 7-3. Perfil longitudinal de Probeta 1 en ensayo Rueda de Hamburgo. 123

Gráfico 7-4. Perfil longitudinal de Probeta 2 en ensayo Rueda de Hamburgo. 123

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Clasificación de las MAC de acuerdo a su granulometría [15]. 26

Tabla 2-2. Resumen de los factores que afectan en la deformación plástica permanente o ahuellamiento de las mezclas asfálticas [23]. 37

Tabla 2-3. Factores que influyen en el rendimiento de la mezcla de asfalto al evaluar el daño por humedad [33]. 43

Tabla 3-1. Granulometría de los materiales pétreos. 59

Tabla 3-2. Características físicas e hídricas del árido proveniente del Pozo de Confluencia, Bitumix Sur. 60

Tabla 3-3. Ensayo físico químico del ligante CA-24. 60

Tabla 3-4. Granulometría de la mezcla de áridos utilizados en confección probetas. 61

Tabla 3-5. Comparación entre normas para ensayo Rueda de Hamburgo. 64

Tabla 4-1. Verificación de cumplimiento de requisitos para probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma UNE 12697-22. 74

Tabla 4-2. Resultados obtenidos para WTS de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto. 74

Tabla 4-3. Resultados obtenidos para RD de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, UNE 12697-22. 75

Tabla 4-4. Ecuaciones de estados estacionarios en probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, según norma UNE 12697-22. 76

Tabla 4-5. Resultados obtenidos para SIP de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, ensayadas en agua. 76

Tabla 4-6. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, al finalizar el ensayo en **seco**. 76

Tabla 4-7. Pendiente de fluencia de mezclas elaboradas con diferente contenido de asfalto, norma UNE 12697-22. 77

Tabla 4-8. Pendientes de pérdida de adherencia de mezclas con diferente contenido de asfalto, UNE 12697-22 77

Tabla 4-9. Verificación de cumplimiento de requisitos para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma UNE 12697-22. 78

Tabla 4-10. Resultados obtenidos para WTS de probetas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos 78

Tabla 4-11. Resultados obtenidos para RD de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, norma UNE 12697-22. 79

Tabla 4-12. Ecuaciones de estados estacionarios en probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma UNE 12697-22 81

Tabla 4-13. Resultados obtenidos para SIP de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, ensayadas en agua. 81

Tabla 4-14. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos al finalizar el ensayo en seco. 81

Tabla 4-15. Pendiente de fluencia de mezclas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, norma UNE 12697-22. 82

Tabla 4-16. Pendientes de pérdida de adherencia de mezclas con contenido óptimo de asfalto, norma UNE 12697-22 82

Tabla 4-17. Verificación de cumplimiento de requisitos para probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T324-14. 85

Tabla 4-18. Resultados obtenidos para WTS de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto. 85

Tabla 4-19. Resultados obtenidos para RD de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T 324-14. 86

Tabla 4-20. Ecuaciones de estados estacionarios en probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, según norma AASHTO T324-14. 88

Tabla 4-21. Resultados obtenidos para SIP de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, ensayadas en agua. 88

Tabla 4-22. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, al finalizar el ensayo en **agua**. 88

Tabla 4-23. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, al finalizar el ensayo en **seco**. 89

Tabla 4-24. Pendiente de fluencia de mezclas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T 324 89

Tabla 4-25. Pendiente de pérdida de adherencia de mezclas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T 324-14. 89

Tabla 4-26. Verificación de cumplimiento de requisitos para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma AASHTO T324-14. 90

Tabla 4-27 Resultados obtenidos para WTS de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma AASHTO T324-14. 90

Tabla 4-28. Resultados obtenidos para RD de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma AASHTO T324-14. 91

Tabla 4-29. Ecuaciones de estados estacionarios en probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, elaboradas según norma AASHTO T324-14. 93

Tabla 4-30. Resultados obtenidos para SIP de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, ensayadas en agua. 93

Tabla 4-31. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, al finalizar el ensayo en agua. 93

Tabla 4-32. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, al finalizar el ensayo en seco. 94

Tabla 4-33. Pendiente de fluencia de mezclas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, norma AASHTO T 324-14. 94

Tabla 4-34. Pendiente de pérdida de adherencia de mezclas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, norma AASHTO T 324-14. . 94

Tabla 4-35. Análisis volumétrico de las mezclas evaluadas en ensayo TSR, en un ambiente seco y en agua. 99

Tabla 4-36. Resultados obtenidos en ensayo de Adherencia Pasiva, según norma XP T66-043. 101

Tabla 4-37. Registro fotográfico del ensayo de adherencia pasiva, según método francés. 102

Tabla 4-38. Resumen de resultados obtenidos en cada ensayo para cada tipo de ligante, aplicando la Ecuación 4-1. Para los resultados del ensayo Rueda de Hamburgo, según norma UNE y AASHTO. 104

Tabla 4-39. Correlación entre resultados obtenidos para ensayo HWT (UNE) v/s TSR. 104

Tabla 4-40. Correlación entre resultados obtenidos para ensayo HWT (AASHTO) v/s TSR. 105

Tabla 4-41. Correlación entre ensayos TSR v/s Adherencia Pasiva. 106

Tabla 4-42. Correlación entre resultados obtenidos para ensayos HWT (UNE) vs Adherencia Pasiva. 107

Tabla 4-43. Correlación entre resultados obtenidos para ensayos HWT (AASHTO) vs Adherencia Pasiva. 108

Tabla 7-1. Ensayo físico químico del ligante CA-24 + AMA. 116

Tabla 7-2. Ensayo físico químico del ligante CA-24 + AMT. 116

Tabla 7-3. Dosificación y granulometría del diseño de la mezcla de áridos. 117

Tabla 7-4. Características del diseño de la mezcla. 117

Tabla 7-5. Parámetros Marshall. 118

Tabla 7-6. Propiedades y resultados de probetas elaboradas con diferente contenido de asfalto para ensayo TSR. 124

Tabla 7-7. Propiedades y resultados de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, para ensayo TSR. 124

“EFECTO DEL PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO EN PRUEBAS DE DESEMPEÑO RUEDA DE HAMBURGO (HWT), TRACCION INDIRECTA (TSR) Y ADHERENCIA PASIVA”

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

En Chile, actualmente el 86% de los caminos interurbanos pavimentados son de asfalto [1]. Este material es ampliamente utilizado debido a su bajo costo y fácil trabajabilidad.

Hoy en día, es común encontrar pavimentos con muestras de deterioros producto de una mala ejecución, mal diseño y/o mala calidad de los materiales. Algunos desperfectos observados son: fallas por fatiga en capas asfálticas, acumulación de deformaciones permanentes (ahuellamiento), pérdida de cohesión entre el árido y el cemento asfáltico (Stripping), entre otros. Debido a estos deterioros, se hace indispensable desarrollar investigaciones para evaluar el comportamiento y desempeño de las mezclas asfálticas en caliente, de esta manera lograr aumentar la vida útil del camino a bajos costos.

La normativa vigente en Chile para vialidad (Manual de Carreteras), utiliza la metodología Marshall para el diseño de pavimentos. Esta metodología, no evalúa el desempeño de la mezcla cuando es expuesta a humedad, tampoco evalúa el desempeño de la mezcla envejecida, por lo que en esta investigación, se realizan pruebas de desempeño para estudiar el comportamiento de la mezcla, evaluando la susceptibilidad al daño por humedad y la deformación plástica, utilizando normativa de la metodología SUPERPAVE, aplicable en la elaboración de mezcla asfáltica en caliente, para ensayo HWT (AASHTO T324-14 [2]) y TSR (AASHTO T283-14 [3]). Además, se utiliza metodología UNE para realizar ensayo HWT (UNE 12697-22 [4]) y se realiza ensayo de Adherencia Pasiva según norma francesa (XP T66-43 [5]).

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

En este estudio se aborda un objetivo general, del cual se desglosan dos objetivos específicos, los cuales son las bases para el desarrollo de la investigación:

1.2.1. Objetivos generales

- Evaluar el efecto del porcentaje de cemento asfáltico utilizando pruebas de desempeño Rueda de Hamburgo (HWT), Tracción Indirecta (TSR) y Adherencia pasiva.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la susceptibilidad al daño por humedad, la deformación plástica y la adherencia entre el cemento asfáltico y el árido, en cinco mezclas asfálticas en caliente diferentes.
- Realizar conclusiones generales sobre el desempeño de las mezclas, considerando los resultados de los tres ensayos.

1.3. ALCANCES DEL ESTUDIO

En el presente estudio se dan a conocer los resultados y análisis de los ensayos de Rueda de Hamburgo, Tracción Indirecta y Adherencia Pasiva a los que son sometidos cinco mezclas asfálticas en caliente. Las mezclas son elaboradas con cemento asfáltico CA-24 en distintos porcentajes de dosificación (4,7%, 5,1% y 5,5% de CA-24), además, para el contenido óptimo de asfalto de 5,1% CA-24 se agregan aditivo mejorador de adherencia (5,1% CA-24 + AMA) y aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% CA-24 + AMT). La mezcla obedece a una granulometría IV-A-12, cuyo diseño lo provee el Centro de Desarrollo e Investigación (CDI).

Las probetas se ensayan basándose en los procedimientos descritos en las siguientes normas:

- Rueda de Hamburgo (HWT) según norma UNE 12697-22
- Rueda de Hamburgo (HWT) según norma AASHTO T324-14
- Tracción Indirecta (TSR) según norma AASHTO T283-14
- Adherencia Pasiva según norma XP T66 - 043

Para ensayos de Rueda de Hamburgo se utiliza la máquina de ensayo Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD) del Laboratorio CDI. Mientras que para el ensayo de Tracción Indirecta se utiliza el equipo Master Loader HM – 3000, de la marca Humboldt.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo obedece a una metodología con enfoque teórico – práctico (experimental) y está compuesto por tres etapas: marco teórico conceptual, desarrollo experimental y análisis de resultados.

1.4.1. Marco teórico conceptual

Revisión bibliográfica de la susceptibilidad al daño por humedad y deformación plástica en mezclas asfálticas en caliente, con el objetivo de conocer el “estado del arte” del tema a nivel nacional e internacional.

1.4.2. Desarrollo experimental

Secuencia de trabajo y desarrollo, según ensayo y norma usada:

- Ensayo HWT según norma UNE 12697-22
    - Definir mezclas para la fabricación de muestras.
    - Compactación de muestras usando Compactador Giratorio SUPERPAVE.
    - Clasificación de las muestras según contenido de vacíos.
    - Realización de ensayo de Rueda de Hamburgo.
- Ensayo HWT según norma AASHTO T324-14
    - Definir mezclas para la fabricación de muestras.
    - Acondicionamiento de muestras.
    - Compactación de muestras usando Compactador Giratorio SUPERPAVE.
    - Clasificación de las muestras según contenido de vacíos.
    - Realización de ensayo de Rueda de Hamburgo.
- Ensayo TSR según norma AASHTO T283-14
    - Definir mezclas para la fabricación de muestras.
    - Acondicionamiento de muestras.
    - Compactación de muestras usando Martillo Marshall.
    - Clasificación de las muestras según contenido de vacíos.
    - Acondicionamiento de muestras.
    - Realización de ensayo de Tracción Indirecta.
- Ensayo de Adherencia Pasiva según norma XP T66-043
    - Realizar clasificación visual entre la afinidad del cemento asfaltico con el árido.

1.4.3. Análisis de resultados

- Análisis general e interpretación de resultados para cada ensayo. Tracción indirecta (TSR), Rueda de Hamburgo (Deformación y cantidad de pasadas) y Adherencia Pasiva (Adherencia entre ligante y árido).
- Determinar correlación entre ensayos.
- Conclusiones generales.

1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La presente investigación está compuesta por una sucesión de capítulos, en los que se da a conocer el estado del arte de la investigación, tanto a nivel nacional, como internacional. De esta manera contextualizar la investigación y evaluar un posible aporte al desarrollo de otras investigaciones.

A continuación, se describe cada uno de los capítulos que componen la memoria de título:

- **Capítulo 1**. Se explican los antecedentes generales, objetivos, alcances y metodología de trabajo de la memoria.
- **Capítulo 2**. Se desarrolla el marco conceptual, donde se describe ligante, agregados y mezclas asfálticas. También, se investiga sobre las propiedades y comportamiento físico de las mezclas, específicamente la adherencia entre los materiales (par ligante-agregado), la deformación plástica y la humedad en pavimentos. Posteriormente se investiga sobre el estado del arte de los ensayos para evaluar las propiedades de la mezcla.
- **Capítulo 3**. Se describe la metodología de trabajo en laboratorio y los materiales utilizados para llevar a cabo la investigación, adjuntando tablas que describen las propiedades físicas e hídricas y se presenta el diseño de la mezcla en estudio. También, se describe el procedimiento de cada uno de los ensayos realizados.
- **Capítulo 4**. Se muestran los resultados obtenidos y se realiza un análisis específico en cada uno de los ensayos. Posteriormente se correlacionan los resultados entre ensayos, utilizando indicadores estadísticos como el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación entre variables (R^2).
- **Capítulo 5**. Se presentan las conclusiones generales de la investigación.
- **Referencias.**
- **Anexos.**

2. MARCO TEÓRICO

Para desarrollar y entender a cabalidad la investigación presentada en esta memoria de título, se vuelve indispensable recurrir a diversas fuentes de información, trabajos e investigaciones desarrolladas con anterioridad. Por lo que, en primera instancia se realiza el marco conceptual de la memoria de título, en el cual se describen los conceptos básicos necesarios para el desarrollo de la memoria. En segunda instancia se investiga sobre el "estado del arte" de las pruebas a las que son sometidas las mezclas asfálticas para evaluar su desempeño.

2.1. MARCO CONCEPTUAL

Partiendo de la base que las mezclas asfálticas corresponden a una combinación de agregados pétreos (áridos) de diferentes granulometrías y cemento asfáltico (CA), es que se definen los siguientes conceptos: cemento asfáltico, agregado pétreo, mezcla asfáltica, sus propiedades volumétricas, contenido de asfalto en la mezcla. También se describe la humedad en pavimentos, deformación plástica (ahuellamiento) en pavimentos asfálticos y la adherencia entre el ligante y el agregado.

2.1.1. Cemento asfáltico o ligante asfáltico

Los materiales bituminosos se utilizan ampliamente en todo el mundo en la construcción de carreteras, son hidrocarburos (combinaciones de hidrógeno y carbono) que se encuentran en depósitos naturales o se obtienen como un producto de la destilación del petróleo crudo. Los materiales bituminosos que se usan en la construcción de carreteras son los asfaltos, cuya consistencia va de líquido a sólido, por esto, se dividen en líquidos, semisólidos y sólidos.

El asfalto es un material bituminoso, sólido o semisólido con propiedades aglutinantes y que se licua gradualmente al calentarse, se obtiene de la destilación del petróleo y se endurece al enfriarse. Es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo [6].

Los objetivos básicos del asfalto son impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación [7]. También proporciona una íntima unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos.

Se utiliza un proceso de refinación para obtener los asfaltos del petróleo [6]. Estos procesos pueden ser:

- Destilación fraccionada: Se retiran los diferentes materiales volátiles en el petróleo crudo, a temperaturas sucesivamente más elevadas hasta que se obtiene como residuo el asfalto del petróleo.
- Destilación seca o destructiva: Se requieren cantidades mayores de las fracciones ligeras de materiales tales como combustibles para motor. Se aplica con calor intenso y presiones elevadas para producir cambios químicos. El material asfáltico obtenido no se usa mucho en pavimentación porque es más susceptible a los cambios climáticos.

Los materiales asfálticos que se obtienen de la destilación del petróleo se encuentran en la forma de diferentes tipos de asfaltos [6]. Los cuales son:

- Cementos asfálticos.
- Asfaltos líquidos de curado lento.
- Asfaltos líquidos de curado rápido.
- Las emulsiones asfálticas.

Los Cementos Asfálticos (CA) son betunes que constituyen la materia prima de una construcción vial. Es un material aglomerante sólido o semisólido a temperatura ambiente, de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados, que se obtienen de la refinación del petróleo. Se clasifican por su consistencia de acuerdo con el grado de penetración o por su viscosidad.

En general, los CA son preparados a partir del pitch asfáltico que es el producto obtenido desde el fondo de la torre de destilación, posterior a la extracción de los componentes livianos [6], para su uso en la construcción de pavimentos asfálticos. En Chile los CA más empleados corresponden a los tipos CA-14 y CA-24 [8], donde la viscosidad absoluta original a 60 °C y 300 mm Hg de vacío, debe ser mayor o igual a 1400 poises y menor a 2400 poises para el CA 14 y debe ser mayor o igual a 2400 poises para el CA-24.

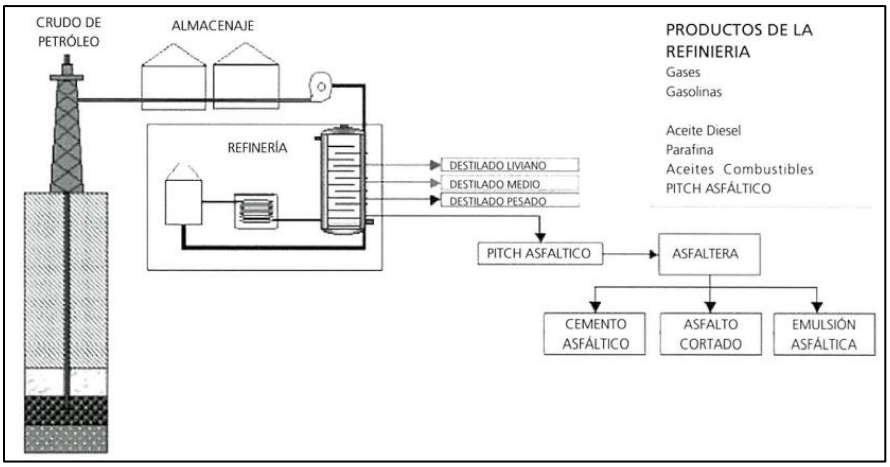


Figura 2-1. Representación esquemática de una Refinería de Crudo de Petróleo [6].

El CA ha sido utilizado con éxito en la pavimentación de vías debido, principalmente, a que es un material altamente cementante, termoplástico (disminuye su viscosidad al aumentar la temperatura), repelente al agua y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales [9]. Posee alta elasticidad a altas temperaturas, suficiente ductilidad a bajas temperaturas, baja susceptibilidad al cambio de temperatura, buena adhesión y cohesión y bajo contenido de parafina [10] (alta resistencia al envejecimiento), por lo que:

- Es un material aglomerante, es decir, proporciona una buena unión y cohesión entre agregados, incrementando por ello la resistencia con la adición de espesores relativamente pequeños. También, proporciona textura a las capas.

- Resiste la acción mecánica de disgregación producida por las cargas aplicadas, gracias a la flexibilidad dada a la estructura, permitiendo un acomodo del material sin fisurarse, ante eventuales consolidaciones de las capas subyacentes.
- Impermeabiliza la estructura del pavimento, evitando la penetración del agua, tanto de precipitaciones como del subsuelo por acción capilar.

El CA puede ser llevado temporalmente a condición fluida (líquido) durante la operación de construcción de tres maneras [11]:

i. Derritiéndolo: después de las operaciones de construcción, e CA líquido y caliente se enfría y retorna de su condición fluida, a su condición normal semisólida.
ii. Diluyéndolo en solventes de petróleo seleccionados: este proceso se llama recomposición (cutting back). El asfalto obtenido se denomina asfalto diluido (cuttback asphalt). Después de la reconstrucción, el solvente se evapora dejando en el lugar el CA. El uso del asfalto diluido ha declinado debido a la escasez de petróleo y las regulaciones gubernamentales del ambiente.
iii. Emulsificándolo con agua: como el asfalto y el agua ordinariamente no se mezclan, puede hacerse que lleguen a esta condición mediante la agitación del asfalto con el agua en un molino coloidal y la adición de una pequeña cantidad de agente emulsificante o emulsivo. El producto resultante, denominado emulsión asfáltica, es fluido y está listo para las operaciones de construcción.

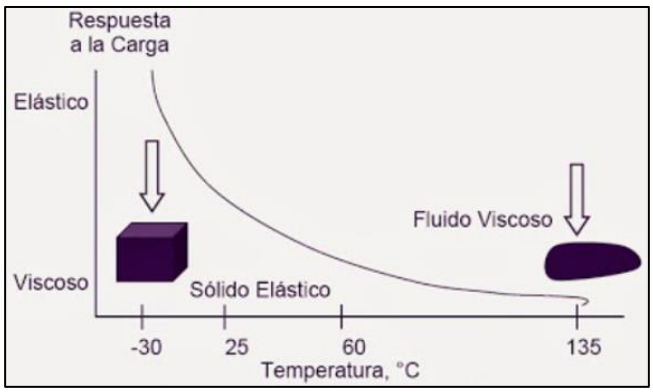


Figura 2-2. Comportamiento visco-elástico del cemento asfáltico [11].

Cabe destacar que el asfalto reacciona por oxidación, perdiendo cohesividad, fenómeno denominado envejecimiento. También, la oxidación produce en el asfalto un aumento de su rigidez y pérdida de adhesividad [8].

Actualmente en la industria existen materiales como los aditivos y modificadores para asfalto, debido a que algunos pavimentos requieren especificaciones particulares que no pueden ser satisfechas por las mezclas asfálticas tradicionales. Por lo que es necesario utilizar nuevos métodos y aditivos que modifiquen el CA para que cumpla de mejor forma el rango de condiciones al que el pavimento pueda ser sometido.

Los CA en que se incorpora aditivos se pueden subdividir en dos grupos. Aditivos que cambian la viscosidad del ligante a las temperaturas de trabajo, es decir son fluidificantes del asfalto y aditivos que no modifican la viscosidad. Entre los aditivos que fluidifican al asfalto se

encuentran las ceras tipo Fischer-Tropsch, otras ceras sintéticas y las ceras de polietileno. Los que no modifican necesariamente la viscosidad son en general tensoactivos que actúan como superplastificante en la mezcla sin modificar significativamente las propiedades físico-reológicas del ligante. El surfactante o tensoactivo al reducir la tensión superficial del asfalto produce una reducción de la fuerza que se opone al mojado de los agregados, además de actuar como agentes lubricantes entre el asfalto y el árido y mejorar las propiedades asociadas a la adherencia y la cohesión [12].

En la presente investigación, se utilizan aditivos que no modifican la viscosidad del ligante, es decir, aditivos tensoactivos. Estos son los aditivos mejoradores de adherencia (AMA) y aditivos mejoradores de trabajabilidad (AMT).

El AMA es un aditivo que mejora la afinidad química entre el CA y el agregado, así como el desempeño de la mezcla asfáltica, aumentando su resistencia a la acción del agua.

El AMT es un aditivo que permite la producción y compactación de las mezclas asfálticas a temperaturas mucho más bajas, de 25 °C a 40 °C menos que la temperatura especificada por el proveedor de CA. Evitando de esta manera la oxidación y envejecimiento del CA, incrementando la vida útil del pavimento.

2.1.2. Agregados pétreos o áridos [13]

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los pavimentos de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cemento, cales, etc.) o con ligantes asfálticos [14].

El agregado pétreo es un material que se extrae, tritura, se tamiza y se lava. La importancia de los áridos en una mezcla asfáltica, son sus características y proporción en la combinación de estos, ya que provee de resistencia estructural a la mezcla.

2.1.2.1. *Propiedades de los agregados pétreos*

Las propiedades de los agregados se pueden conceptuar bajo dos puntos de vista: uno como elementos aislados, o individuales, y otro como conjunto.

- Propiedades individuales: Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, módulo elástico, conductividad térmica, dilatación, etc. Asimismo, presentan unas propiedades químicas macroscópicas: solubilidad, alterabilidad, hinchamiento, etc.
- Propiedades de conjunto: Las propiedades de conjunto de los agregados pétreos son sus características como un todo. La distribución de la redondez o desgaste de los agregados es una propiedad de gran interés, por cuanto va a influir sobre el rozamiento entre los elementos del agregado.

2.1.2.2. *Consideraciones acerca del empleo de los agregados pétreos*

Cuando se pretende hacer uso de los agregados pétreos para la construcción de pavimentos, se deben considerar algunos aspectos fundamentales para su buen desempeño a la hora de formar parte en alguna de las capas del firme y principalmente en la elaboración de las mezclas asfálticas.

- Naturaleza e identificación: Evaluación de la naturaleza petrográfica de los agregados, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas.
- Propiedades geométricas: Principal y básicamente la forma y angulosidad de las partículas; con relación al conjunto del esqueleto mineral se estudia la distribución granulométrica.
- Propiedades mecánicas: Engloban los parámetros básicos de resistencia al desgaste y al pulimiento.
- Ausencia de impurezas: Es fundamental que los agregados a emplear en la construcción de pavimentos estén libres de impurezas capaces de afectar el buen comportamiento de las capas. El empleo de agregados sucios en la construcción de un pavimento, puede ser una causa suficiente para provocar su degradación.
- Inalterabilidad: Es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que puedan sufrir los agregados pétreos que se van a utilizar en una obra; así, los materiales evolutivos han de ser empleados con especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar la vida útil de las capas.
- Adhesividad: Los agregados pétreos han de ser afines con los ligantes asfálticos que vayan a ser empleados en la construcción del pavimento, y en caso de problemas de afinidad, será necesario el uso de aditivos, para garantizar el buen comportamiento de las mezclas asfálticas.

2.1.2.3. *Descripción de las características principales de los agregados pétreos para pavimentos*

Las principales características que se deben tener en cuenta en los agregados para la construcción de pavimentos asfálticos son las siguientes:

- Forma y angulosidad

La forma de las partículas del agregado grueso afecta fundamentalmente, al esqueleto mineral. Según su forma, las partículas pueden clasificarse en redondeadas, irregulares, angulares, lajosas, alargadas – lajosas.

Las lajosas y alargadas-lajosas (agujas), pueden romperse con facilidad durante la compactación o después bajo la acción del tráfico, modificando con ello la granulometría del agregado inicial. Se deben imponer limitaciones en el contenido de partículas de mala forma. Aparte de la forma de las partículas del agregado grueso, se debe tener en cuenta su angulosidad, que influye junto a la textura superficial de las partículas, en la resistencia del esqueleto mineral, por su contribución al rozamiento interno.

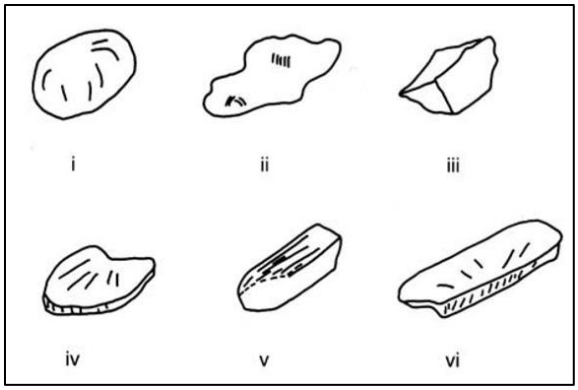


Figura 2-3. Forma de las Partículas de Agregado Pétreo. i. Redondeada, ii. Irregular, iii. Angular, iv. Lajosa, v. Alargada, vi. Alargada-Lajosa [13].

Los agregados pétreos generalmente más deseados para la elaboración de mezclas asfálticas son aquellos con una alta proporción de partículas aproximadamente equidimensionales (cuboides). Los factores intrínsecos, como la composición de la roca afectan a la forma de los agregados durante los procesos de trituración.

- Resistencia al desgaste

La resistencia mecánica del esqueleto mineral es un factor predominante en la evolución del comportamiento del pavimento después de su puesta en servicio. La evaluación de dicha resistencia se realiza mediante diversos ensayos de laboratorio; sin embargo, ninguno de ellos caracteriza el estado tensional del agregado en el conjunto del pavimento. Se realizan una serie de ensayos que tienden a reproducir en laboratorio de manera más sencilla el comportamiento que luego tendrán los agregados en servicio, para ello se preparan las muestras con una granulometría próximas a las que van a ser puestas en obra, sometiéndolas a un desgaste que, de forma indirecta, proporciona información de la resistencia mecánica del material. El Desgaste de Los Ángeles es un ejemplo de este tipo de ensayos.

- Adhesividad y resistencia al desplazamiento

La adhesividad de los agregados pétreos con los ligantes asfálticos es de gran importancia, debido a que se pueden presentar fenómenos fisicoquímicos en la superficie de los agregados empleados en los pavimentos. En estos fenómenos complejos intervienen tanto factores físicos como la textura del agregado, la porosidad de este, viscosidad y tensión superficial del ligante, espesor de la película de ligante, etc. Y a su vez factores químicos relativos al ligante y al agregado. Si los agregados están absolutamente secos, se dejan mojar fácilmente por los ligantes asfálticos; sin embargo, la situación es muy diferente con algo de humedad que siempre puede existir, ya que la superficie del agregado se polariza con un signo u otro dependiendo de su naturaleza.

En los pavimentos asfálticos aparte de cuidar y verificar que el ligante asfáltico moje al agregado se debe tener en cuenta la posibilidad de que el agua en combinación con la acción de los vehículos y en ocasiones con el polvo y suciedad existentes, perturbe la adhesividad, desplazando el ligante asfáltico de la superficie del agregado, que quedará de nuevo descubierta o lavada. La adhesividad pasiva o también llamada resistencia al desplazamiento del ligante dependerá también de los mismos factores químicos y físicos anteriormente citados: afinidad

polar por el ligante, espesor de la película y viscosidad de este, tensión superficial (ángulo de contacto) y textura superficial.

- Plasticidad y limpieza

Para que un agregado pétreo se comporte adecuadamente dentro de cualquier capa del pavimento, debe estar completamente limpio, libre de partículas de naturaleza orgánica, polvo o arcillas. Se establece en las normativas, que todos los finos deben tener reducida su plasticidad e incluso que no sean plásticos n la mayoría de los casos. Las fracciones gruesas deben estar exentas de polvo, fijando los límites admisibles a través del denominado coeficiente de limpieza.

Se debe garantizar que la presencia de agua, la capa en cuestión conserve sus características resistentes y que, en su caso, no haya problemas de adhesividad con los ligantes asfálticos. En ocasiones, aunque el agregado fino no sea plástico, puede estar contaminado por partículas no arcillosas, que no se hayan podido detectar mediante los límites de Atterberg, pero igualmente nocivas. Un ensayo muy utilizado para caracterizar desde este punto de vista el agregado fino (realmente todo el material inferior a 5 mm, es decir, se incluye parte del agregado grueso y el polvo mineral) es el denominado Equivalente de Arena.

- Alterabilidad

Los fallos detectados en un pavimento al poco tiempo después de su puesta en servicio comúnmente suelen ser ocasionados por procesos de alteración de los agregados en alguna de sus capas, los cuales pueden desencadenarse debido a alguna reacción química con alguno de los componentes de los ligantes asfálticos o conglomerantes, por la acción de la helada o, simplemente, por la siempre inevitable presencia de agua.

Existe la necesidad de evaluación de la alterabilidad de un agregado pétreo por el procedimiento que sea, y se pueden señalar a título indicativo, los siguientes caminos: análisis petrográficos, acción de soluciones salinas o de agua oxigenada, ciclos hielo– deshielo, inmersión en agua y ciclos de humedad–sequedad.

- Resistencia al desprendimiento

Los defectos de adhesión significan la quiebra de las fuerzas de unión entre el agregado y su cubierta de conglomerante asfáltico, lo que conduce a una separación física, una posible consecuencia de los defectos de adhesión, es el fallo mecánico por desgaste y desflecado de la superficie, pero el fallo mecánico no se produce inmediatamente después del fallo de adhesión, si el desprendimiento, aunque sea permanente, se produce a un nivel inferior de la construcción y el grado de entrecruzamiento físico de las partículas de agregado es suficiente para resistir el esfuerzo del tráfico. Dado que el desprendimiento es un fenómeno asociado a la presencia de agua. Se deduce que los pavimentos densos, de bajo contenido en huecos, son prácticamente inmunes y que el comportamiento de los agregados pétreos en los ensayos de deslizamiento es bastante irrelevante en dicho uso.

- Aptitud para contribuir a la resistencia y rigidez de la mezcla en conjunto

Esta propiedad se refiere tanto a los agregados gruesos, finos y polvo mineral; siempre que se cumpla que la resistencia y durabilidad intrínseca de las partículas del agregado es la adecuada a las propiedades de la masa de agregados de entrecruzado y rozamiento interno. A este respecto tanto la angularidad como la irregularidad de la textura superficial contribuyen en gran medida a las resistencias mecánicas y a la deformación de la mezcla asfáltica.

2.1.2.4. *Clasificación del agregado pétreo de acuerdo con su tamaño*

En una mezcla asfáltica, los áridos deberán clasificarse y acopiarse separadamente en canchas habilitadas especialmente para este efecto, de manera que no se produzca contaminación ni segregación de los materiales. Los áridos se clasifican de acuerdo con las siguientes fracciones:

- Fracción Gruesa: Corresponde a la fracción retenida en el tamiz 2,5 mm (ASTM N° 8), la cual deberá estar constituida por partículas chancadas, tenaces, limpias, entendiéndose por limpias, partículas libres de materia orgánica, arcilla o materias extrañas.
- Fracción Fina: Corresponde a la fracción que pasa por el tamiz 2,5 mm (ASTM N° 8), la cual deberá estar constituida por agregados o provenientes de la trituración de rocas o gravas. Sus partículas deberán ser duras, tenaces y libres de arcilla o sustancias perjudiciales.
- Polvo Mineral (Filler): Si se requiere adicionar filler de aportación, éste deberá estar constituido por polvo mineral fino tal como cemento hidráulico, cal u otro material inerte de origen calizo, libre de materia orgánica y partículas de arcilla.

2.1.3. Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas son un material compuesto por cemento asfáltico y agregado pétreo, que se clasifican, de acuerdo con su granulometría, cantidad de huecos en la mezcla y su proceso constructivo [15].

2.1.3.1. *Clasificación de las mezclas asfálticas*

Las mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo con su granulometría, cantidad de huecos en la mezcla y según el proceso constructivo utilizado. Cada una de estas clasificaciones se describen a continuación:

- De acuerdo con su granulometría.

La granulometría indica la distribución de los diferentes tamaños de las partículas.

De la granulometría se desprenden los diferentes tipos de graduaciones, es decir, semidensas o densas (carpetas de rodado/ciclovías), semiabiertas (binder y bases) y abiertas (bases).

La clasificación por granulometría se basa en definir el tipo de graduación de acuerdo con la cantidad de partículas que pasan por el tamiz Nº 8. Como se especifica en la siguiente tabla:

Tabla 2-1. Clasificación de las MAC de acuerdo a su granulometría [15].

Tipo de graduación	% que pasa el Tamiz Nº 8
Abierta	5 – 20
Gruesa	20 – 35
Semi Densa	28 – 42
Densa	35 – 50
Fina	> 50

- De acuerdo con la cantidad de huecos en la mezcla.

Donde se considera una mezcla abierta si el contenido de huecos > 6%, mientras que se considera una mezcla semidensa o densa si el contenido de huecos ≤ 6%.

- De acuerdo con el proceso constructivo utilizado.

El proceso constructivo puede ser en caliente o en frío.

2.1.3.2. *Mezclas asfálticas en caliente [16]*

La mezcla asfáltica en caliente (MAC) o “Hot mix asphalt” (HMA), es llamada así debido a su proceso de fabricación, el cual implica calentar el agregado pétreo y el cemento asfáltico a altas temperaturas, para lograr la fluidez adecuada del CA en el proceso de mezclado (viscosidad).

Las MAC son un material producto de la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) y un CA, de manera que los agregados quedan recubiertos por una lámina delgada y continua de ligante. La MAC se puede elaborar con CA convencional o con CA mejorado con aditivos. Las cantidades relativas de CA y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla.

Existen diferentes métodos de diseño de las MAC, en Chile oficialmente se usa el Método Marshall, que se basa en la estabilidad y contenido de vacíos. Otro método es el Superpave, que se basa en el contenido de vacíos.

2.1.3.3. *Comportamiento volumétrico de las mezclas asfálticas*

Para evaluar el comportamiento y desempeño de una MAC preparada en laboratorio y cuando sea puesta en servicio, es necesario definir algunas características principales dentro de sus propiedades volumétricas que se determinan usando medidas de masa y/o volumen de la mezcla y/o sus componentes individuales, tanto del asfalto como del agregado.

En el análisis volumétrico de la MAC, se utiliza el término de Gravedad Específica, la cual define una relación entre la masa de una unidad de volumen de material y la masa del mismo volumen de agua a 23 °C [16].

En primera instancia se describen las gravedades del agregado y la gravedad específica máxima de la mezcla. Luego se definen el contenido de asfalto en la mezcla (absorbido y efectivo)

y las propiedades volumétricas de la mezcla en función de sus vacíos, es decir, vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA). Para finalizar con un diagrama que resume de forma gráfica todos los componentes del análisis volumétrico.

- *Gravedad específica del agregado* [16]

El agregado pétreo es poroso y puede absorber agua y asfalto a un grado variable. Además, el cociente de absorción entre el agua y el asfalto varía con cada agregado. Los tres métodos para medir la gravedad específica del agregado toman estas variaciones en consideración. Estos métodos son: la gravedad específica neta (Gsb), la aparente (Gsa) y la efectiva (Gse).

- *Gravedad específica neta (Gsb)* [16]

Es la proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica neta para el agregado total se calcula usando:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \cdots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \cdots + \frac{P_N}{G_N}}$$

Ecuación 2-1. Gravedad específica neta.

Donde:

G_{sb}: Gravedad específica neta para el agregado total.

$P_1,\ P_2,\ P_N$: Porcentajes individuales por masa de agregado.

$G_1,\ G_2,\ G_N$: Gravedad específica neta individual del agregado.

La gravedad específica neta del filler es difícil de determinar correctamente. De cualquier modo, si la gravedad específica aparente del filler es estimada, el error es usualmente insignificante.

- *Gravedad específica aparente (Gsa)* [16]

Es la proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al del agua destilada a una temperatura indicada.

- *Gravedad específica efectiva (Gse)* [16]

Es la proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al del agua destilada a una temperatura indicada.

Cuando se basa en la gravedad específica máxima de una mezcla de pavimento (Gmm), la gravedad específica efectiva del agregado (Gse), incluye todos los espacios de vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto. Gse se determina usando:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Ecuación 2-2. Gravedad específica efectiva.

Donde:

G_{se}: Gravedad específica efectiva del agregado.

G_{mm}: Gravedad específica máxima (AASHTO T209 [17]) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire).

P_{mm}: Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100.

P_b: Contenido de asfalto con el cual AASHTO T209 desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla.

G_b: Gravedad específica del asfalto.

El volumen de asfalto absorbido por los agregados es casi invariablemente menor que el volumen de agua absorbida. Por tanto, el valor para la gravedad específica efectiva de un agregado debe estar entre su gravedad específica neta y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva sale de estos límites, su valor se debe asumir como incorrecto. El cálculo de la gravedad específica máxima de la mezcla mediante AASHTO T209 [17]; la composición de la mezcla en términos del contenido de agregado; y el total de asfalto se deben entonces, volver a inspeccionar para encontrar la causa del error.

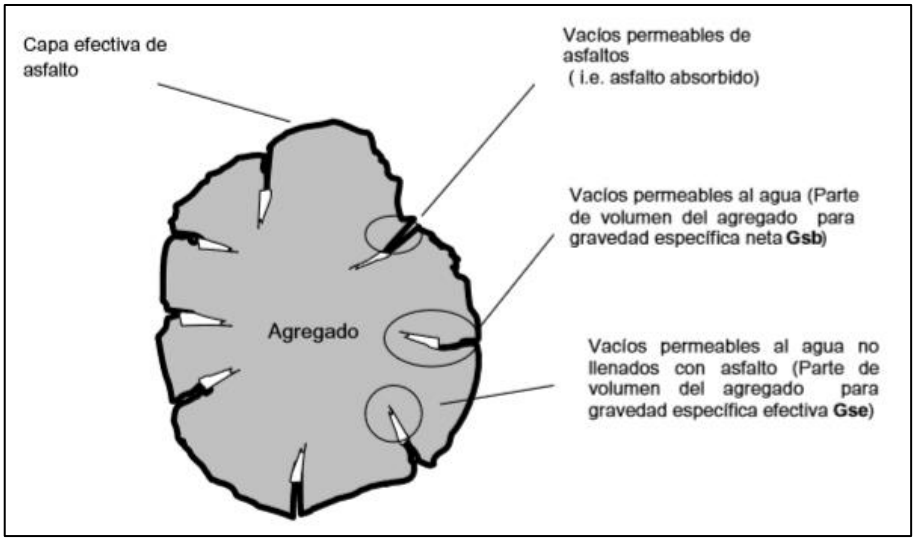


Figura 2-4. Ilustración de los parámetros de diseño volumétrico [18].

- *Gravedad específica máxima de la mezcla (Gmm) [16]*

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado, es necesario determinar la gravedad específica máxima (Gmm) de la mezcla, para cada contenido de asfalto y así calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada mezcla.

La gravedad específica máxima puede determinarse para casa contenido de asfalto mediante AASHTO T209 [17]. La precisión del ensayo es mejor cuando la mezcla está cerca del contenido óptimo de asfalto del diseño. Además, es preferible medir la gravedad específica máxima por duplicado o triplicado.

Después de calcular la gravedad específica efectiva del agregado para cada gravedad específica máxima medida y promediando los resultados del Gse; la gravedad específica máxima para cualquier otro contenido de asfalto queda definida por la Ecuación 2.3., la cual supone que la gravedad específica efectiva del agregado es constante, y ésta es válida puesto que la absorción del asfalto no varía apreciablemente con los cambios en el contenido de asfalto.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

Ecuación 2-3. Gravedad específica máxima de la mezcla.

Donde:

G_{mm}: Gravedad específica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire).

P_{mm}: Porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100.

P_s: Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla.

P_b: Contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla.

G_{se}: Gravedad específica efectiva del agregado.

G_b: Gravedad específica efectiva del asfalto.

2.1.3.4. *Contenido de asfalto en la mezcla* [16]

El contenido de asfalto en la mezcla es uno de los factores influyentes en el desempeño de ésta. El contenido óptimo de asfalto se determina según el método de diseño aplicado en cada mezcla, ya sea, utilizando método de diseño Marshall o Superpave.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende de las características del agregado, tales como la granulometría y su capacidad de absorción. Donde, mientras más fina sea la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial que cubrir por asfalto, por lo tanto, mayor será la cantidad de asfalto requerido para cubrir uniformemente todas las partículas de la mezcla. Por el contrario, en mezclas más gruesas, es menor el área superficial a cubrir con asfalto, por lo tanto, se requiere menor cantidad de asfalto para cubrir la superficie del agregado.

Con respecto a la capacidad de absorción del agregado, mientras más poroso sea el agregado, mayor es la cantidad de asfalto absorbido por éste, en consecuencia, mayor será la cantidad de asfalto requerido para que la superficie del agregado quede completamente cubierta.

En general, el contenido total de asfalto una mezcla asfáltica se compone de dos tipos de asfalto. Uno es el asfalto absorbido por el agregado (Pba) y el otro es el asfalto efectivo (Pbe) que es el contenido total del asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado, responsable del desempeño de una mezcla asfáltica.

- *Contenido de asfalto absorbido (Pba)* [16]

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla. Cuyo valor queda determinado como:

$$Pba = 100 * \frac{(G_{se} - G_{sb})}{G_{se} * G_{sb}} * G_b$$

Ecuación 2-4. Contenido de asfalto absorbido.

Donde:

Pba: Asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.

G_{se}: Gravedad específica efectiva del agregado.

G_{sb}: Gravedad específica neta del agregado.

G_b: Gravedad específica del asfalto.

- *Contenido de asfalto efectivo (Pbe)* [16]

El contenido de asfalto efectivo (Pbe), de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica. La fórmula es:

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps$$

Ecuación 2-5. Contenido de asfalto efectivo.

Donde:

Pbe: Contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla.

Pb: Contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla.

Pba: Asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.

Ps: Contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla.

2.1.3.5. *Vacíos de aire (Va)* [16]

Los vacíos de aire son el volumen total de pequeñas bolsas de aire entre partículas de agregado cubiertos con asfalto. Se expresa como porcentaje del volumen total de la mezcla compactada, utilizando la siguiente ecuación

$$Va = 100 * \frac{(Gmm - Gmb)}{Gmm}$$

Ecuación 2-6. Porcentaje de vacíos de aire.

Donde:

Va: Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Gmm: Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

G_{mb}: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

En los diseños de mezclas asfálticas, es necesario que éstas contengan cierto porcentaje de vacíos, para permitir una compactación adicional a producirse cuando la mezcla sea puesta en servicio (consolidación de la mezcla), ya que, debido al tráfico, la mezcla debe proporcionar espacios (en su interior) donde pueda fluir el asfalto.

Las propiedades de los vacíos han sido históricamente relacionadas con el desempeño y la durabilidad de las mezclas asfálticas. Por ejemplo, un bajo contenido de vacíos puede producir ahuellamiento y deformaciones, mientras que un alto contenido de vacíos produce un envejecimiento acelerado, alta permeabilidad, fragilidad, fisuración prematura, desprendimiento de agregados y daños por humedad. La distribución de los vacíos de aire también afecta la presencia y el movimiento del agua en las mezclas asfálticas. El agua presente en una mezcla asfáltica tiene efectos nocivos sobre la estructura del pavimento, la cual debilita la adhesión entre los agregados y el asfalto y la cohesión de la mezcla misma, produciendo su desintegración y posteriormente la falta de la estructura del pavimento [16].

2.1.3.6. *Vacíos en el agregado mineral (VAM)* [16]

Los vacíos en el agregado mineral son el volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total de la muestra. El VAM puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, el VAM puede estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica, su valor se determina por la siguiente ecuación:

$$VAM = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

Ecuación 2-7. Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.

Donde:

VAM: Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto).

Gmb: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (AASHTO T166).

Gsb: Gravedad específica neta del total del agregado.

Ps: Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.

O si la composición de la mezcla es determinada como el porcentaje de la masa del agregado. El VAM queda determinado por la siguiente ecuación:

$$VAM = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb} * 100}{G_{sb} * (100 + P_b)}\right)$$

Ecuación 2-8. Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.

Donde:

P_b: Contenido de asfalto, porcentaje de la masa del agregado.

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) o los vacíos entre las partículas de agregado, controlan el contenido mínimo de asfalto en la mezcla y están básicamente relacionados con el cubrimiento de asfalto de las partículas de agregado, la durabilidad y la estabilidad [19]. Es decir, el VAM es la medida utilizada para asegurar un adecuado espesor de película de asfalto sobre la partícula de agregado para lograr una durabilidad aceptable de la mezcla. El VAM cuantifica el área entre las partículas de agregados llenos con aire y el contenido de asfalto efectivo. En algunos trabajos anteriores de McLeod, se ha recomendado un nivel mínimo de VAM; pero estudios recientes también recomendaron que el valor del VAM fuera limitado a un nivel máximo, generalmente a 1,5 – 2,0 % por encima del valor mínimo, con el fin de prevenir una resistencia baja al ahuellamiento. Sin embargo, a través de los años el concepto de “suficiente VAM” es materia de controversia, tanto que algunos investigadores han mostrado preocupación de que

estos requerimientos mínimos de VAM son muy estrictos y pueden excluir mezclas económicas con desempeños aceptables [20].

2.1.3.7. *Vacíos llenos con asfalto (VFA)* [16]

Porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo. En otras palabras, es el porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, no incluyendo el asfalto absorbido Su valor, con respecto al VAM de la mezcla queda determinado por la siguiente ecuación:

$$VFA = 100 * \frac{VAM - Va}{VAM}$$

Ecuación 2-9. Porcentaje de vacíos llenados de asfalto con respecto al VAM.

Donde:

VFA: Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM.

VAM: Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total.

Va: Vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total.

También se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada con la siguiente ecuación:

$$VFA = VAM - Va$$

Ecuación 2-10. Porcentaje de vacíos llenados de asfalto con respecto a la mezcla compactada.

Los vacíos llenos con asfalto (VFA) son usados principalmente para limitar el máximo de VAM, sin embargo, en el año 1985, 8 estados de los EEUU reportaron haber eliminado los requerimientos de VFA porque se consideraban redundantes si ya se habían especificado los VAM [20].

2.1.3.8. *Diagrama de componentes*

Como se observa en la Figura 2-5. el volumen total de una mezcla se define, en general, por cuatro elementos que la componen. Estos son el agregado, el asfalto absorbido por el agregado, los vacíos rellenos con asfalto (asfalto efectivo) y los vacíos rellenos con aire.

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos de aire (Va), se expresan como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica. Los vacíos llenos de asfalto, es decir, el asfalto efectivo (VFA), se expresa como un porcentaje del VAM (Ecuación 2-9) o como un porcentaje del volumen total de la mezcla asfáltica (Ecuación 2-10).

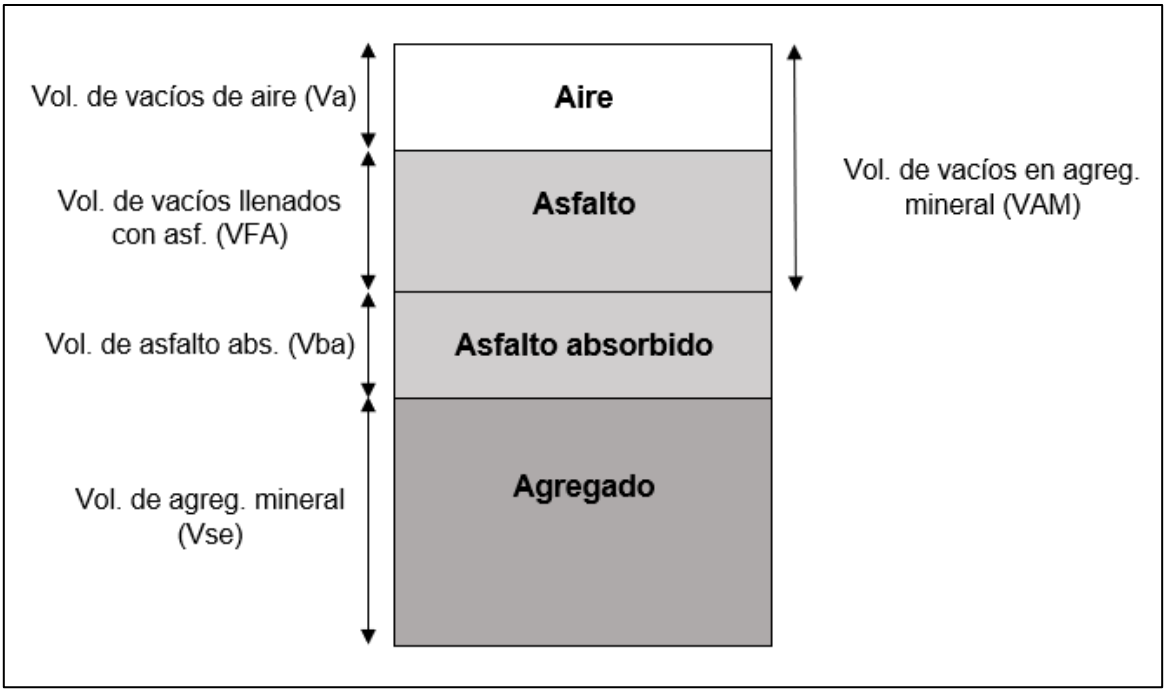


Figura 2-5. Representación de los volúmenes en una mezcla asfáltica compactada. Fuente: Elaboración propia.

2.1.4. Deformación plástica en pavimentos

La deformación plástica o ahuellamiento, es uno de los deterioros que más se observan en pavimentos asfálticos. La acumulación de deformaciones permanentes puede afectar a todas las capas de un pavimento. Desde su cimentación hasta la carpeta de rodadura [21].

Este tipo de deterioros surgen en la superficie de rodamiento de un pavimento asfáltico y se presenta en la zona de mayor incidencia de los neumáticos de vehículos pesados. Se le llama deformación permanente porque representa una acumulación de pequeñas deformaciones no recuperables que se forman cada vez que una carga es aplicada. Comúnmente se observan como una depresión longitudinal con ligero levantamiento lateral de la mezcla asfáltica y se debe a una combinación de dos factores: la densificación de la mezcla (decremento de volumen) y la deformación plástica por esfuerzos de corte. Es por esto que la deformación permanente se caracteriza por ser la deformación transversal de un pavimento que no se encuentra más en su posición de diseño inicial. Este tipo de deterioro compromete el confort y la seguridad, en consecuencia, la calidad de la circulación de los usuarios, especialmente en días de lluvia donde la acumulación de agua hace altamente riesgosa la conducción de los vehículos [21].

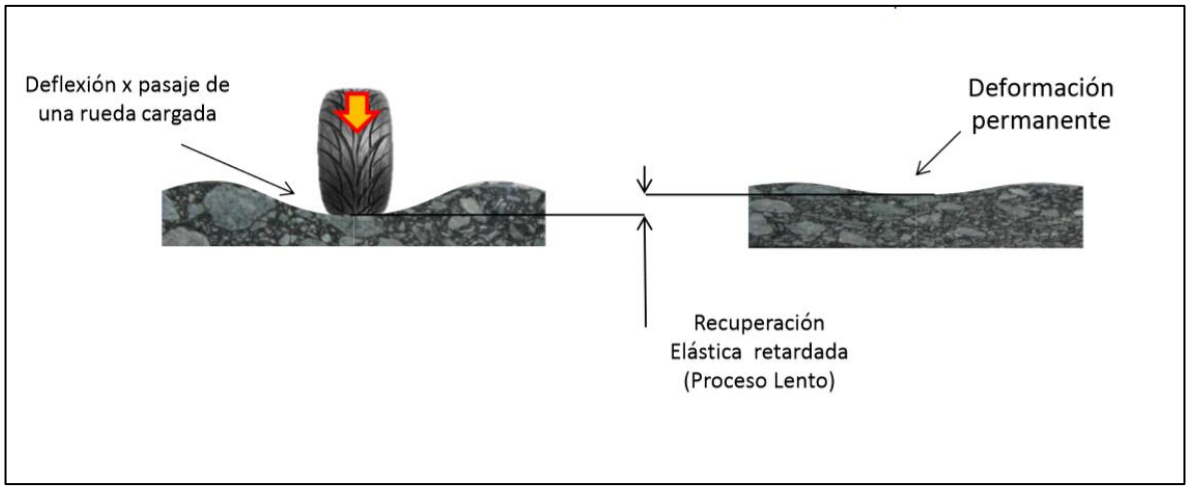


Figura 2-6. Proceso de deformaciones permanentes [22].

El origen de la deformación puede deberse a distintos factores, por ejemplo, a que se debilite el material de la capa inferior por daño de humedad, a la abrasión o a la densificación por tránsito [22]. En general, la deformación permanente en pavimentos asfálticos tiene dos causas principales [21]:

1. Por falla en la subrasante, en la cual el ahuellamiento es causado por la aplicación repetida de carga en alguna capa que conforma el pavimento por debajo de la carpeta asfáltica, aunque materiales más rígidos pueden reducir este tipo de falla, generalmente es considerado un problema estructural, más que un problema de materiales.
2. Por falla en la carpeta asfáltica, se debe a la deformación en la carpeta asfáltica debido a la falta de resistencia al corte de la mezcla asfáltica, provocando que la carpeta se consolide a lo largo de las huellas que dejan las ruedas de los vehículos, especialmente a corto plazo.

El comportamiento general de las mezclas asfálticas ante la deformación permanente obedece a la velocidad de aplicación de carga, la temperatura, el envejecimiento del asfalto y el contenido de vacíos de aire de la mezcla. Además, a niveles bajos de esfuerzo aplicado, una mezcla asfáltica puede exclusivamente presentar un comportamiento en la zona primaria y/o secundaria (Ver Gráfico 2-1), sin embargo, a mayores niveles de esfuerzo, se obtienen mezclas que llegan a experimentar deformaciones en la zona terciaria. La temperatura de ensayo es parte fundamental para llegar a la zona terciaria [23].

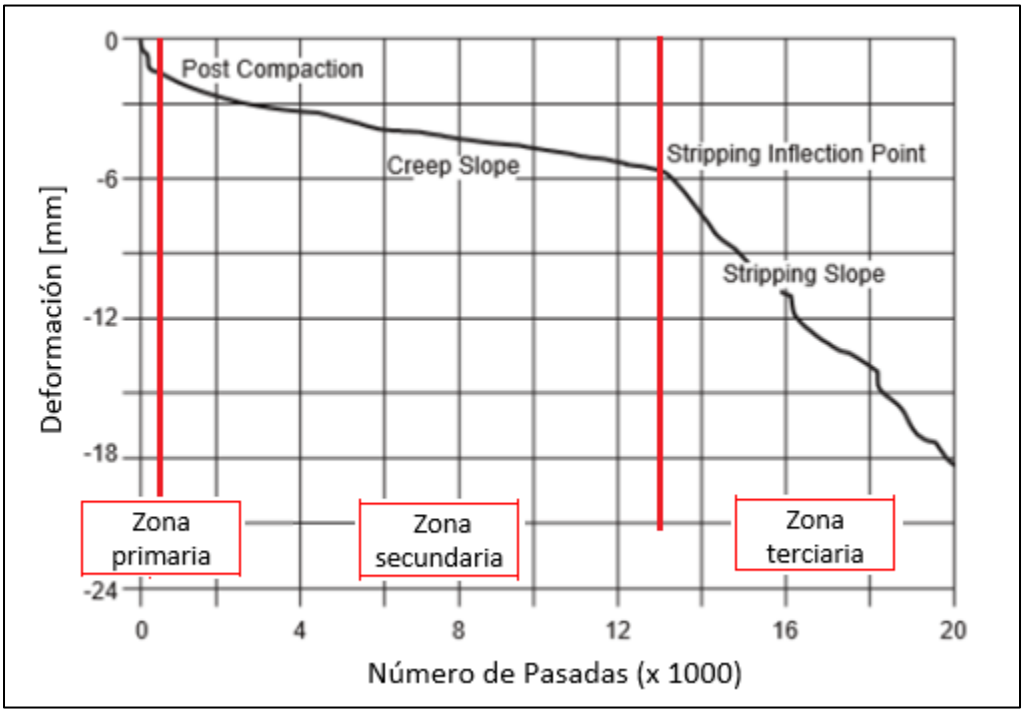


Gráfico 2-1. Representación gráfica de resultados en pruebas típicas de deformación permanente [23].

Del Gráfico 2-7, la zona primaria concierne a un periodo de post-compactación. Este rango (primeras 1.000 pasadas aprox.) corresponde a la consolidación de la mezcla posterior a la compactación y la deformación permanente se acumula rápidamente, en esta etapa, la mezcla del pavimento comienza a densificarse.

La zona secundaria corresponde al rango “creep slope” que se identifica como la pendiente de fluencia, que está directamente relacionada con la fluencia de la mezcla (deformación total en [mm] que experimenta la mezcla). La pendiente de fluencia se utiliza para medir la susceptibilidad al ahuellamiento, registrando la acumulación de deformación permanente, principalmente debido a mecanismos que no sean daños por humedad.

El punto “Stripping Inflection Point” corresponde al punto de inflexión Stripping. Está relacionado con la resistencia de la mezcla por efecto de la humedad. A partir de este punto la mezcla presenta daños producto de la humedad, observándose el desprendimiento del cemento asfáltico del árido.

La zona terciaria, corresponde al rango “Stripping Slope” y es la pendiente de pérdida de adherencia. En este rango se mide la acumulación de deformación permanente, principalmente debido al daño por humedad.

El efecto de las distintas variables que afectan la deformación plástica permanente (ahuellamiento) en las mezclas asfáltica se resume en la siguiente tabla:

Tabla 2-2. Resumen de los factores que afectan en la deformación plástica permanente o ahuellamiento de las mezclas asfálticas [23].

	FACTOR	CAMBIO DEL FACTOR	EFECTO SOBRE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO
AGREGADO	Textura superficial	De lisa a rugosa	Incremento
	Granulometría	De discontinua a continua	Incremento
	Forma	De redonda a angular	Incremento
	Tamaño	Aumento del tamaño máximo	Incremento
LIGANTE ASFALTICO	Módulo de Rigidez	Incremento	Incremento
MEZCLA ASFALTICA	Contenido de ligante	Incremento	Disminución
	Contenido de Vacíos de Aire (no menor al 3%)	Incremento	Disminución
	Contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM no menor al 10%)	Incremento	Disminución
	Método de compactación	Vibratorio o por amasado	Cambio de la estructura
CONDICIONES DEL ENSAYO	Temperatura	Incremento	Disminución
	Ensayo y nivel de tensiones	Incremento en la presión de inflado de los neumáticos o el nivel de tensiones	Disminución
	Presencia de humedad	De seco a saturado	Disminución si la mezcla es sensible al agua

Factores como el tamaño máximo de los agregados pétreos, la distribución granulométrica, el contenido y tipo de asfalto, los vacíos de aire y la porción de vacíos llenos de asfaltos, que afectan el desempeño de la mezcla asfáltica, pueden ser modificados mediante una adecuada dosificación de modo de obtener una menor deformación, mientras que la temperatura de la mezcla por efecto del clima, la presencia de agua, tipo y forma de solicitación vienen dadas por las características del lugar y el tipo de vía donde será puesta la mezcla asfáltica [23].

2.1.5. Adherencia entre cemento asfáltico – agregado

La pérdida de adherencia entre el CA y el agregado es un deterioro observado y estudiado en mezclas asfálticas, cuyo origen se debe a factores internos (materiales y diseño de la mezcla) y externos (medioambiente, cargas aplicadas, ejecución, etc.) que influyen en la unión de estos materiales cuando la mezcla es puesta en servicio en una estructura de pavimento.

Para lograr una mejor comprensión de los deterioros producidos en las mezclas asfálticas cuando están sometidas a distintos tipos de solicitaciones en las estructuras del pavimento, es fundamental comprender los conceptos de adhesión y cohesión asociados a este material [24}.

- **Adhesión** se entiende como la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies diferentes cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares y mecanismos de anclaje [24}.
- **Cohesión** se define como la propiedad que mide la fuerza de atracción entre las partículas o moléculas de un mismo cuerpo o material, concepto que se diferencia de la adhesión, principalmente debido a que ésta última propiedad se produce entre la superficie de distintos cuerpos o materiales [24}.

En el caso de las mezclas asfálticas, la pérdida de adhesión se presenta cuando se produce una ruptura de la unión en la interfaz entre el CA y el árido; mientras que el fallo cohesivo ocurre debido a la ruptura de la unión entre las propias moléculas del CA.

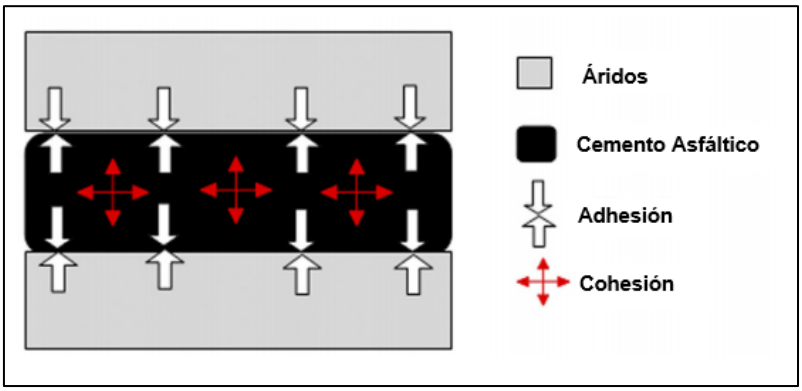


Figura 2-7. Fuerzas de adhesión y cohesión entre cemento asfáltico y áridos [24}.

Existen diferentes tipos de fallas que pueden ocurrir entre el CA y el agregado. Estas fallas son: Fallo adhesivo, Fallo cohesivo y Fallo mixto [24}.

- **Fallo Adhesivo**: Se produce en la interfaz entre la superficie del agregado y el CA (zona de adhesión) y se caracteriza porque el CA se ha separado completamente del agregado, pudiendo o no, dejar alguna mancha o descoloramiento en el agregado producto de la separación del CA.
- **Fallo Cohesivo**: Se produce cuando la rotura se encuentra en el propio CA y se pueden observar restos de CA en ambas superficies de los agregados [24}.
- **Fallo Mixto**: En este tipo de fallo se puede observar el efecto combinado de un fallo adhesivo y cohesivo. De acuerdo a diferentes investigadores, el fallo mixto es el que se produce mayoritariamente en las mezclas asfálticas [24}

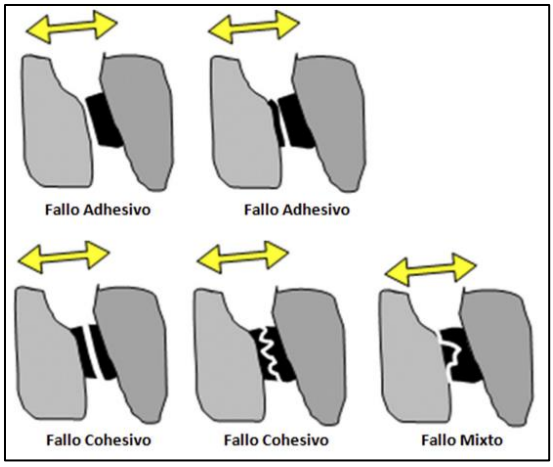


Figura 2-8. Tipos de fallos en la unión CA-Agregado [24].

La interacción entre el CA y el agregado es un fenómeno complejo. Existen diversas teorías que tratan de explicar los fallos a partir del estudio del fenómeno de adhesión entre el CA y el agregado. No existe, a ciencia cierta, alguna teoría que pueda justificar en plenitud todos los mecanismos de fallo. Es por esto que, dependiendo del caso particular de estudio, toma más importancia una u otra teoría. Las teorías más significativas en la interacción adhesiva entre el CA y el agregado son la teoría mecánica de adhesión, teoría química de adhesión y teoría de adsorción [24].

- Teoría mecánica de adhesión.

Es una de las primeras teorías desarrolladas y se basa en el anclaje que se produce entre el adhesivo y el sustrato, producto de las rugosidades y porosidades de este último, es decir, de la topografía superficial del sustrato. En el caso de las uniones CA – agregado, la adhesión está influenciada por las propiedades físicas de los áridos, tales como el tamaño de las partículas, textura superficial, angulosidad, porosidad o absorción y área superficial.

En general, se obtiene una mejor unión adhesiva entre el CA y el agregado, cuanto más rugoso sea este y posea mayor cantidad de superficie de contacto con el CA. A parte de la existencia de porosidad y rugosidad en el agregado, es necesario que el CA, en el momento del mezclado, posea la viscosidad adecuada para que pueda cubrir correctamente toda la superficie del árido penetrando en todas las irregularidades y poros de éste, generando así una zona de anclaje y sujeción que mejore la adhesión entre ambos materiales y en consecuencia mejore la resistencia a la rotura.

Esta teoría tiene el inconveniente de no poder explicar los fenómenos de adhesión entre superficies de baja rugosidad o lisas y aquel producto de incompatibilidades por afinidad química entre el CA y el agregado.

- Teoría química de adhesión.

Esta teoría resulta cuando dos materiales pueden formar un compuesto al unirse producto de su afinidad, es decir, entre el adhesivo y el sustrato. Una vez que el adhesivo a mojado correctamente al sustrato, el fenómeno de adhesión se origina siempre y cuando se generen enlaces químicos entre ellos. El concepto de reacción química surge de la presencia de

componentes reactivos en la interfaz entre el CA y el agregado. Estos componentes son llamados radicales y existen principalmente en forma de dipolos. Este concepto señala que la unión CA-agregado resulta de la reacción de esos componentes entre sí para formar compuestos, los cuales algunas veces se separan en presencia de agua produciendo el fenómeno de stripping.

- Teoría de adsorción.

El fenómeno de adhesión entre el CA y el agregado se explica también a través de la teoría de adsorción, mediante conceptos como el ángulo de contacto, la humectabilidad y la tensión superficial. El ángulo de contacto y las energías superficiales del CA y el agregado definen la capacidad del CA para humectar o mojar un agregado determinado. Por ángulo de contacto se entiende la forma que se genera cuando entra en contacto una gota de CA con la superficie del agregado, indicando el grado de humectabilidad existente entre el CA y el agregado.

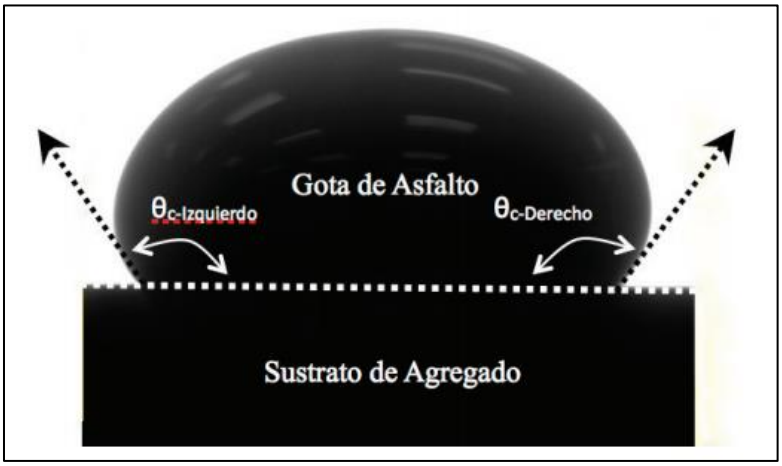


Figura 2-9. Ángulo de contacto entre el cemento asfáltico y el agregado [24].

Para ángulos de contacto (θ_c) inferiores a 90°, el CA moja correctamente el agregado, generando una buena adhesión entre ambos materiales, mientras que para ángulos mayores que 90°, no se genera una correcta adhesión. Asociado al concepto de ángulo de contacto, y que definen parte de la teoría de adsorción, se encuentran los conceptos de tensión superficial y energía superficial. Donde la tensión superficial corresponde a la resistencia que, en este caso, presenta el CA a deformarse o romperse, mientras que la energía superficial es la propiedad que posee el agregado para atraer o repeler de su superficie al CA a través de fuerzas intermoleculares. Para el caso de la interacción CA-agregado, cuando el CA dispone de una tensión superficial inferior a la energía superficial del agregado, este es capaz de humectar la superficie del agregado generando un ángulo de contacto inferior a 90°, creando una buena adhesión entre ambos materiales. Es decir, cuando el agregado posee una alta energía superficial, tiende a atraer al CA que tiene una baja tensión superficial, debido a su viscosidad a la temperatura de fabricación de la mezcla [24].

Las teorías y mecanismos antes descritos, no son exclusivamente independientes, muchos de ellos están relacionados entre sí y ocurren simultáneamente [24].

Dentro de los factores internos que influyen en las uniones de CA y agregado se tienen las propiedades físico-química de los materiales y el diseño de la mezcla, que a su vez depende de la granulometría, contenido de CA y espesor de recubrimiento.

De las propiedades de los materiales, se tiene que el comportamiento adhesivo de la unión CA-agregado depende de sus propiedades físico-químicas [25]. Donde, en el caso del agregado, sus propiedades están definidas por su mineralogía y por el proceso de triturado (forma, superficie, estructura, porosidad y tamaño del árido), mientras que sus propiedades químicas están definidas, principalmente, por su procedencia y composición mineralógica. En el caso del ligante asfáltico, sus propiedades físicas van relacionadas con su consistencia, la cual depende, principalmente, de la temperatura a la que se encuentre por tratarse de un material viscoelástico termo-dependiente, presentando un comportamiento sólido elástico a baja temperatura y líquido viscoso a altas temperaturas [26].

Estas características de los materiales constituyentes de las mezclas asfálticas influyen en una mayor o menor adhesión que puede haber entre ellos, puesto que, como se ha señalado en las teorías de adhesión, esta mezcla de propiedades influye en el grado de adhesión entre estos materiales [25].

Del diseño de la mezcla, se tiene que la granulometría del agregado influye directamente en el comportamiento de las uniones CA-agregados de una mezcla asfáltica. Donde las mezclas que presentan una granulometría más continua, poseen una menor superficie específica de los agregados envueltos con el CA en contacto con los agentes atmosféricos que deterioran dichas uniones, retardando así el envejecimiento de éstas y, por lo tanto, la fragilidad de los puentes de adherencia entre el árido y el CA de la mezcla [27]. Los agentes atmosféricos como el oxígeno y los rayos UV, producen la volatización de las fracciones livianas del CA, deteriorando los puentes de adherencia CA-agregado y contribuyendo al envejecimiento del CA, y en consecuencia a su fragilidad.

Como consecuencia del proceso de envejecimiento, el CA se torna frágil y propenso a sufrir daño por humedad, por lo cual, mezclas más porosas y con huecos interconectados en la mezcla, se ven más afectados por dichos agentes debido a la mayor exposición [24].

El contenido de CA debe ser el óptimo que permita una correcta unión en toda la matriz de áridos componentes de una determinada mezcla, sin producir posibles exudaciones ni desprendimientos como consecuencia de un exceso o falta de ligante, respectivamente.

El espesor teórico de recubrimiento del agregado es función del contenido específico de CA, de la granulometría utilizada y de las características superficiales del agregado. Donde recubrimientos muy finos contribuyen a un envejecimiento prematuro de la mezcla y por consecuencia, aumenta la fragilidad [28]. Por otra parte, el efecto del espesor de recubrimiento en el agregado influye en la susceptibilidad al agua de las uniones CA-agregado. Experimentalmente los investigadores Sengoz y Agar comprobaron dicha teoría [29].

La interacción química entre el asfalto y el agregado es crítica para el entendimiento de la capacidad de las mezclas asfálticas de resistir los daños por humedad (Robertson, 1991).

El efecto de la separación entre el CA y el agregado fue descubierto en la década de los treinta y se denomina “stripping”. El stripping ocurre por un efecto fisicoquímico entre el asfalto y

el agregado pétreo, por lo tanto, la calidad de este último y su composición mineralógica son factores que afectan la magnitud de este fenómeno [24].

El stripping se define como: “Desprendimiento de la película asfáltica que recubre el agregado pétreo debido a la penetración de agua entre la superficie del agregado y la película de asfalto, ya que, dada la mayor afinidad del agua con el agregado, la unión entre los materiales que componen la mezcla asfáltica se rompe” [30].

A grandes rasgos, el fenómeno de stripping involucra aspectos químicos, físicos, mecánicos y termodinámicos, lo que hace complejo su estudio en profundidad. A pesar del gran número de investigaciones que se han realizado sobre este tema, tanto el fenómeno como las causas que lo generan no han sido totalmente entendidas ni identificadas.

2.1.6. Humedad en pavimentos

La adherencia entre el CA-agregados está íntimamente relacionado con el daño producto de la humedad de las capas asfálticas, que no necesariamente es causado por la acumulación de esfuerzos en las capas asfálticas, si no por la mala interacción química de los agregados con el asfalto debido a la presencia de agua o vapor de agua al interior de la mezcla, observándose un desprendimiento entre el ligante y el árido, es decir, ocurre un fallo adhesivo. Esto se produce porque el agua penetra entre el CA y la superficie del árido, reemplazando al ligante como revestimiento del árido (Ver Figura 2.11.). Sin embargo, existen estudios que señalan que la ruptura de las uniones puede ocurrir en el CA, es decir, un fallo cohesivo, o bien también, una combinación de ambos fallos [24].

La forma más común de observar este tipo de daños es después de la temporada de lluvias, ya que, aparecen los “Baches” sobre los pavimentos asfálticos construidos con mezclas susceptibles a la humedad [31].

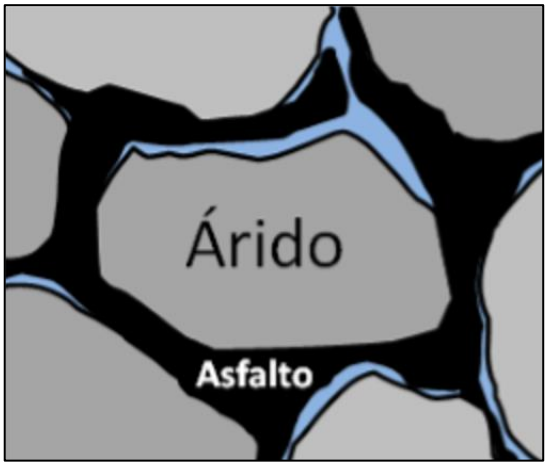


Figura 2-10. Despegue de película de cemento asfáltico de la superficie del árido [24].

El daño por humedad es un fenómeno que se viene estudiando desde los años 30s, donde Nichiolson (Nicholson, 1932) fue uno de los primeros investigadores en estudiar los problemas de cohesión de las mezclas asfálticas. En su documento “Adhesión tensión in asphalt pavements,

its significance and methods appocable in its determination", planteó la importancia de la elección del tipo de agregado y la presencia de la humedad en los pavimentos de asfalto.

Diferentes investigaciones han postrado que las manifestaciones más comunes debido a la presencia de humedad en las mezclas asfálticas son el **stripping** y el **raveling**, el primero de ellos se conoce como el desprendimiento del cemento asfáltico y de los agregados, el segundo de ellos consiste en el desprendimiento gradual de los agregados y la mezcla de la superficie debido al paso constante de los vehículos [32].

Factores como la mineralogía del agregado, las características del CA y el uso de aditivos anti-stripping influyen en el rendimiento de la mezcla de asfalto cuando se evalúa el daño por humedad. También influyen el método de construcción, clima y carga de tráfico [32].

Tabla 2-3. Factores que influyen en el rendimiento de la mezcla de asfalto al evaluar el daño por humedad [33].

Factores	Determinar las características	Propiedades favorables
Propiedades de los agregados	Textura superficial, mineralogía, porosidad, humedad superficial, composición química y revestimiento de la superficie del agregado.	Textura de superficie rugosa, agregado carbonoso, bajo contenido de sílice, cantidad óptima de porosidad, agregado seco superficial, sin recubrimiento.
Características del asfalto	Grosor de la película de asfalto, viscosidad, estructura física y química.	Alto espesor de la película de asfalto, alta viscosidad, existencia de fenol y nitrógeno.
Método de construcción	Método de compactación, sistema de drenaje, mecanismo de vacíos de aire.	Compactación adecuada, sistema de drenaje adecuado, bajo porcentaje de vacíos de aire, incorporar aditivos de resistencia al agua en cada capa de pavimento.
Condición ambiental	Clima, temperatura ambiental.	Climas cálidos, temperatura suave (baja velocidad de cambio de temperatura), sin ciclos de hielo-deshielo.
Carga de tráfico impuesta	Carga de tráfico.	Poco tráfico.

2.1.6.1. Mecanismos de fallo asociados al efecto del agua

Entre los mecanismos de fallo asociados al efecto de la acción del agua, los cuales pueden ocurrir de forma individual o en conjunto, son el desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro y abrasión hidráulica [33].

- **Desprendimiento**: Ocurre cuando queda una película de agua o polvo en la superficie del agregado y, aunque el CA esté recubriéndolo completamente, no existe una adherencia o unión adhesiva entre ambos elementos, pudiéndose desprender fácilmente el ligante del árido.
- **Desplazamiento**: Ocurre por una rotura de la película del ligante cuando el árido está cubierto completamente, o bien producto de un recubrimiento inadecuado. Donde, una vez que ingresa el agua, el ligante se retrae de la superficie del árido (en mayor o menor grado de acuerdo al grado de acidez del árido), aumentando el ángulo de contacto entre el ligante y el árido, dejando una mayor superficie de contacto del árido con el agua. En este fenómeno, el envejecimiento del ligante actúa como colaborador, debido a que algunos productos de las reacciones de oxidación corresponden a compuestos solubles en agua, de esta forma se debilita la película de CA que recubre los áridos, permitiendo el ingreso de agua a través de microporos debido a la solución de compuestos, o bien a través de microfisuras producto de la fragilización del ligante.
- **Emulsificación espontánea**: Se produce cuando el ligante se combina con el agua produciéndose una emulsión en la cual el ligante pierde su capacidad adhesiva.
- **Presión de poro**: Es uno de los mecanismos más importantes en mezclas abiertas o porosas. Ocurre cuando el agua es atrapada en el interior de la mezcla y ésta es compactada por efecto del tráfico, generando presiones internas en el material, que provocan la ruptura de las uniones entre el árido y el ligante.
- **Abrasión hidráulica**: Se produce como consecuencia de la acción de las cargas de los neumáticos de los vehículos en zonas donde existen precipitaciones acentuadas. Este es uno de los principales deterioros en pavimentos asfálticos asociados a fallos de las uniones de la mezcla asfáltica.

Los deterioros producidos en los pavimentos asfálticos, generalmente son ocasionados por una combinación de fallos. No obstante, algunas patologías están más condicionadas por un tipo de mecanismo de fallo que por otro.

2.1.6.2. Deterioros en pavimentos asfálticos

Algunos de los deterioros más frecuentes en pavimentos asfálticos, por fallos ocurridos en las uniones entre el árido y el ligante de las mezclas asfálticas son el **desprendimiento de áridos de la mezcla asfáltica**. Este deterioro se debe, principalmente a un fallo de la unión cohesiva o adhesiva de la matriz árido-ligante, producto de que existe poca afinidad entre el ligante y el árido. También se debe a la falta de recubrimiento o espesor de ligante, a la utilización de áridos sucios y a la posible presencia de agua durante el extendido de la mezcla [24].

El **envejecimiento del cemento asfáltico** es otro tipo de deterioro observado, debido a que al envejecerse el ligante, aumenta el endurecimiento y fragilidad de las uniones de la mezcla, por lo tanto, ésta se vuelve más rígida y susceptible a fallos por fisuración. Entre los fallos por fisuración más frecuentes asociados a este fenómeno se encuentran la fisuración en bloque, la

fisuración transversal y la fisuración por fatiga. Las fisuraciones por bloque y transversal, son causadas principalmente por las tensiones generadas debido a gradientes térmicos, especialmente en mezclas asfálticas con módulos de rigidez muy altos, en las cuales se provocan retracciones superficiales. La fisuración por fatiga, ocurre con mayor frecuencia en las zonas del pavimento que recibe la mayor parte de las solicitaciones del tráfico. Este fallo se caracteriza por estar formado de muchos trozos de pavimento de ángulos agudos, que en etapas avanzadas de deterioro forman un patrón geométrico parecido a una piel de cocodrilo [24]

Por último, uno de los principales daños de las mezclas asfálticas in situ ocurre cuando **se separa el CA del agregado debido a la presencia del agua**. Este fenómeno se identifica como stripping y puede ocurrir por uno o más mecanismos de fallo asociados a la acción del agua descritos anteriormente. Sin embargo, este deterioro puede acelerarse dependiendo de la interacción química en la unión adhesiva formada en la matriz árido-ligante. En la práctica, si los áridos están completamente secos, se dejan envolver fácilmente por el ligante, en cambio, si los áridos están húmedos, presentan una cierta polaridad cuyo signo depende de si son ácidos con superficies que tienden a estar cargadas negativa (-), o básicos con superficies que tienden a estar cargadas positivas (+). Es decir, los áridos ácidos, que se caracterizan por tener un mayor contenido de sílice, presentan peor adhesividad con los ligantes asfálticos, en relación a aquellos más básicos. Otro factor acelerante de este tipo de patología es el envejecimiento del CA, debido a la aparición de microporos o micro fisuras en la película de CA que cubre los áridos, permitiendo el ingreso del agua en la interfaz árido-ligante, tal como se explicó anteriormente [34].

2.1.6.3. Fuentes de humedad en mezclas asfálticas

Las fuentes de humedad en mezclas asfálticas pueden ser externas o internas. De forma externa, proviene desde la superficie, lateralmente, desde las zonas de drenaje o de las capas debido al alto nivel de agua subterránea [35], como se puede observar en la siguiente figura:

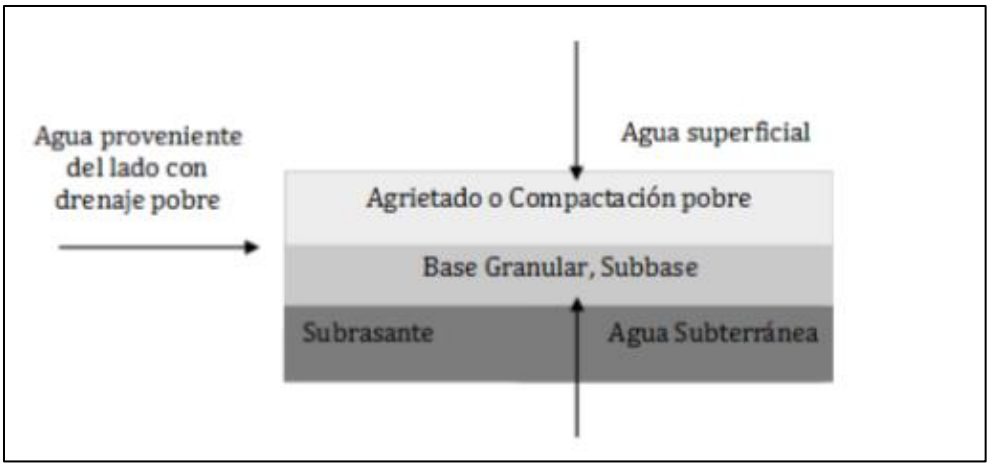


Figura 2-11. Fuentes de humedad en una estructura de Pavimentos Flexibles [35].

La humedad en pavimentos también puede estar presente de forma interna, como resultado de agregados parcialmente secos o características del área de emplazamiento de la obra.

Por otra parte, Boyes [36] describe que el agua puede penetrar en el pavimento a través del agrietamiento del pavimento, donde el agua sobre el pavimento se infiltra a través de pequeñas grietas superficiales, saturando los vacíos de aire y en capas inferiores aumenta la capa freática.

Mercado [37] dedujo que la humedad puede penetrar al pavimento a través de la infiltración, la evaporación y el ascenso capilar.

En general, cuando el agua o la humedad están en contacto con el CA-agregado, la mezcla de asfalto pierde resistencia estructural y rigidez. Este problema conduce a daños en el pavimento como raveling, stripping, agrietamiento por fatiga, desgaste de la superficie y rutting. A más largo plazo puede causar daños severos y así disminuye la vida útil del pavimento [38].

Para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas, se recurre a ensayos con equipos que no pueden reproducir por completo cada uno de los factores del medio ambiente en las propiedades mecánicas y reológicas de las mezclas y los CA. La mayor parte de las investigaciones intentan combinar los distintos ensayos y equipos para buscar una forma de evaluar cómo cambian las propiedades de estos materiales sometidos a condiciones reales de ambiente.

2.2. ESTADO DEL ARTE

El desempeño de las mezclas asfálticas está directamente relacionado con la vida útil de éstas cuando la mezcla sea puesta en servicio. Dependiendo del comportamiento que se quiere estudiar, se determina el tipo de ensayo que se debe realizar.

En la presente memoria de título se evalúan tres tipos de desempeños observados en los pavimentos. Estos son la deformación plástica, la adherencia entre el cemento asfáltico – agregado y la susceptibilidad al daño por humedad.

2.2.1. Deformación plástica o ahuellamiento

Las deformaciones plásticas permanentes ocurren debido a una combinación del flujo del material y del daño en este material, representado por la deformación y prolongación de fisuras. La capacidad de la mezcla para resistir este tipo de deformación depende de diversos factores, entre los cuales se encuentra la consistencia del ligante y la volumetría de la mezcla asfáltica [21].

Los ensayos de laboratorio tienen la finalidad de simular al máximo posible lo que ocurre en un pavimento cuando es puesto en servicio. Se evalúa el desempeño de la mezcla, registrando las deformaciones bajo condiciones de temperatura, humedad, esfuerzos y condiciones generales de los materiales. Posteriormente se obtienen conclusiones analizando los resultados y comparándolos con la normativa vigente.

En general, los ensayos de rueda cargada sirven para simular y/o evaluar en laboratorio el comportamiento de la mezcla cuando es puesta en servicio. Existen unos ensayos más aproximados a la realidad que otros.

Los ensayos necesarios para estudiar la deformación permanente se clasifican de la siguiente manera: Ensayos Fundamentales, de Simulación de tráfico y otros ensayos recomendados para medir deformación permanente [22].

2.2.1.1. Ensayos Fundamentales [22]

Entre los cuales destacan los siguientes: Diametral, Uniaxial, Creep Estático. Creep Dinámico, Triaxiales, De Corte, Empíricos.

- **Ensayos Diametrales**: Este tipo de ensayo no aparece como los más indicados o adecuados para evaluar las deformaciones plásticas. Desde que se sabe que es un ensayo de tensión, no puede predecir ahuellamiento en forma eficiente.
- **Ensayos Uniaxiales**: Es un tipo de ensayo que puede ser potencialmente usado para predecir el funcionamiento de pavimentos, pero uno de los principales problemas que presenta este tipo de ensayo es la capacidad para predecir el funcionamiento debido a la carga y la temperatura que pueden ser usados en el ensayo. Se sabe que la temperatura y el esfuerzo aplicado en el laboratorio deben ser muy similares al que un pavimento presenta en condiciones reales. Estos ensayos, por otro lado, no conducen a una falla inmediata de los especímenes.
- **Creep Estático (o simplemente Creep)**: Es el ensayo más simple para medir la deformación permanente. En algunos países este ensayo viene siendo realizado a través de la aplicación de cargas compresivas, por ello, se le conoce como ensayo de compresión uniaxial (Brasil) o ensayo de creep; También puede ser realizado a través de

la aplicación de cargas de torsión, flexión y tracción. El ensayo sin confinamiento fue aplicado en mezclas asfálticas en los años 70 por la Shell y ganó bastante aceptación debido a su simplicidad de preparación de cuerpos de prueba y de ejecución del ensayo. En general, el ensayo consiste en la aplicación de una carga a lo largo del tiempo. La muestra se puede extraer de campo o puede ser fabricada en laboratorio. Es importante que las caras del cuerpo de prueba sean perfectamente paralelas y perpendiculares al sentido de aplicación de la carga, de manera que la carga sea aplicada uniaxialmente. Debido a la aplicación de la carga estática, el cuerpo de prueba se deforma hasta que se estabiliza o rompe (en caso de tratarse de un estado avanzado de daño).

- **Creep Dinámico**: El ensayo de creep dinámico consiste en la aplicación de pulsos de carga (carga de compresión axial penetrante) al cuerpo de prueba, a una determinada frecuencia, tiempo de aplicación de carga e intervalo de tiempo entre las aplicaciones de las cargas, a una temperatura especificada. Tiene como objetivo medir la deformación permanente acumulada. El módulo de creep dinámico corresponde a la razón entre la tensión aplicada y la deformación relativa en el tiempo, donde la deformación relativa corresponde a la razón entre la deformación absoluta por la altura inicial del cuerpo de prueba.
- **Ensayos Triaxiales**: A diferencia de los ensayos uniaxiales, este tipo de ensayo proporciona una presión de confinamiento, aproximándose más a las condiciones reales a las que está sometido un pavimento, proporcionando una temperatura y presión similar a la del lugar, llevando a los especímenes a una falla a corto tiempo.
  En este tipo de ensayo es necesario medir las deformaciones en los sentidos vertical y horizontal. Este tipo de ensayo es complicado de realizar, por lo que no es muy utilizado en los diversos países.
- **Ensayos de Corte**: Este tipo de ensayo incluye al ensayo Superpave de corte SST, es muy complicado de llevar a cabo y muy costoso. No tiene mucha aceptación, debido a os modelos que utiliza para la predicción del comportamiento o funcionamiento. No es apropiado en la predicción de ahuellamientos.
- **Ensayos empíricos**: Son ensayos basados en la experiencia y en la correlación de resultados de laboratorio. Sus predicciones en cuanto a su funcionamiento son muy limitadas. De ser utilizados, en la mayoría requieren de otros ensayos de laboratorio adicionales. Algunos ensayos para evaluar las deformaciones plásticas son el método de ensayo Marshall, el ensayo Hveem y el GTM.

2.2.1.2. Ensayos de simulación de tráfico [22]

Estos ensayos son simuladores de tráfico en laboratorio. Entre estos ensayos se tienen el LCPC (francés), LNEC (Portugal), Universidad de Carolina del Norte, UFRGS, IPR, entre otros. Los equipos permiten una investigación más próxima de la realidad. Algunos ensayos se describen a continuación:

- **Ensayo de simulador de tráfico LCPC** (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées): Consiste en compactar la mezcla asfáltica por amasado de una rueda neumática con carga y presión de inflado regulable, a una temperatura especificada (generalmente de

60°C). El ensayo se encuentra normado por la especificación francesa NF P 98-253-1 (AFNOR 1991).

El ensayo es realizado en dos placas simultáneamente colocadas una a cada lado del equipo, unido con un eje con dos neumáticos. El neumático queda permanentemente en contacto con la placa asfáltica y aplica carga en movimiento longitudinal de ida y vuelta en ciclos de 1 Hz. Midiendo la profundidad en la huella de la rueda a los 1.000, 3.000, 10.000, 20.000 y 30.000 ciclos.

Además de los aspectos comparativos entre mezclas en lo que respecta a la resistencia a la deformación permanente, el ensayo puede ser usado para investigar el efecto de diversos factores en el comportamiento mecánico.

Figura 2-12. Simulador de tráfico LCPC [22].

- **Ensayo LNEC** (Laboratorio Nacional de ingeniería Civil, Portugal): Este ensayo permite controlar la temperatura dentro de una cámara, donde se pasa una rueda rígida una cantidad determinada de veces, con un peso predefinido. La idea es la misma que la descrita en los ensayos anteriores, es decir, se mide la capacidad de resistir a la deformación permanente en la mezcla de prueba.
- **Simulador de tráfico de la Universidad de Carolina del Norte**: En el simulador instalado en la Universidad de Carolina del Norte, se han realizado importantes trabajos científicos sobre la caracterización mecánica de mezclas asfálticas. Este equipo posee ruedas que actúan directamente en una losa de mezcla colocada sobre una plataforma. En total son seis ruedas actuando y moviéndose en el sentido contrario por encima de las ruedas que están actuando en la losa. De esta forma diversas plataformas son probadas para simular en laboratorio lo que sucede en situaciones de campo. Además de suelos, materiales como el caucho también son usados como plataforma, produciendo fallas en la losa de mezcla asfáltica similares a las encontradas en el campo.
- Existen simuladores en escala real, como los desarrollados por en Lavoratorio de pavimentos (LAPAV) en la Universidad Federal de Río Grande do Soul (**UFRGS**) y el **IPR**, que son equipos con la capacidad de imprimir a un pavimento experimental, en apenas algunas semanas o meses, cargas relativas a un tiempo de servicio de 10 a 20 años.

Tales equipos aplican solicitaciones directamente sobre la estructura del pavimento 24 hrs/día, 7 días/semana durante las semanas que sean necesarias. A diferencia de la mayoría de los equipos de laboratorio, estos simuladores tienen la capacidad de evaluar no solo el revestimiento asfáltico, sino también, toda la estructura del pavimento, verificando el comportamiento resultante de la interacción entre las diversas capas que componen los pavimentos asfálticos. Este tipo de simuladores tienen la ventaja de permitir evaluar proyectos de pavimentos en condiciones de tráfico y climas reales Como desventaja se tiene que no se considera el envejecimiento del ligante y la auto recuperación de fisuras que se dan en el largo plazo.

Figura 2-13. Ensayo de simulación de tráfico a escala real desarrollado por la Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil [22].

A modo de conclusión, se puede afirmar que, en el campo de la predicción de las deformaciones permanentes, los resultados obtenidos con este tipo de ensayos son muy aproximados con el funcionamiento real del pavimento cuando es sometido a las cargas de tráfico.

2.2.1.3. Otros ensayos recomendados para medir deformación permanente [22]

Estos ensayos no solo miden la deformación permanente de la MAC, sino que también mide otras propiedades de la mezcla como la susceptibilidad al daño producto de la humedad. Algunos de estos ensayos son: Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT), Asphalt Pavement Analyzer (APA), Hamburg Whell Tracking (HWTD) – Modelo de Hamburgo, Purdue University Laboratory Wheel-Tracking Devi, French Wheel Tracker (FWT), Model Mobile Load Simulator (MMLS3).

- **Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT)**: El GLWT fue desarrollado a mediados de los 80 en Georgia a partir de modificaciones introducidas a un modelo diseñado por C.R. Benedict de Benedict Slurry Seals. Inc., para ensayar lechadas de asfalto (surry seals) con la finalidad de elaborar un instrumento que permita realizar ensayos de medición de

ahuellamiento en laboratorio, así como también, controlar la calidad en obra de mezclas asfálticas en caliente.

Se utilizan muestras cilíndricas (15 cm de diámetro y 7,5 cm de altura) o rectangulares (12,5 cm de ancho, 30 cm de largo y 7,5 cm de altura) compactadas por distintos métodos, cuyo contenido de vacíos debe ser de 4 % (cilíndricas) y 7 % (rectangulares).

LA metodología consiste en aplicar una carga de 445 N a través de una rueda metálica, apoyada sobre una manguera neumática presurizada a 690 kPa, ubicada sobre la muestra de prueba, donde a partir de un movimiento de ida y vuelta (1 ciclo) de la rueda, simula la circulación vehicular y permite medir el ahuellamiento a los 8.000 ciclos, para condiciones dadas de temperatura que varía entre los 35 y 60 °C.

- **Asphalt Pavement Analyzer (APA)**: El APA fue construido por primera vez en 1996 por Pavement Technology, Inc a partir de una modificación del modelo de Georgia. Su uso se encuentra estandarizado por la norma AASHTO TP 63-03. Tiene la capacidad de evaluar el ahuellamiento, fatiga y resistencia a la acción de la humedad de mezclas asfálticas en caliente, a través de un dispositivo similar al de Georgia. Las probetas para ensayar pueden ser cilíndricas o rectangulares y la temperatura de ensayo varía entre los 40,6 y 64 °C. Sobre las muestras se apoya una manguera presurizada a 690 kPa o 830 kPa y una rueda de carga de 445 o 533 N (depende de la presión dada) simulando los vehículos circulantes.

  Las muestras se compactan por vibrado o amasado, alcanzando entre un 4 y 7 % de Va para probetas cilíndricas y un 7 % de Va para probetas rectangulares. En ensayo se puede realizar en seco o en agua. Las probetas a ensayar pueden ser elaboradas en laboratorio o extraídas in situ. El ensayo termina a los 8.000 ciclos y se obtiene una gráfica de deformación versus tiempo.

Figura 2-14. Preparación de la cinta de caucho presurizada y probetas en ensayo APA.

- **Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD)**: La máquina de Hamburgo fue desarrollada por Helmut Wind Incorpored de Hamburgo, Alemania en 1970. Es ampliamente utilizado en EE.UU. y Europa para evaluar la resistencia a la humedad y al ahuellamiento de mezclas asfálticas. El ensayo se encuentra normado en EE.UU. por la norma AASHTO T

324-14 y en Europa por la norma UNE-EN 12697-22, donde está catalogado como un dispositivo de tamaño pequeño y se caracteriza el ensayo bajo agua en el procedimiento B.

El ensayo permite ensayar dos muestras simultáneamente, mediante dos ruedas paralelas, donde se mide la resistencia a la humedad y al ahuellamiento. Las probetas pueden ser cilíndricas (152 o 254 mm de diámetro y 62 mm de espesor) o placas rectangulares (260 mm ancho, 320 mm de largo y de espesor variable). La temperatura del ensayo varía entre 25 y 70 °C, pero la temperatura de ensayo común es de 50 °C para ensayo en agua y 60 °C para ensayo en seco. La rueda es de acero recubierta con 10 mm de caucho para el ensayo en seco o de acero para ensayo en agua. La rueda gira con una frecuencia de 53 pasadas por minuto. El ensayo tiene una duración de 20.000 pasadas o hasta que la mezcla de prueba alcance una deformación de 20 mm.

Figura 2-15. Máquina para ensayo de Rueda de Hamburgo.

- **Purdue University Laboratory Wheel-Tracking Devi**: Este ensayo de rueda cargada se desarrolló en la Universidad de Purdue y presenta similitud con el ensayo de Hamburgo, ya que permite determinar el ahuellamiento potencial y sensibilidad a la acción de la humedad. Aplica una presión de 620 kPa sobre la muestra (de campo o de laboratorio) con una velocidad de 33,2 cm/seg a través de una rueda neumática inflada a una presión de 793 kPa.

  Las dimensiones de la probeta utilizada son de 50 cm de longitud, 18 cm de ancho y de 1 a 5 cm de espesor. Las muestras se compactan por medios de compactación lineales y el contenido de vacíos de aire debe variar entre 6 y 8 %, pudiendo ensayarse en condiciones secas y húmedas.

  El ensayo se realiza hasta 20.000 pasadas o hasta alcanzar 20 mm de ahuellamiento. Al finalizar el ensayo, se calcula el coeficiente de humedad, definido como la relación entre el número de ciclos para los que se alcanza una huella de 12,7 mm en condiciones secas y otro para condición húmeda. Cabe destacar que en este ensayo puede adaptarse una rueda móvil con la cual simular un movimiento en sentido transversal en el ancho de la muestra.

- **French Wheel Tracker (FWT)**: El FWT es un ensayo que permite prevenir daños por ahuellamiento en mezclas asfálticas en caliente. Se utiliza en Francia desde hace 20 años y está comenzando a utilizarse en EE.UU.
  La metodología de trabajo de este aparato es similar a las antes descritas, a diferencia de que se aplica una carga de 5.000 N a una rueda neumática con una presión de inflado de 600 kPa, a una velocidad de 67 ciclos/min.
  Las dimensiones de las probetas utilizadas son de 50 cm de longitud, 18 cm de ancho y de 1 a 5 cm de espesor. La máquina permite ensayar dos probetas simultáneamente.
  Al finalizar el ensayo, se calcula la deformación, definida como la media de 15 mediciones de profundidad de la huella, medidas en 5 hileras paralelas al largo y 3 distribuidas a lo largo del ancho de la muestra. El valor se expresa como un porcentaje del espesor original de la muestra.
- **Model Mobile Load Simulator (MMLS3)**: El MMLS3 fue desarrollado en Sudáfrica, es un simulador de carga móvil con una escala 1/3 respecto al real. Se aplica a la evaluación de mezclas asfálticas en caliente producidas en laboratorio o in situ, cuyas dimensiones son de 120 cm de largo por 24 cm de ancho. El ensayo es posible en condiciones secas y húmedas.
  La carga es aplicada por una única rueda neumática, inflada a una presión de 800 kPa que genera una presión de contacto sobre la muestra de 690 kPa. Se mueve a una velocidad de 7200 pasadas/hora. Las dimensiones de la rueda son de 30 cm de diámetro y 8 cm de ancho. La temperatura de ensayo es de 50 o 60 °C para condición seca y de 30 °C para condición húmeda.
  El ensayo mide la profundidad de la huella en los perfiles transversales, los cuales se utilizan para determinar el Módulo por Análisis Sísmico de onda de Superficie (Seismic Análisis of Surface Wavesmoduli), el cual permite evaluar el ahuellamiento o daños producidos por agrietamiento o humedad.

2.2.2. Adherencia entre el par cemento asfáltico-agregado y susceptibilidad al daño por humedad.

De lo explicado en el marco teórico de la presente memoria de título, se determina que la susceptibilidad al daño por humedad está íntimamente relacionado a la unión entre el CA y el árido. El daño por humedad puede ocurrir en dos condiciones: Pérdida de adherencia entre el CA y el árido o el debilitamiento del CA producto de fallas de cohesión debido a la presencia de humedad [39]. Para el primer mecanismo, el agua se infiltra en la mezcla asfáltica y se rompe la unión entre el CA y el agregado, dejando al agregado desprovisto de recubrimiento asfáltico.

Existen dos tipos de ensayos para evaluar la susceptibilidad de la mezcla al daño por humedad. Estos ensayos son los de tipo cualitativo y cuantitativo.

Las pruebas cualitativas se realizan en agregados recubiertos con asfalto, sumergiendo las muestras en agua. Algunos ejemplos de estas pruebas son la prueba de ebullición, la tira y las pruebas de inmersión estática / dinámica. El beneficio de estas pruebas es que demandan poco tiempo y son menos costosas de realizar en comparación a las pruebas de tipo cuantitativa, donde se debe compactar la mezcla. Además, estas pruebas solo necesitan equipos y

procedimientos simples. Sin embargo, estas pruebas no son capaces de simular la presión de los poros, la condición del tráfico y las propiedades de diseño de la mezcla, para justificar la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. Los resultados son en su mayoría de tipo cualitativos, donde los resultados tienen a ser subjetivos, ya que depende del criterio y la experiencia del evaluador. Además, la correlación entre estos tipos de pruebas y el rendimiento del pavimento asfáltico en campo aún no es confiable [33].

Los métodos más utilizados para estos tipos de ensayos son:

- **Prueba de inmersión estática** [33]: Este método se encuentra estandarizado por las normas ASTM D 1664 y AASHTO T 182, donde los parámetros a medir son el porcentaje de agregado que permanece recubierto de asfalto después de la inmersión estática. El método se enfoca en la falla del enlace de adhesión.
  Esta prueba requiere que una muestra de mezcla asfáltica sea sumergida en un frasco de 600 ml lleno de agua destilada, después de haber sido curado durante 2 hrs a 60 °C y enfriada a temperatura ambiente. Luego se debe tapar el recipiente y dejar reposando en un baño de agua a 25 °C durante 16 a 18 hrs. El grado de adherencia se mide visualmente mientras la mezcla está todavía en el recipiente.
- **Método de ebullición** [33]: Este método se encuentra estandarizado por la norma ASTM D-3625 (Efecto del agua sobre el agregado recubierto de asfalto usando agua hirviendo) y permite determinar la pérdida de la película asfáltica en los materiales pétreos, presentada como un porcentaje de cubrimiento del agregado después de hervir el agua.
  La prueba consiste en colocar una muestra de mezcla de asfalto suelta en agua hirviendo y luego agitar con una varilla de vidrio. Después de 10 min, la mezcla se deja enfriar mientras se separa el betún despojado. Posteriormente se debe sacar el agua de la mezcla y dejar secando en la habitación. Así permite observar el incremento o la falta de la adhesión al utilizar diversos tipos y dosis de aditivos químicos, así como el incremento de los agregados recubiertos con asfalto caliente no compacto, debido a la acción del agua en ebullición.
- **Método para determinar la adherencia pasiva de los ligantes anhidros en presencia de agua** [33]: Este método se encuentra estandarizado por la norma francesa XP 66 – 43 y se utiliza para determinar la adherencia pasiva del par ligante – agregado en presencia de agua. Dentro del procedimiento, el árido debe estar limpio y seco para ser mezclado con el ligante. Al final del periodo de inmersión, se evalúa visualmente determinando el porcentaje de agregado cubierto con el ligante.

De las pruebas de tipo cuantitativas, se tiene que este tipo de ensayos se realiza a muestras compactas en laboratorio o tomadas in situ en forma de núcleos o losas [40]. Los métodos que actualmente se establecen como pruebas estándar y son ampliamente utilizados según ASTM o AASHTO son:

- **Método inmersión-compresión** [33]: Por medio de este método se obtiene un valor promedio de la fuerza por compresión axial de los especímenes sujetos a condiciones secas y otro para los especímenes sujetos a condiciones húmedas, de igual manera se obtiene el índice de estabilidad retenida que se define como la relación de estas fuerzas de compresión. El método se encuentra estandarizado en las normas AASHTO T 165 [41]

y ASTM D 1075 [42] (Efecto del agua en la resistencia a la compresión de mezclas asfálticas).

- **Ensayo de Lottman** [33]: El ensayo determina una relación entre muestras acondicionadas con respecto a muestras sin acondicionar (Relación de la resistencia a la tracción, TSR) r incluye un ciclo de hielo-deshielo.

  El procedimiento consiste en obtener 9 muestras compactadas con martillo Marshall de 100 mm de diámetro y 63,5 mm de altura que se dividen en 3 grupos equitativos. El grupo 1 es el de control y las muestras se ensayan en seco. Las muestras del grupo 2 son saturadas al vacío a 660 mm de Hg con agua durante 30 min. Las muestras del grupo 3 son saturadas al vacío y sometidas a un ciclo de congelación a -18 °C durante 15 hrs, posteriormente se descongelan a 60 °C durante 24 hrs.

  Después del procedimiento se determina el Módulo resiliente (MR) y/o se realiza la prueba de Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS) a cada espécimen. La carga se aplica con una velocidad de carga de 0,065 pulg/min a 13 °C o de 0,150 pulg/min a 23 °C.
- **Acondicionamiento de Tunnicliff-Root** [33]: Este ensayo se encuentra estandarizado por la norma ASTM D 4867 [43]. El acondicionamiento fue propuesto por Tunnicliff por medio del proyecto NCHRP 274 (Root, 1984). Donde se especifica un TSR mínimo de 0,75. El uso de un ciclo de hilo-deshielo no es obligatorio. El aspecto más relevante de este ensayo es la saturación de las probetas, que demostraron que con una duración de tan sólo 24 hrs es suficiente para inducir daños relacionados con la humedad.
- **Método de tracción indirecta (TSR) o Ensayo de Lottman modificado** [33]: Este método se encuentra estandarizado por las normas AASHTO T 283 [3] y ASTM D 4867 [43]. Consiste en el acondicionamiento de seis especímenes, los cuales previamente han sido compactados hasta obtener un contenido de vacíos de aire en la mezcla (7 ± 0,5 % para AASHTO y 7 ± 1 % para ASTM). Los especímenes son divididos en dos subgrupos, de los cuales tres de ellos son sometidos a un acondicionamiento en seco y otros a un acondicionamiento húmedo, incluyendo ciclos de hielo-deshielo. Posteriormente los especímenes son sometidos a una tracción indirecta mediante la máquina del equipo Marshall obteniendo un promedio de la fuerza por unidad de área de cada uno de los subgrupos.

  El procedimiento combina características de los procedimientos Lottman y Tunnicliff-Root, donde el ensayo de Lottman intenta alcanzar un nivel de saturación del 100% en las muestras, mientras que el procedimiento de Tunnicliff-Root intenta controlar el nivel de saturación entre un 55-80%. Ante la preocupación de que la sobresaturación induce a daños en especímenes que no están asociados con el daño por humedad, sino con la sobresaturación de la muestra, es que se modifica el acondicionamiento de Lottman determinando que el grado de saturación para el ensayo TSR debe variar entre 60-80%.
- **Método de rueda cargada de Hamburgo** [33]: Este método fue desarrollado a principios de 1970 por Helmut-Wind de Hamburgo, Alemania. Originalmente su propósito principal era evaluar la resistencia a la deformación permanente en mezclas asfálticas en caliente y tras varios estudios se introdujo agua al ensayo y se comprueba que este elemento produce un daño más agresivo, observándose una pérdida de adherencia entre el CA y el agregado. Actualmente, el método se encuentra estandarizado por las normas AASHTO T 324 y UNE 12697-22. Donde los especímenes son sometidos a un equipo

compuesto por dos ruedas de acero que presentan un movimiento axial, desarrollando una carga en cada rueda de 705 ± 4,5 N para AASHTO y de 700 ± 10 N para UNE. Y son ensayados en agua (ambas normas) y seco (sólo UNE). Cuando existe un cambio de pendiente en el desarrollo de la prueba, el punto de inflexión indica el momento en el que la muestra presentará susceptibilidad al daño por humedad.

Los ensayos de desempeño han demostrado ser una alternativa eficiente para la evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas, ya que los resultados proporcionados se miden cuantitativamente y esto reduce la variabilidad en los resultados en comparación a las evaluaciones visuales. No obstante, estos tipos de ensayos son muy costosos y se requieren equipos de ensayo complejos. Para realizar los ensayos se requiere más tiempo y se requieren procedimientos de prueba más laboriosos.

Durante los años 1987 y 1993, el Programa de Investigación Estratégico de Carretera (SHRP: Strategic Highway Research Program) con recursos aportados por diferentes países como Estados Unidos, Canadá, México y algunos países de Europa, llevó a cabo varios proyectos de investigación, con el fin de mejorar y perfeccionar las especificaciones para mezclas asfálticas en caliente y de igual manera poder identificar las causas del daño por humedad en este tipo de asfaltos. De la investigación realizada, se concluyó que ninguno de los resultados experimentales obtenidos con los procedimientos de laboratorio desarrollados por el SHRP, proporcionó una predicción al daño por humedad más preciso que con el actual Método AASHTO T 283. Es por este motivo que, el método AASHTO T 283 fue incorporado para determinar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente [32]. No obstante, este método corresponde a un procedimiento empírico desarrollado para condiciones que difieren significativamente a las condiciones de campo, ya que, el protocolo de carga se basa en la aplicación de un esfuerzo estático: es un parámetro que no es posible asociar directamente con el diseño del pavimento para determinar si su desempeño en campo será aceptable. Por lo tanto, este criterio genera falsos positivos o negativos en la predicción del daño por humedad [40].

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología utilizada para el desarrollo experimental de la presente memoria de título, se basa en el siguiente diagrama de ensayos:

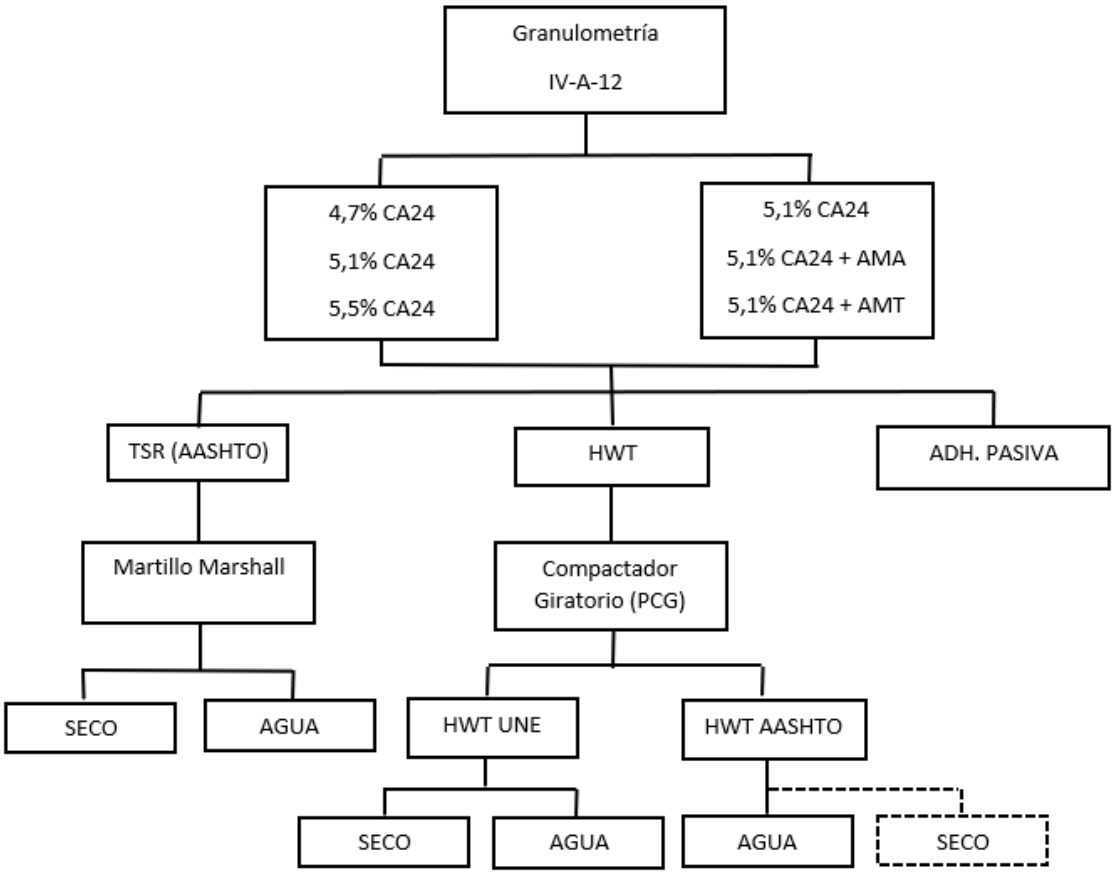


Figura 3-1. Diagrama de ensayos. Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- **CA-24**: Cemento asfáltico cuya viscosidad absoluta original a 60 °C y 300 mm de Hg, debe ser mayor o igual a 2400 poises.
- **CA-24 + AMA**: Cemento asfáltico modificado con Aditivo Mejorador de Adherencia.
- **CA-24 +AMT**: Cemento asfáltico modificado con Aditivo Mejorador de Trabajabilidad.
- **TSR**: Máquina de ensayo Tracción indirecta.
- **HWT**: Máquina de ensayo Rueda de Hamburgo.
- **ADH**. **PASIVA**: Ensayo de Adherencia Pasiva según norma XP 66-43.
- **HWT UNE**: Máquina de ensayo Rueda de Hamburgo aplicado a mezclas elaboradas según norma UNE 12697-22.
- **HWT AASHTO**: Máquina de ensayo Rueda de Hamburgo aplicado a mezclas elaboradas según norma AASHTO T324-14.
- **Agua, Seco**: Acondicionamiento de los ensayos, detallado en 3.1 y 3.2.

Como se observa en el diagrama de la Figura 3.1, a partir de un diseño de mezcla con granulometría IV A 12, las mezclas se subdividen en dos grupos de análisis. Por un lado, se tiene el grupo donde se varía el contenido de cemento asfaltico (4,7%; 5,1% y 5,5% de CA-24). Por otro lado, se tiene el grupo de mezcla en que se trabaja con el contenido óptimo de asfalto 5,1% CA-24, con aditivo mejorador de adherencia (5,1% CA-24 + AMA) y aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% CA-24 + AMT).

Dependiendo del ensayo a realizar, se determina el método de compactación de la mezcla. Luego, las probetas para ensayo de Tracción indirecta (TSR), son compactadas utilizando Martillo Marshall, mientras que las probetas para ensayo de Rueda de Hamburgo (HWT), son compactadas utilizando Compactador Giratorio Superpave (PCG). Para el ensayo de Adherencia Pasiva, no se requiere compactar la mezcla.

En el ensayo TSR, la mezcla se debe ensayar en dos ambientes, seco y agua. Para el ensayo HWT, se aplican dos normas distintas. Por un lado, se tiene el ensayo HWT según norma UNE 12697 22, donde desarrolla el ensayo en dos ambientes, seco y agua, mientras que para el ensayo HWT según norma AASHTO T 324-14, se debe desarrollar el ensayo solo en agua, pero para efectos de este estudio, se decide realizar ensayo en seco y así poder comparar los resultados entre ambas normas.

3.1. MEZCLAS ASFÁLTICAS Y SUS COMPONENTES

Los materiales utilizados para elaborar las probetas a ensayar los provee la empresa Bitumix. El árido es del Pozo de Confluencia, ubicado en la planta Bitumix Sur y el cemento asfáltico lo provee la empresa Probisa que junto Bitumix forman el Centro de Desarrollo e Investigación (CDI), lugar donde se llevan a cabo todos los ensayos.

3.1.1. Agregados pétreos o áridos

Los agregados utilizados para elaborar las probetas, provienen de la Planta de Bitumix Sur, que son extraídos del Pozo de Confluencia ubicado en Concepción, Chile. Los materiales que componen la mezcla son áridos tamizados en Gravilla ¾" (G. ¾"), Gravilla ½" (G. ½") y Polvo roca (PR). La granulometría y características de estos materiales se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 3-1. Granulometría de los materiales pétreos.

IDENTIFICACIÓN		**G. ¾"**	**G. ½"**	**PR**
TAMIZ		**PORCENTAJE QUE PASA EN PESO (%)**		
ASTM	**mm**			
1 ½"	37			
1"	25			
3 /4"	20	100		
5/8"	16	91		
9/16"	14	66		
1 /2"	12,5	36	100	
3/8"	10	5	83	
5/16"	8,0	2	54	
1 /4"	6,3	1	20	
N° 4	4,75	1	2	100
N° 8	2,36	1	1	67
N° 10	2,0			61
N° 16	1,18			45
N° 30	0,63			31
N° 50	0,315			22
N° 100	0,16			15
N° 200	0,08			11

Tabla 3-2. Características físicas e hídricas del árido proveniente del Pozo de Confluencia, Bitumix Sur.

IDENTIFICACION		G. ¾"	G. ½"	Polvo Roca	Mezcla
DENSIDAD NETA	(Kg/m3)	2,736	2,740	2,71	
ABSORCION DE AGUA	(%)	0,79	1,06	1,43	
DENSIDAD APARENTE SUELTA	(Kg/m3)	1,523	1,473	1,548	
PARTICULAS CHANCADAS	(%)	100	95	100	
INDICE DE LAJAS	(%)	6,82	9,86		
DESGASTE DE LOS ANGELES	(%)				16
PARTICULAS LAJEADAS	(%)				0
EQUIVALENTE DE ARENA	(%)				73

3.1.2. Cemento asfáltico o ligante

Para el desarrollo de la presente memoria de título se utilizan tres tipos de cemento asfáltico. Un CA-24 sin aditivos, CA-24 con aditivo mejorador de adherencia (CA-24 + AMA) y CA-24 con aditivo mejorador de trabajabilidad (CA-24 + AMT). Todos los ligantes los provee la empresa Probisa.

A continuación, se presentan las características físico-química para el ligante CA-24 sin aditivos entregado por Probisa en el Certificado de Análisis:

Tabla 3-3. Ensayo físico químico del ligante CA-24.

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación
Viscosidad a 60 °C	Poises	2994	Mín. 2400
Ductilidad a 25 °C, 5cm./min., cm.	Cm	>100	Mín. 100
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	0,1 mm	60	Mín. 40
Ensayo de la mancha, 30% Xilol	-	Negativo	Máx. 30
Solubilidad en Tricloroetileno	%	>99	Mín. 99
Punto de ablandamiento	°C	49,6	Informar
Punto de inflamación	°C	318	Mín. 232
Punto de penetración	°C	-0,9	Mín. -2,0 Máx. +1,0
Pérdida por Calentamiento	%	0,01	Máx. 0,8
Viscosidad a 60 °C	Poises	6493	Informar
Ductilidad a 25 °C, 5 cm./min., cm.	Cm	>100	Mín. 100
Índice de Durabilidad	-	2,2	Máx. 4,0
Temperatura de compactación	°C	143 ± 5	Informar
Temperatura de Mezclado	°C	153 ± 5	Informar
Densidad	Kg/m3	1035	Informar

Para los ligantes CA-24 con aditivos (CA-24 + AMA y CA-24 + AMT), se adjuntan las características físico-químicas en el Anexo del presente informe (ver punto 7-1).

3.1.3. Diseño de la mezcla asfáltica

La mezcla de áridos debe ser aquella que permita trabajar con una granulometría que cumpla con la especificación para una banda IV-A-12, los porcentajes de las muestras de áridos, la granulometría de la mezcla y la banda especificada se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 3-4. Granulometría de la mezcla de áridos utilizados en confección probetas.

		G. ¾”	**G. ½”**	**PR**	
DOSIFICACION		**26%**	**26%**	**48%**	
GRANULOMETRÍA DE MEZCLA DE ÁRIDOS					
TAMIZ		**PORCENTAJE QUE PASA EN PESO (%)**		**ESPECIFICACION IV-A-12**	
ASTM	**mm**			**Mín.**	**Máx.**
3 /4”	19	100		100	100
1 /2”	12,5	84		80	95
3 /8”	9,5	71		70	85
N° 4	4,75	46		43	58
N° 8	2,36	32		28	42
N° 30	0,6	16		13	24
N° 50	0,3	11		8	17
N° 100	0,15	8		6	12
N° 200	0,075	5		4	8

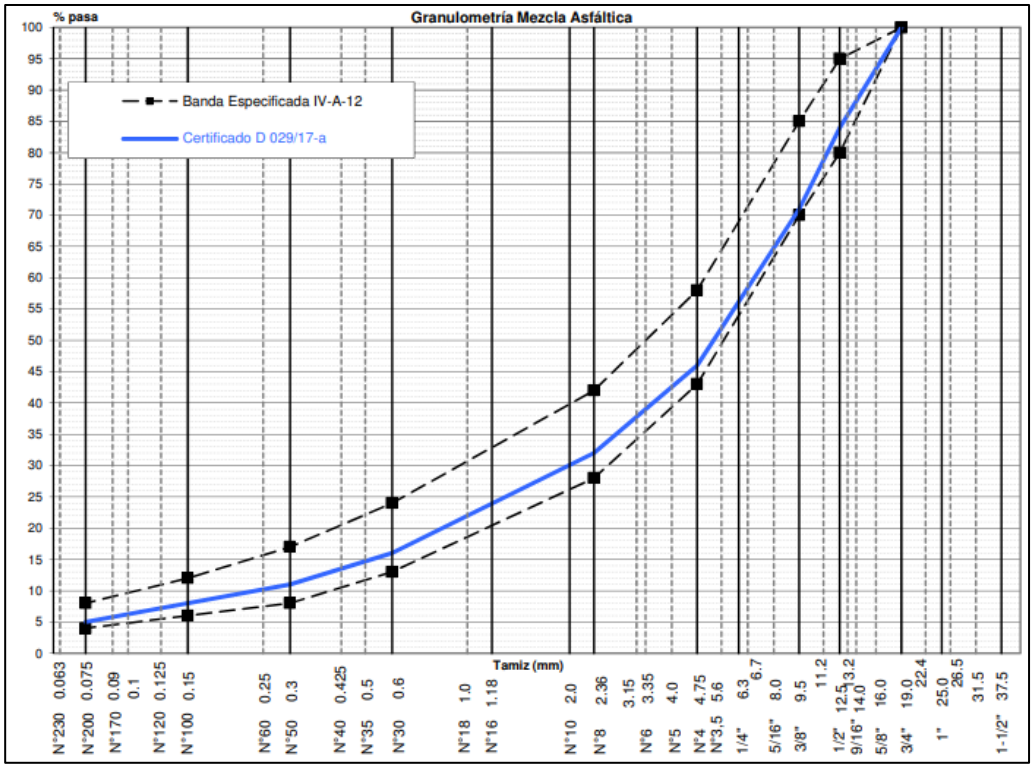


Gráfico 3-1. Banda granulométrica de áridos usados para la confección de probetas.

Cabe destacar que el diseño de la mezcla lo provee CDI y corresponde a una carpeta de 20 mm, que se ejecutó en “Diferentes obras MOP” ubicadas en las provincias de Concepción, Arauco y Ñuble, en la Región del Bio Bio.

Las características de la mezcla y el diseño de ésta se adjuntan en el Anexo de la presente memoria de título (ver punto 7.2.).

3.2. CONFECCIÓN DE PROBETAS

Para elaborar las probetas finales que serán utilizadas en cada ensayo, resulta necesario preparar el material. Para esto, el árido es sometido a una serie de procedimientos estándar que se describen a continuación:

3.2.1. Secado del árido

El árido necesario para elaborar las probetas a ensayar debe ser secado en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C durante 8 horas mínimo o hasta lograr masa constante, es decir, el peso del material en el horno no debe variar más de un 0,1 % con respecto a la masa menor registrada, en un lapsus de 1 hora.

3.2.2. Tamizado o corte del áridos

Se debe tamizar el material seco, para posteriormente preparar las bandejas de áridos, según el diseño de la mezcla, que son utilizados para elaborar las probetas a ensayar. El árido es acopiado de acuerdo a su diámetro nominal de la siguiente manera:

- Gravilla 3 /4”: Tamizar material en mallas 3 /4” (19 mm), 1 /2” (12,5 mm), 3/8” (9,5 mm) y N° 4 (4,75 mm).
- Gravilla 1 /2”: Tamizar material en mallas 1 /2”, 3/8”, Nº 4 y Nº 8 (2,36 mm).
- Polvo Roca: Tamizar material en mallas 3/8”, Nº 4, Nº 8 y < Nº 8.

Se debe tener cuidado y evitar que el material se humedezca, ya que, éste debe estar completamente seco para elaborar las probetas.

3.2.3. Preparación de bandejas

Dependiendo del método de compactación utilizado, se preparan bandejas. Para las probetas compactadas con martillo Marshall, se deben elaborar bandejas de 1100 g, mientras que para probetas compactadas con compactador giratorio superpave (PCG), se deben elaborar bandejas de 4900 g de acuerdo al diseño de la mezcla.

Una vez que se determina la masa total del árido requerido para la fabricación de las probetas, se calcula las masas correspondientes a cada fracción de áridos, para luego pesar sucesivamente en un recipiente tarado las cantidades de cada fracción necesarias para elaborar una probeta. Ver en ANEXO el punto 7.3.

3.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS

3.3.1. Ensayo Rueda de Hamburgo

Para desarrollar la presente memoria de título, se utilizan dos normas diferentes para el mismo ensayo. Según norma europea UNE 12697-22 [4] y según norma estadounidense AASHTO T324-14 [2].

El ensayo de rueda de Hamburgo permite evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño por humedad en mezclas asfálticas en caliente, usando especímenes sumergidos bajo la acción de una rueda oscilante en el equipo Rueda de Hamburgo. Las probetas se elaboran en laboratorio, con dimensiones aproximadas de 150 ± 2 mm de diámetro y 62 ± 2 mm de altura, que puedan resistir las condiciones de ensayo sin sufrir distorsión. Para realizar el ensayo se necesitan 4 cilindros de mezcla asfáltica, dos para condición secas y dos para condición de humedad.

A continuación, se adjunta la siguiente tabla resumen:

Tabla 3-5. Comparación entre normas para ensayo Rueda de Hamburgo.

Característica	**AASHTO T 324-14 [2]**	**UNE 12697-22 [4]**
Envejecimiento de la mezcla	4 h ± 5 min. a 135 ± 3 °C	N/A
Requisitos probetas	Contenido de Vacíos, 7 ± 1 %	1° La densidad aparente de las dos probetas no se debe desviar más del 1% de la densidad aparente media. 2° Las 4 mediciones de altura no deben diferir más de un 5% del espesor nominal (60 mm).
Medio de acondicionamiento	En Agua*	En Agua y Aire
Acondicionamiento ensayo	En **agua** a 50 ± 1 °C durante 30 a 60 ± 5 minutos máximo.	En **agua**: 50 ± 1 °C durante 1 h mín. En **aire**: 60 ± 1 °C durante 4 h mín.
Fin del ensayo	Lo que ocurra primero: 1° A las 20000 pasadas. 2° Ahuellamiento ≤ 20 mm.	Procedimiento B 1° A las 20000 pasadas. 2° Ahuellamiento ≤ 20 mm.
Método de compactación	Compactador giratorio (PCG)	Compactador giratorio (PCG)

[*] Con la finalidad de comparar los mismos parámetros entre ambas normas, se decide realizar el ensayo en aire para norma AASHTO T324-14.

Una vez confeccionadas las bandejas que contienen los áridos de acuerdo a las proporciones del diseño de la mezcla y cuya masa es de 4900 g para este ensayo, se debe seguir con los siguientes procedimientos para obtener las probetas a ensayar.

3.3.1.1. *Procedimiento HWT según norma UNE 12697-22*

El procedimiento de **mezclado** que se debe seguir para obtener las probetas a ensayar se encuentra estandarizado por la norma UNE 12697-35 [44]. Este procedimiento se resume en la siguiente secuencia:

1. Acondicionar el árido a temperatura de mezclado ± 5 °C, durante un tiempo de 8 hrs mínimo. El ligante se debe acondicionar a la temperatura de mezclado ± 5 °C, durante un periodo de tiempo comprendido entre 3 y 5 hrs.
2. Mezclar el árido con el ligante en la cubeta del mezclador previamente acondicionado a la temperatura de mezclado ± 5 °C durante 5 minutos.

El procedimiento de **compactación** que se debe seguir para obtener las probetas a ensayar se encuentra estandarizado por la norma UNE 12697-31 [45]. Este procedimiento se resume en la siguiente secuencia:

3. Acondicionar moldes y placas durante mín. 2 hrs en horno con ventilación a temperatura de compactación ± 10 °C.
4. Introducir la mezcla en el molde con ayuda de un embudo y verificar que la masa de la mezcla tenga una precisión del 0,1% con respecto a la masa de las probetas (entre 4895 y 4905 g).
5. Compactar la mezcla en compactador giratorio superpave (PCG).
6. Enfriar la probeta a temperatura ambiente.
7. Cortar probetas por la mitad, así se obtienen dos cilindros de 150 ± 3 mm de diámetro y 60 ± 3 mm de altura.
8. Calcular la densidad de las probetas según norma UNE 12697-6 [46] y verificar que cumplan con los requisitos resumidos en la Tabla 3-1.

El procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo, obedece a la siguiente secuencia:

9. Para **ensayo en aire**: Acondicionar las probetas a temperatura del ensayo (60 ± 1 °C) durante 4 hrs mín. y 24 hrs máx.
   Para **ensayo en agua**: Acondicionar las probetas introduciéndolas en agua que esté a la temperatura del ensayo (50 ± 1 °C) durante 1 h mín.
10. Poner la máquina en movimiento y tomar las lecturas del desplazamiento vertical de las ruedas.
11. Continuar hasta que se apliquen 20.000 pasadas o hasta que la profundidad de la rodadera (deformación) sea de 20 mm, lo que ocurra antes.

Los **cálculos** que se obtienen del ensayo son:

- Pendiente de deformación de la rodada en aire y/o agua: La pendiente de deformación en pista, en mm para 10.000 ciclos de carga (20.000 pasadas), se calcula mediante la fórmula:

$$WTS_{AIRE,AGUA} = \frac{(d_{10.000} - d_{5.000})}{5}$$

*Ecuación 3-1. Pendiente de deformación para ensayo de rodadera en **aire** y/o **agua***

Donde:

$WTS_{AIRE,AGUA}$: Inclinación de la rodada, en mm para 10.000 ciclos de carga.

$d_{5.000}$, $d_{10.000}$: Profundidad de la rodera después de 5.000 ciclos de carga y de 10.000 ciclos de carga, en mm.

Nota para ambos casos (aire y agua): Si el ensayo termina antes de llegar a 10.000 ciclos de carga, la pendiente de deformación en pista se debe calcular sobre la parte lineal de la curva representativa de la profundidad del surco, a condición de que la curva corresponda a 2.000 ciclos de carga como mínimo.

- Profundidad media de la rodera, $RD_{AIRE,AGUA}$: La profundidad media de la rodera en aire o agua, para las probetas sometidas a ensayo, en N ciclos, es el valor medio de los valores de la profundidad de la rodera de dos (o más) probetas, con una tolerancia de ± 0,1 mm.

3.3.1.2. *Procedimiento HWT según AASHTO T 324-14*

El procedimiento de **mezclado** que se debe seguir para obtener las probetas a ensayar se encuentra estandarizado por la norma AASHTO T 312-15 [47]. Este procedimiento se resume en la siguiente secuencia:

1. Acondicionar el agregado y el ligante en un horno a temperatura de mezclado (el ligante alcanza una viscosidad de 170 ± 20 cSt o 0,17 ± 0,02 Pa`s).
2. Mezclar el árido y el ligante lo más rápido y minuciosamente posible hasta obtener una mezcla asfáltica homogénea.

Una vez preparada la mezcla, se debe **acondicionar** de acuerdo a la norma AASHTO Designation: R 30-02 (2015) [48].

3. Acondicionar la mezcla a corto plazo para evaluar propiedades mecánicas de ésta (simula el mezclado en planta y la fase de pre-compactación en el proceso constructivo). Para esto, se debe acondicionar la mezcla durante 4 hrs ± 5 min a una temperatura de 135 ± 3 °C y procurar revolverla cada 60 ± 5 min hasta completar el tiempo de acondicionamiento.
4. Una vez acondicionada la mezcla, comienza el proceso de **compactación**. Se debe precalentar los moldes y placas a la temperatura de compactación (ligante alcanza una viscosidad de 280 ± 30 cSt o 0,28 ± 0.03 Pa`s) durante 30 minutos. La mezcla se debe calentar a la temperatura de compactación máx. 30 minutos para alcanzar la temperatura requerida.
5. Introducir la mezcla en el molde, nivelar la mezcla y posicionar el molde en el compactador giratorio.
6. Compactar la mezcla en el compactador giratorio superpave, según norma AASHTO T312-15 y determinar el número de giros según AASHTO Designation: R 35-15 [49]
7. Desmoldar los especímenes y enfriar a temperatura ambiente.
8. Cortar probetas por la mitad, así se obtienen dos cilindros de 150 ± 2 mm de diámetro y 62 ± 2 mm de altura. Según AASHTO T 312-15, el espesor del espécimen debe ser al menos el doble del tamaño máximo nominal del agregado, por lo general varía entre 38 – 100 mm.

9. Determinar la densidad aparente (Gmb) de las probetas según norma AASHTO T 166-13 [50], la gravedad específica máxima de la mezcla según norma AASHTO T 209-12 [17] y el contenido de vacíos de aire según norma AASHTO T 269-14 [51], para verificar que las probetas cumplen con el requisito para ser ensayadas (contenido de vacíos de aire 7 ± 1%).
10. Para **ensayo en aire**, se toma como referencia lo realizado según norma UNE 12697-22, es decir, acondicionar las probetas a temperatura del ensayo (60 ± 1 °C) durante 4 hrs mín. y 24 hrs máx.
    Para **ensayo en agua**: Acondicionar las probetas introduciéndolas en agua que esté a la temperatura del ensayo (50 ± 1 °C) durante 30 a 60 ± 5 minutos máximo antes de comenzar la prueba.
11. Seleccionar el botón de "Inicio" del software del dispositivo de prueba, para comenzar a registrar las deformaciones.
12. El ensayo continúa hasta alcanzar las 20.000 pasadas de la rueda cargada o hasta lograr una profundidad de 20 mm.

Los **cálculos** que se obtienen del ensayo son:

- Graficar la profundidad de la huella (mm) en función del número de pasadas para cada mezcla, del cual se obtiene un gráfico típico del ensayo de rueda de Hamburgo.

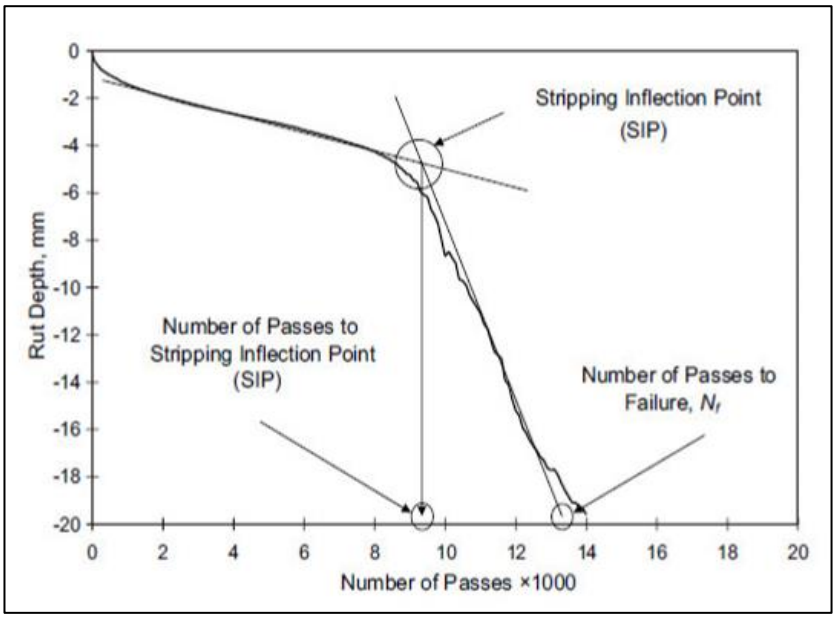


Gráfico 3-2. Curva característica de ensayo de Rueda de Hamburgo.

- Calcular la pendiente y la intersección del primer y segundo estado estacionario (donde la curva es "lineal"), para determinar el punto de inflexión stripping (SIP), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$SIP = \frac{Intersección\ (segunda\ parte) - Intersección\ (primera\ parte)}{Pendiente\ (primera\ parte) - Pendiente\ (segunda\ parte)}$$

Ecuación 3-2. Fórmula para determinar el punto de inflexión stripping (SIP)

El resultado del SIP corresponde al número de pasadas en que la probeta ensayada comienza a sufrir stripping, es decir, comienza el fallo por pérdida de adherencia entre el ligante y el árido.

Cabe recordar que la ecuación de la recta está definida de la siguiente forma:

$$y = m * x + c$$

Ecuación 3-3. Ecuación de la recta.

Donde: y es la variable dependiente; m es la pendiente de la recta; x es la variable independiente y c es la intersección de la recta.

3.3.2. Procedimiento para el ensayo de Tracción Indirecta (TSR)

Para desarrollar la presente memoria de título, se realiza el ensayo de Tracción Indirecta (TSR) según norma estadounidense AASHTO T283-14 que describe el “Método estándar de ensayo para la resistencia de mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad”.

Para llevar a cabo el ensayo, se requieren seis (6) especímenes por cada tipo de ligante. Las probetas son elaboradas en laboratorio y compactadas por impacto utilizando el Martillo Marshall. Las dimensiones deben ser de 100 mm de diámetro por 63,5 ± 2,5 mm de espesor y deben contener un porcentaje de vacíos de aire de 7 ± 0,5%.

El ensayo TSR permite identificar si una mezcla es susceptible a sufrir daños producto de la humedad y mide la efectividad de los aditivos anti-stripping o mejorador de adherencia.

Una vez confeccionadas las bandejas (6) que contienen los áridos de acuerdo a las proporciones del diseño de la mezcla y cuya masa total es de 1100 g, se debe seguir con los siguientes procedimientos para obtener las probetas a ensayar.

1. Mezclar el árido con el ligante a temperatura de mezclado.
2. Colocar la mezcla en un recipiente de dimensiones 48.400 – 129.000 mm2 de área en el fondo por 25 mm de profundidad y enfriar a temperatura ambiente durante 2 ± 0,5 hrs.
3. Colocar la mezcla en horno con circulación de aire a 60 ± 3 °C, durante 16 ± 1 hora para curar la mezcla.
4. Colocar la mezcla en horno por 2 hrs ± 10 minutos a temperatura de compactación ±.3 °C.
5. Compactar de acuerdo a la norma AASHTO T245-15.
6. Almacenar la probeta durante 24 ± 3 hrs a temperatura ambiente.
7. Determinar la Gravedad específica máxima teórica (Gmm), según norma AASHTO T209
8. Determinar el espesor (t) y el diámetro (D) de cada espécimen, según norma ASTM D 3549.
9. Determinar la gravedad específica en masa (Gmb), según norma AASHTO T166-13 y determinar el volumen (E) de los especímenes.
10. Calcular el contenido de vacíos de aire (7 ± 0,5%), de acuerdo a la norma AASHTO T269-14.
11. Separar especímenes en dos subconjuntos igualando la cantidad de vacíos entre estos grupos de probetas. Un grupo (3) será ensayado en seco y el otro grupo (3) debe ser acondicionado en agua junto al ciclo de hielo-deshielo.
12. Ensayo en aire
    a. Luego del almacenamiento durante 24 ± 3 hrs a temperatura ambiente, envolver las probetas con una película de plástico tipo aluza.
    b. Acondicionar probetas a 25 ± 0,5 °C durante 2 horas ± 10 min.
    c. Medir espesor (t) de cada espécimen.
13. Ensayo en agua
    a. Luego del almacenamiento durante 24 ± 3 hrs a temperatura ambiente, se deben saturar las probetas (70 a 80 % de saturación) en una bomba de vacío con una presión absoluta que varía entre los 13 a 67 kPa (98 a 502 mm de Hg) durante 5 a 10 minutos.

b. Determinar la masa saturada superficialmente seca después de la saturación (B'), según norma AASHTO T166-13, método A.
c. Calcular volumen de agua absorbida (J´), después del proceso de saturación según la siguiente ecuación:

$$J' = B' - A$$

Ecuación 3-4. Volumen de agua absorbido por la muestra.

Donde: J´ (Volumen de agua absorbida, cm3); B´ (masa saturada superficialmente seca de la muestra, g) y A (Masa de la muestra seca en aire, g).

d. Calcular el grado de saturación (S´) según la siguiente fórmula:

$$S' = \frac{100 * J'}{Va}$$

Ecuación 3-5. Grado de saturación de las probetas.

Donde: S´ (grado de saturación, %); J´ (volumen de agua absorbida, cm3) y Va (vacíos de aire, %).

e. Envolver las probetas con una película de plástico tipo aluza, introducirla en una bolsa hermética y agregar 10 ± 0,5 ml de agua. Sellar la bolsa y meterla en un congelador a -18 ± 3 °C durante 16 hrs mínimo.
f. Sacar las probetas del congelador, retirar todos los plásticos y colocarlas en un baño de agua a 60 ± 1 °C durante 24 ± 1 horas.
g. Colocar las probetas en un baño de agua a 25 ± 0,5 °C durante 2 hrs ± 10 minutos. Procurar mantener la temperatura, si es necesario incorporar hielo para enfriar el agua.
h. Determinar las propiedades volumétricas de la probeta. Medir altura, diámetro y volumen).

14. Determinar Resistencia a la Tracción Indirecta aplicando la carga a lo largo del diámetro a razón de 50 mm/min de cada espécimen.
15. Estimar visualmente el grado aproximado de daño causado, en escala de 0 a 5.

Los **cálculos** que se obtienen de los ensayos son:

- Calcular la resistencia media a la tracción indirecta de la siguiente manera:

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

Ecuación 3-6. Resistencia media a la tracción indirecta.

Donde: S_t (Resistencia a la tracción, kPa); P (Carga máxima, N); t (Espesor del espécimen, mm) y D (Diámetro de la muestra, mm).

- Calcular la resistencia a la tracción indirecta, a dos decimales:

$$Tensile\ Strength\ Ratio\ (TSR) = \frac{S_2}{S_1}$$

Ecuación 3-7. Resistencia a la tracción indirecta (TSR)

Donde: S_1 (Resistencia media a la tracción del subconjunto seco, kPa) y S_2 (Resistencia media a la tracción del subconjunto acondicionado en agua, kPa).

3.3.3. Procedimiento para el ensayo Adherencia Pasiva

En la presente memoria de título, se realiza el ensayo de adherencia pasiva o también conocido como ensayo de adherencia por método francés, según la norma XP T66-43 donde se describe el “Método para determinar la adherencia pasiva de los ligantes anhidros en presencia de agua”.

El método establece el procedimiento para determinar la adherencia pasiva del par ligante-agregado en presencia de agua y se aplica a todos los ligantes anhidros y áridos, cuya fracción retenida se encuentre entre los tamices 3/8” – 1/4” (9,5 – 6,3 mm).

El procedimiento que se debe seguir para desarrollar el ensayo, corresponde al Método 1, el cual se describe a continuación:

1. Tamizar el árido y separar el material que queda retenido entre los tamices 3/8” y 1/4”.
2. Limpiar el árido con agua desmineralizada y secar a una temperatura de 105 °C durante 12 hrs mínimo. Pesar 100 ± 5 g de árido para el ensayo.
3. Pesar 5 ± 0,5 g de cemento asfáltico y preparar el ligante según la norma NF EN 12594, donde se establece que el ligante se debe calentar en un recipiente cerrado durante 3 hrs máximo a una temperatura de 140 ± 5 °C.
4. Mezclar el ligante y el árido en un recipiente caliente durante 60 segundos máximo o hasta que el ligante recubra totalmente el árido.
5. Introducir la mezcla en un vaso de vidrio y dejar descansar durante 30 ± 5 minutos a temperatura ambiente.
6. Cubrir la muestra con 300 ml de agua desmineralizada a una temperatura de 60 ± 5 °C.
7. Colocar el recipiente en un horno a una temperatura de 60 ± 5 °C durante 16 ± 0,5 hrs.
8. Observar y evaluar el porcentaje de superficie del agregado cubierto con ligante, donde un 100 % significa que toda la superficie del árido está cubierta y un 0 % significa que el ligante está separado del árido.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos realizados, en el cual se adjuntan tablas, gráficos y su respectivo análisis, según corresponda. Posteriormente se correlacionan los resultados, para obtener conclusiones generales del estudio.

4.1. ENSAYO DE DEFORMACIÓN EN RUEDA DE CARGA HAMBURGO (HWT)

Para desarrollar el ensayo de Rueda de Hamburgo, se utilizan dos normas (UNE y AASHTO). La principal diferencia entre estas normas es que, para norma AASHTO la mezcla **es** envejecida previo a ser compactada y en norma UNE, la mezcla **no** es envejecida.

Según norma UNE 12697-22, los cálculos exigidos son:

- Pendiente de deformación de la rodada (WTS en agua y seco).
- Profundidad media de la rodera en N ciclos de carga (RD en agua y seco).

Según norma AASHTO 324-14, los cálculos exigidos son:

- Graficar la profundidad de la huella (deformación) v/s número de pasadas.
- Determinar el punto de inflexión stripping (SIP).

Del gráfico de Deformación v/s el Nº de pasadas, la pendiente de fluencia (pendiente de la curva previo al SIP) es un indicador de la susceptibilidad de la mezcla al ahuellamiento y la pendiente de pérdida de adherencia (pendiente de la curva posterior al SIP) es un indicador del grado de severidad del daño por humedad en las mezclas asfálticas. Por lo tanto, se agregan estos cálculos a las mezclas estudiadas.

- Pendiente de fluencia.
- Pendiente de pérdida de adherencia.

Con la finalidad de analizar a cabalidad los resultados obtenidos en el ensayo de Rueda de Hamburgo, es que se decide realizar todos los cálculos exigidos por ambas normas en todos los casos.

4.1.1. Resultados ensayo HWT según norma UNE 12697-22

Como se muestra en el Diagrama de ensayos (Figura 3-1. Diagrama de ensayos. Fuente: Elaboración propia.), las mezclas se subdividen en dos grupos. Por un lado, se analizan las probetas elaborados con diferente contenido de asfalto (4,7; 5,1 y 5,5 % de CA-24) y, por otro lado, se analizan las probetas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto con y sin aditivos (5,1 % de CA-24; 5,1 % de CA- 24 + AMA y 5,1 % de CA-24 + AMT).

4.1.1.1. *Probetas con diferente contenido de asfalto (4,7; 5,1 y 5,5% de CA-24).*

A continuación, se realiza un resumen de algunas propiedades físicas de las probetas ensayadas y se verifica el cumplimiento de las restricciones (Tabla 3-5. Comparación entre normas para ensayo Rueda de Hamburgo.) según norma UNE 12697-22

Tabla 4-1. Verificación de cumplimiento de requisitos para probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma UNE 12697-22.

Norma UNE	4,7% CA-24				5,1% CA-24				5,5% CA-24			
	Seco		Agua		Seco		Agua		Seco		Agua	
# Probeta	2595	2596	2562	2594	2519	2534	2607	2608	2600	2609	2598	2601
% Vacíos	6,5	6,7	7,8	6,2	6,7	5,7	6,8	6,5	7,2	7,1	6,9	7,5
% Comp. Ref. Marshall	99,6	99,4	98,2	99,9	98,8	99,9	98,7	99,0	97,0	97,1	97,4	97,0
Densidad (Kg/m3)	2328	2323	2297	2336	2328	2353	2325	2332	2287	2289	2296	2280
Promedio densidades	2326		2317		2341		2329		2288		2288	
Promedio alturas (mm)	61,4	61,4	61,3	61,6	61,7	60,1	61,4	61,5	62,5	62,8	62,0	62,8
Cumple condiciones	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

- Pendiente de deformación promedio de las probetas (WTS)

Se calculan las pendientes de deformación promedio de las probetas entre los 1.000 y 2.000 ciclos de carga, entre los 2.500 y 5.000 ciclos de carga y entre los 5.000 y 10.000 ciclos de carga. Se debe considerar que 1 ciclo de carga corresponde a 2 pasadas de la rueda sobre la probeta (ida y vuelta).

Tabla 4-2. Resultados obtenidos para WTS de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto.

	Medio ensayo	**Seco**			**Agua**		
	Contenido CA-24	**4,7**	**5,1**	**5,5**	**4,7**	**5,1**	**5,5**
Pendiente de deformación (WTS)	WTS (d2.000 - d1.000) /1	2,24	2,15	2,92	1,69	1,79	2,92
	WTS (d5.000 - d2.500) /2,5	1,06	0,93	1,16	4,10	2,34	N/A
	WTS (d10.000 - d5.000) /5	0,41	0,53	0,62	N/A	N/A	N/A

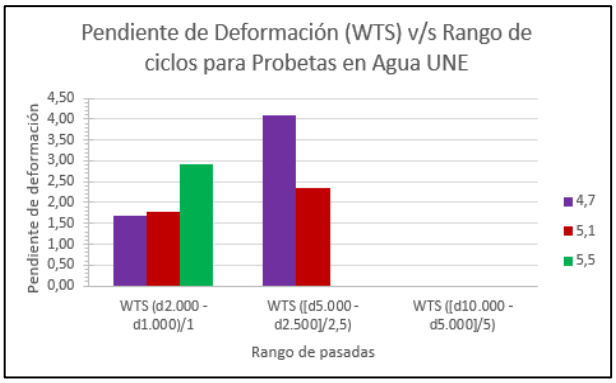


*Gráfico 4-1. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas **en agua**, norma UNE 12697-22.*

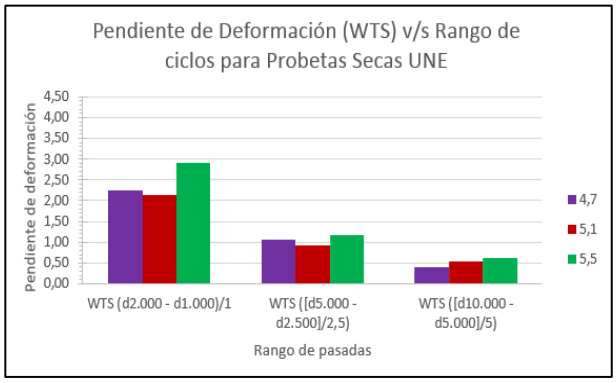


*Gráfico 4-2. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas en **seco**, norma UNE 12697-22*

- Profundidad media de la rodera (RD) en N ciclos de carga

Se calcula la profundidad media de la rodera o deformación promedio (RD) de las probetas ensayadas a los 5.000 y 10.000 ciclos de carga.

Tabla 4-3. Resultados obtenidos para RD de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, UNE 12697-22.

	Medio ensayo	Seco						Agua					
	Contenido CA-24	4,7%		5,1%		5,5%		4,7%		5,1%		5,5%	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Deformación promedio (RD)	RD (5.000 ciclos)	11,82	19,26	10,97	17,82	16,12	25,51	17,52	28,53	13,63	22,19	N/A	-
	RD (10.000 ciclos)	14,93	24,32	13,62	22,14	19,36	30,63	N/A	-	N/A	-	N/A	-

- Gráfico profundidad de la huella o deformación v/s número de pasadas:

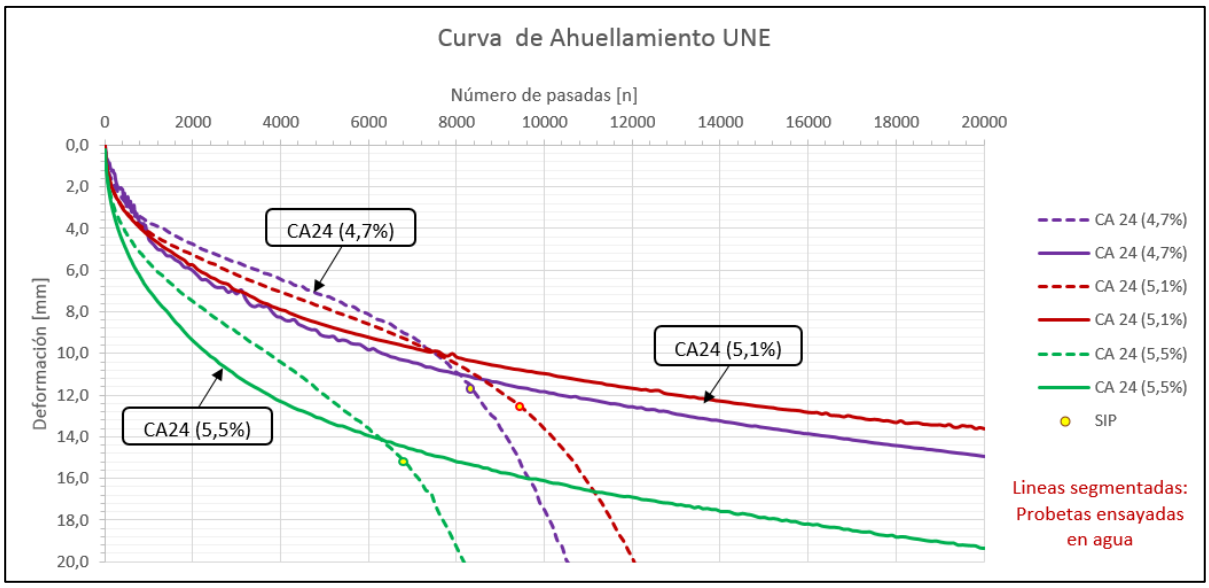


Gráfico 4-3. Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT en seco y en agua para probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, según norma UNE 12697-22.

En el Gráfico 4-3, se muestran las deformaciones registradas al someter las probetas a ensayo de Rueda de Hamburgo en un ambiente seco y en agua. Las líneas segmentadas corresponden a probetas ensayadas en agua, mientras que las líneas continuas corresponden a probetas ensayadas en seco. También, se tiene que las líneas de color morado, rojo y verde representan las probetas con contenido de asfalto 4,7%; 5.1% y 5,5% de CA-24, respectivamente. El punto amarillo corresponde al Punto de Inflexión Stripping (SIP).

Ver ANEXO, punto 7-4 para observar un ejemplo detallado del informe entregado por el software y la máquina del ensayo Rueda de Hamburgo.

- Punto de Inflexión Stripping (SIP)

De lo observado en el Gráfico 4-3, se tiene que solo las probetas ensayadas en agua presentan punto de inflexión stripping (SIP).

El SIP queda determinado por la Ecuación 3-2. Fórmula para determinar el punto de inflexión stripping (SIP). Para desarrollar dicha ecuación, se debe determinar la ecuación de la recta (Ecuación 3-3. Ecuación de la recta.) en los estados estacionarios (donde la curva es "lineal") como se observa en el Gráfico 3-2. Curva característica de ensayo de Rueda de Hamburgo**.**

Luego, utilizando el software Excel se tienen las siguientes ecuaciones de los estados estacionarios en cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 4-4. Ecuaciones de estados estacionarios en probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, según norma UNE 12697-22.

Norma UNE 12697-22		
Ligante CA-24	**Ecc. 1º Estado estacionario**	**Ecc. 2º Estado estacionario**
4,7%	$y = 0{,}0009 * x + 3{,}0018$	$y = 0{,}0042 * x - 22{,}849$
5,1%	$y = 0{,}0008 * x + 3{,}5671$	$y = 0{,}0032 * x - 19{,}145$
5,5%	$y = 0{,}0015 * x + 4{,}3907$	$y = 0{,}0044 * x - 15{,}412$

Donde y corresponde a la profundidad de la huella (mm) en x cantidad de pasadas.

Al desarrollar la Ecuación 3-2. con los datos obtenidos en de la Tabla 4-4, se tiene que los valores del SIP son:

Tabla 4-5. Resultados obtenidos para SIP de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, ensayadas en agua.

Ligante CA-24	**SIP (pasadas)**	**Def. en SIP (mm)**
4,7%	8.339	10,51
5,1%	9.463	11,14
5,5%	6.829	14,63

En las probetas secas, se observan las siguientes deformaciones al finalizar el ensayo:

*Tabla 4-6. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, al finalizar el ensayo en **seco**.*

Ligante CA-24	**Nº Pasadas**	**Def. a las 20.000 pasadas (mm)**
4,7%	20.000	14,93
5,1%	20.000	13,62
5,5%	20.000	19,36

- Pendiente de Fluencia

Las pendientes de fluencia o “creep slope” (previo al SIP) obtenidas del Gráfico 4-3, se registran en la siguiente Tabla:

Tabla 4-7. Pendiente de fluencia de mezclas elaboradas con diferente contenido de asfalto, norma UNE 12697-22.

% CA-24	Pendiente de Fluencia	
	Probetas secas	Probetas agua
4.7	0,0004	0,0009
5,1	0,0004	0,0008
5,5	0,0005	0,0015

- Pendiente de Pérdida de Adherencia

Las pendientes de pérdida de adherencia o “stripping slope” (posterior al SIP) obtenidas del Gráfico 4-3 se registran en la siguiente Tabla:

Tabla 4-8. Pendientes de pérdida de adherencia de mezclas con diferente contenido de asfalto, UNE 12697-22

% CA-24	Pendiente Pérdida de Adherencia
4.7	0,0042
5,1	0,0032
5,5	0,0044

4.1.1.2. *Probetas elaboradas con 5,1% CA-24; 5,1% CA-24 + AMA; 5,1% + AMT.*

A continuación, se realiza un resumen de algunas propiedades físicas de las probetas ensayadas y se verifica el cumplimiento de las restricciones (Tabla 3-5. Comparación entre normas para ensayo Rueda de Hamburgo.) según norma UNE 12697-22

Tabla 4-9. Verificación de cumplimiento de requisitos para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma UNE 12697-22.

Norma UNE	**5,1% CA-24**				**5,1% CA-24 + AMA**				**5,1% CA-24 + AMT**			
	Seco		Agua		Seco		Agua		Seco		Agua	
# Probeta	2519	2534	2607	2608	2520	2521	2537	2611	2522	2523	2532	2533
% Vacíos	6,7	5,7	6,8	6,5	5,7	5,8	6,9	6,9	5,7	7,0	6,9	6,2
% Comp. Ref. Marshall	98,8	99,9	98,7	99,0	99,7	99,6	98,5	98,5	100	98,4	98,5	99,3
Densidad (Kg/m3)	2328	2353	2325	2332	2350	2348	2321	2322	2356	2318	2322	2339
Promedio densidades	2341		2329		2349		2322		2337		2331	
Promedio alturas (mm)	61,7	60,1	61,4	61,5	60,6	61,1	61,1	61,1	61,1	62,0	62,2	61,9
Cumple condiciones	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

- Pendiente de deformación promedio de las probetas (WTS)

Se calculan las pendientes de deformación promedio de las probetas entre los 1.000 y 2.000 ciclos de carga, entre los 2.500 y 5.000 ciclos de carga y entre los 5.000 y 10.000 ciclos de carga. Se debe considerar que 1 ciclo de carga corresponde a 2 pasadas de la rueda sobre la probeta (ida y vuelta).

Tabla 4-10. Resultados obtenidos para WTS de probetas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos

	Medio ensayo	**Seco**			**Agua**		
	Contenido CA-24	**5,1%**	**5,1% + AMA**	**5,1% + AMT**	**5,1%**	**5,1% + AMA**	**5,1% + AMT**
Pendiente de deformación (WTS)	WTS (d2.000 - d1.000) /1	2,15	1,74	1,62	1,79	2,09	1,57
	WTS (d5.000 - d2.500) /2,5	0,93	0,78	0,81	2,34	2,03	1,03
	WTS (d10.000 – d5.000) /5	0,53	0,49	0,49	N/A	N/A	0,72

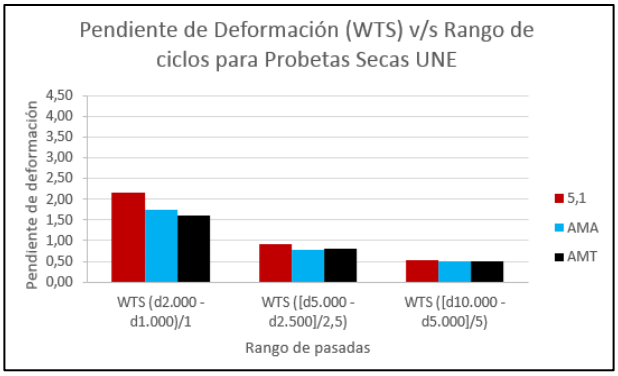


*Gráfico 4-4. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas en **seco**, norma UNE 12697-22*

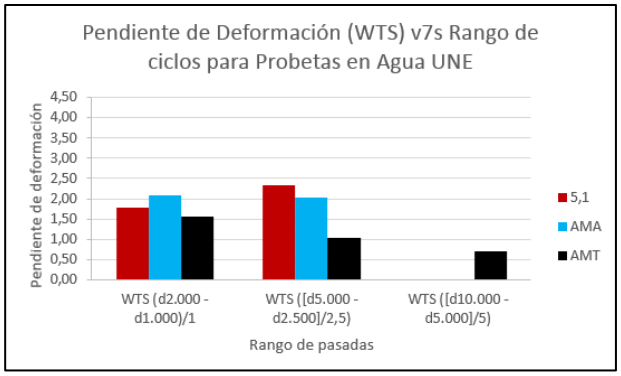


*Gráfico 4-5. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas **en agua**, norma UNE 12697-22.*

- Profundidad media de la rodera (RD) en N ciclos de carga

Se calcula la profundidad media de la rodera de las probetas a los 5.000 y 10.000 ciclos de carga. Se debe considerar que 1 ciclo de carga corresponde a 2 pasadas de la rueda sobre la probeta (ida y vuelta).

Tabla 4-11. Resultados obtenidos para RD de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, norma UNE 12697-22.

	Medio ensayo	Seco						Agua					
	Contenido CA-24	5,1%		5,1% + AMA		5,5% + AMT		5,1%		5,1% + AMA		5,5% + AMT	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Deformación promedio (RD)	RD (5.000 ciclos)	10,97	17,82	9,41	15,45	9,98	16,21	13,63	22,19	12,9	21,03	8,78	14,15
	RD (10.000 ciclos)	13,62	22,14	11,77	19,34	12,25	19,91	N/A	-	N/A	-	12,5	20,15

- Gráfico profundidad de la huella o deformación v/s número de pasadas

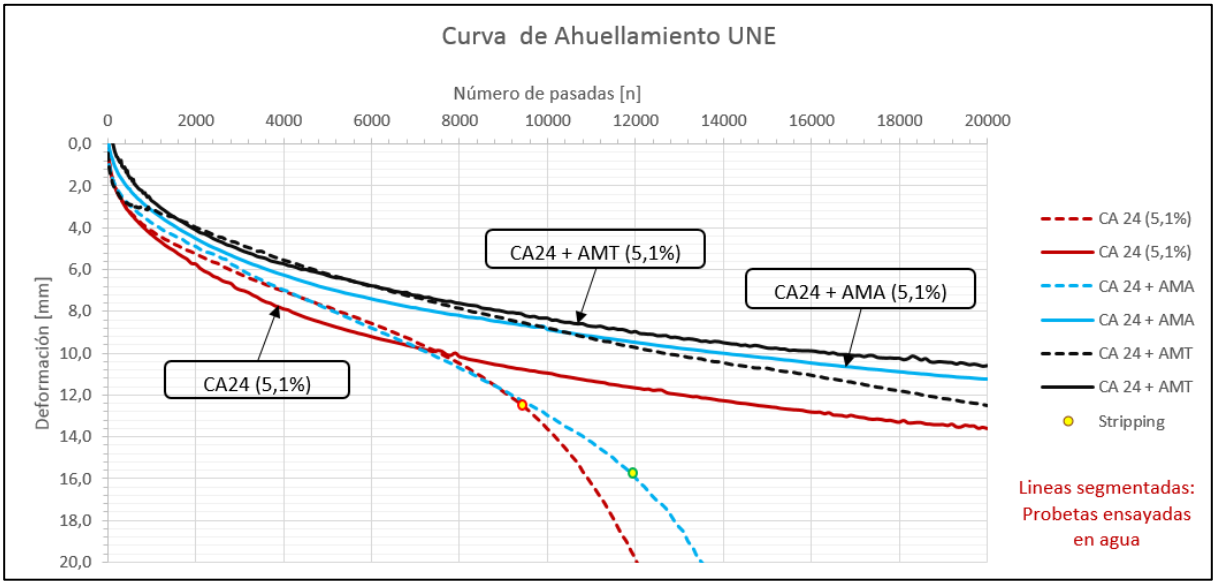


Gráfico 4-6. Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT en seco y en agua para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma UNE 12697-22.

En el Gráfico 4-6, se grafican las deformaciones registradas al someter las probetas a ensayo de Rueda de Hamburgo en un ambiente seco y en agua. Las líneas segmentadas corresponden a probetas ensayadas en agua, mientras que las líneas continuas corresponden a probetas ensayadas en seco. También, se tiene que las líneas de color rojo, celeste y negro representan las probetas con contenido óptimo de asfalto sin aditivo (5,1% CA-24), con aditivo mejorador de adherencia (5,1% CA-24 + AMA) y con aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% + AMT), respectivamente. El punto amarillo corresponde al Punto de Inflexión Stripping (SIP).

Ver ANEXO, punto 7-4 para observar un ejemplo detallado del informe entregado por la máquina del ensayo Rueda de Hamburgo en un par de probetas ensayadas.

- Punto de inflexión stripping (SIP)

De lo observado en el Gráfico 4-6, se tiene que 2 de las 3 probetas ensayadas en agua presentan punto de inflexión stripping (SIP). Estas son las mezclas con 5,1% de CA-24 y la de 5,1% de CA-24 + AMA. La mezcla con 5,1% de CA-24 + AMT no presenta un SIP bien definido, no obstante, es la única probeta ensayada en agua que termina el ensayo a las 20.000 pasadas.

El SIP queda determinado por la Ecuación 3-2. Fórmula para determinar el punto de inflexión stripping (SIP). Para desarrollar dicha ecuación, se debe determinar la ecuación de la recta (Ecuación 3-3. Ecuación de la recta.) en los estados estacionarios (donde la curva es “lineal”) como se observan en el Gráfico 3-2. Curva característica de ensayo de Rueda de Hamburgo**.**

Luego, utilizando el software Excel se tienen las siguientes ecuaciones de los estados estacionarios en cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 4-12. Ecuaciones de estados estacionarios en probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma UNE 12697-22

Norma UNE 12697-22		
Ligante CA-24	**Ecc. 1º Estado estacionario**	**Ecc. 2º Estado estacionario**
5,1%	$y = 0{,}0008 * x + 3{,}5671$	$y = 0{,}0032 * x - 19{,}145$
5,1% + AMA	$y = 0{,}0010 * x + 3{,}0870$	$y = 0{,}0026 * x - 16{,}081$
5,1% + AMT	N/A	N/A

Donde y corresponde a la profundidad de la huella (mm) en x cantidad de pasadas.

Al desarrollar la Ecuación 3-2 con los datos obtenidos en de la Tabla 4-12, se tiene que los valores del SIP son:

Tabla 4-13. Resultados obtenidos para SIP de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, ensayadas en agua.

Ligante CA-24	**SIP (pasadas)**	**Def. en SIP (mm)**
5,1%	9.463	11,14
5,1% + AMA	11.980	15,07
5,1% + AMT	N/A*	N/A*

(*) La mezcla con 5,1% de CA-24 + AMT, no presenta el SIP, pero es la única mezcla ensayada en agua que finaliza el ensayo a las 20.000 pasadas con una deformación de 12,50 mm.

En las probetas secas, se observan las siguientes deformaciones al terminar el ensayo:

Tabla 4-14. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos al finalizar el ensayo en seco.

Ligante CA-24	**Nº Pasadas**	**Def. a las 20.000 pasadas (mm)**
5,1%	20.000	13,62
5,1% + AMA	20.000	11,21
5,1% + AMT	20.000	10,58

- Pendiente de Fluencia

Las pendientes de fluencia o “creep slope” (previo al SIP) obtenidas del Gráfico 4-6, se registran en la siguiente Tabla:

Tabla 4-15. Pendiente de fluencia de mezclas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, norma UNE 12697-22.

% CA-24	Pendiente de Fluencia	
	Probetas secas	**Probetas agua**
5,1%	0,0004	0,0008
5,1% + AMA	0,0003	0,0010
5,1% + AMT	0,0003	0,0005

- Pendiente de Pérdida de adherencia

Las pendientes de pérdida de adherencia o “stripping slope” (posterior al SIP) obtenidas del Gráfico 4-6 se registran en la siguiente tabla:

Tabla 4-16. Pendientes de pérdida de adherencia de mezclas con contenido óptimo de asfalto, norma UNE 12697-22

% CA-24	Pendiente pérdida de adherencia
5,1%	0,0033
5,1% + AMA	0,0031
5,1% + AMT	N/A

4.1.2. Análisis de resultados ensayo HWT, según norma UNE 12697-22

4.1.2.1. *Probetas con distinto contenido de asfalto:*

En general, se observa que las probetas ensayadas en agua presentan resultados más desfavorables que las ensayadas en seco, puesto que ni una de las tres probetas ensayadas en agua termina el ensayo a las 20.000 pasadas, sino que alcanzan la deformación máxima (20 mm) incluso antes de las 10.000 pasadas.

Las probetas ensayadas en agua, presentan deformaciones mayores que las observadas en los ensayos en seco, debido a que la afinidad del agua con el árido es mayor que la del ligante con el árido. Este fenómeno, provoca un desplazamiento, por efecto de la penetración del agua en el agregado a causa del rompimiento de la película de asfalto.

Del SIP observado en las mezclas, es decir, el punto donde la mezcla pierde adherencia entre el CA y el árido, se tiene que la muestra con 5,1% de CA-24 es la que más resiste, alcanzando el punto a las 9.463 pasadas. Si bien, la mezcla con 5,1% de CA-24 es la que presenta Stripping en la mayor cantidad de pasadas, es decir, presenta fallas producto de la humedad en un mayor plazo, no es la mezcla que menos se deforma, sino que, la mezcla con 4,7% de CA-24 es la mezcla que logra menor deformación al alcanzar el SIP, pero a su vez tendrá menor vida útil, debido a que presentará una menor resistencia a la fatiga.

De las deformaciones promedio se tiene que la mezcla con 5,1% de CA-24 es la que menos se deforma, tanto en seco como en agua, mientras que la mezcla que tiene peor desempeño es la elaborada con 5,5% de CA-24. Este comportamiento responde a lo que debe suceder en teoría, puesto que, al aumentar el contenido de asfalto con respecto al óptimo, la mezcla es menos resistente a las deformaciones y, en consecuencia, presentan deformaciones mayores. Finalmente, cuando la carpeta sea puesta en servicio, la mezcla presentará el fenómeno de exudación. Por el contrario, al disminuir el contenido de asfalto en la mezcla, el reacomodo de los agregados al pasar la rueda cargada es menor, por ende, se observan menores deformaciones, pero es altamente probable que la vida útil del pavimento disminuya, debido a una menor resistencia a la fatiga.

Con respecto al ahuellamiento, se tiene que las mezclas menos susceptibles al ahuellamiento son las elaboradas con 4,7% y 5,1% de CA-24, mientras que la mezcla más susceptible al ahuellamiento es la elaborada con 5,5% de CA-24.

De la susceptibilidad al daño por humedad, se tiene que la mezcla **más** susceptible a sufrir daños producto de la humedad es la elaborada con 4,7% de CA-24, mientras que la mezcla **menos** susceptible a sufrir daños por la humedad es la elaborada con 5,1% de CA-24.

De los tres casos en estudio, se tiene que la mezcla con 5,1% de CA-24 es la más óptima tanto en un ambiente seco como en agua. De los casos restantes, la mezcla con 4,7% de CA-24 presenta menores deformaciones, pero es más susceptible a sufrir daños producto de la humedad. Mientras que la mezcla con 5,5% de CA-24 logra el peor desempeño, debido a que presenta mayores deformaciones tanto en un ambiente seco como en agua y alcanza el SIP en una menor cantidad de pasadas, pero es levemente menos susceptible que la mezcla anterior a sufrir daños producto de la humedad.

4.1.2.2. *Probetas con contenido óptimo de asfalto con y sin aditivos.*

En general, se observa que las probetas ensayadas en agua presentan deformaciones más desfavorables que las ensayadas en seco. Puesto que 2 de las 3 mezclas ensayadas en agua, alcanza la deformación máxima (20 mm) antes de las 20.000 pasadas. Esto se debe a que la afinidad del agua con el árido es mayor que la del ligante con el árido, provocando un desplazamiento del ligante por efecto de la penetración del agua en el agregado a causa del rompimiento de la película de asfalto.

En el Gráfico 4-6**.** Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT en seco y en agua para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma UNE 12697-22., se observa una curva particular, que es la presentada por la mezcla con 5,1% CA-24 + AMT ensayada en agua. Puesto que no presenta un SIP definido, observándose sólo la tendencia al ahuellamiento y es la única mezcla ensayada en agua que finaliza la prueba a las 20.000 pasadas.

Del SIP observado en las demás mezclas, es decir, el punto donde la mezcla pierde adherencia entre el CA y el árido, se tiene que la mezcla con 5,1% CA-24 + AMA es la que más se resiste, alcanzando el punto a las 11.980 pasadas. No obstante, llama la atención el resultado obtenido, debido al bajo desempeño de la mezcla cuando es sometida a ensayo en agua. En teoría, este aditivo debe mejorar la adherencia entre el CA y el árido, situación que no ocurre. Observándose resultados levemente superiores a la mezcla sin aditivos.

De las deformaciones promedio, se tiene que la mezcla con 5,1% de CA-24 es la que registra mayor deformación, tanto en seco como en agua. Mientras que la mezcla que alcanza logra el mejor desempeño es la elaborada con 5,1% de CA-24 + AMT, tanto en seco como en agua, debido a que, opone mayor resistencia al ahuellamiento en cualquier ambiente.

De la susceptibilidad de la mezcla a sufrir daños producto de la humedad, se analiza que la mezcla más susceptible a sufrir daños es la elaborada sin aditivos (5,1% CA-24), mientras que la mezcla menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad es la elaborada con 5,1% CA-24 + AMT.

Cabe destacar que la finalidad del Aditivo Mejorador de Trabajabilidad (AMT) es permitir compactar la mezcla asfáltica a una menor temperatura (30 ºC menos específicamente), pero en este estudio además tiene como propiedad retardar la pérdida de adherencia del CA con el árido.

En resumen, de los tres casos en estudio, la mezcla que logra un mejor desempeño tanto en seco como en agua es la elaborada con 5,1% CA-24 + AMT, mientras que la mezcla con resultados más desfavorables es la mezcla sin aditivos (5,1% de CA-24), alcanzando el mayor ahuellamiento a las 20.000 pasadas y es la mezcla más susceptible a sufrir daños producto de la humedad.

4.1.3. Resultados ensayo HWT según norma AASHTO T324-14

Según norma AASHTO T324-14, la probeta debe ser ensayada solo en agua, sin considerar el ensayo en seco. Para efectos de este estudio se decide realizar el ensayo en seco y así poder comparar las mismas variables de la norma UNE 12697-22 con los demás ensayos.

Como se muestra en la Figura 3-1. Diagrama de ensayos. Fuente: Elaboración propia. las mezclas se subdividen en dos grupos. Por un lado, se analizan las probetas elaborados con diferente contenido de asfalto (4,7; 5,1 y 5,5 % de CA-24) y, por otro lado, se analizan las probetas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos (5,1 % de CA-24; 5,1 % de CA-24 + AMA y 5,1 % de CA-24 + AMT).

4.1.3.1. *Probetas elaboradas con 4,7; 5,1 y 5,5% de CA-24.*

A continuación, se realiza un resumen de algunas propiedades físicas de las probetas ensayadas y se verifica el cumplimiento de las restricciones (Tabla 3-5. Comparación entre normas para ensayo Rueda de Hamburgo.) según norma AASHTO T324.

Tabla 4-17. Verificación de cumplimiento de requisitos para probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T324-14.

Norma AASHTO	**4,7% CA-24**				**5,1% CA-24**				**5,5% CA-24**			
	Seco		Agua		Seco		Agua		Seco		Agua	
# Probeta	2575	2576	2613	2614	2512	2513	2527	2528	2617	2618	2619	2620
% Vacíos	6,1	6,2	7,1	7,2	8,0	7,7	7,1	7,3	7,1	6,8	7,0	6,5
% Comp. Ref. Marshall	100,6	100,5	99,5	99,4	97,0	97,4	97,9	97,8	97,5	97,8	97,6	98,1
Densidad (Kg/m3)	2353	2349	2327	2323	2286	2294	2307	2304	2299	2307	2301	2313
Promedio densidades	2351		2325		2290		2306		2303		2307	
Promedio alturas (mm)	61,3	61,6	61,4	61,8	62,9	62,3	61,9	62,5	62,7	62,8	62,7	62,8
Cumple condiciones	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

- Pendiente de deformación promedio de las probetas

Se calculan las pendientes de deformación promedio de las probetas entre los 1.000 y 2.000 ciclos de carga, entre los 2.500 y 5.000 ciclos de carga y entre los 5.000 y 10.000 ciclos de carga. Se debe considerar que 1 ciclo de carga corresponde a 2 pasadas de la rueda sobre la probeta (ida y vuelta).

Tabla 4-18. Resultados obtenidos para WTS de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto.

	Medio ensayo	**Seco**			**Agua**		
	Contenido asfalto	**4,7**	**5,1**	**5,5**	**4,7**	**5,1**	**5,5**
Pendiente de deformación (WTS)	WTS (d2.000 - d1.000) /1	0,56	1,04	1,39	0,985	0,945	1,26
	WTS (d5.000 - d2.500) /2,5	0,342	0,58	0,614	0,55	0,574	0,64
	WTS (d10.000 – d5.000) /5	0,178	0,311	0,366	0,434	0,598	0,63

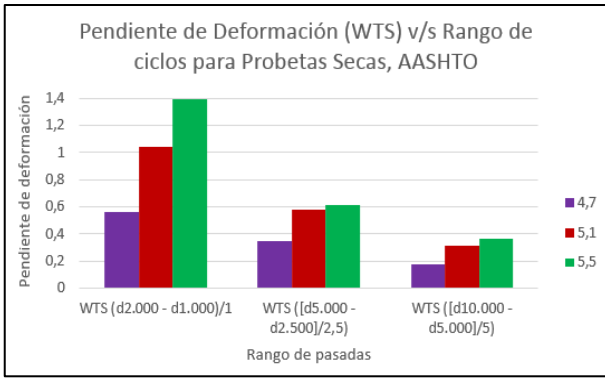


*Gráfico 4-7. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos d**e pasadas** para probetas ensayadas en **seco**, norma A**ASHTO T324-14.***

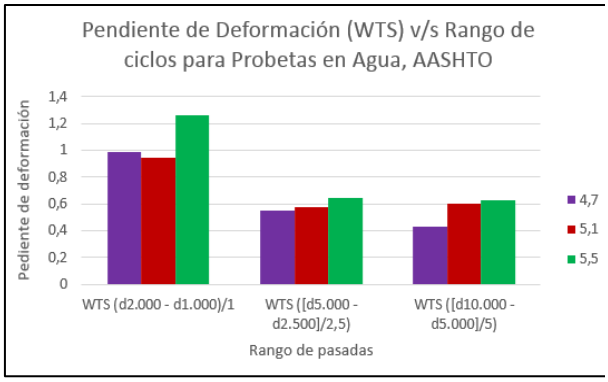


*Gráfico 4-8. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos d**e pasadas** para probetas ensayadas en **agua**, norma A**ASHTO T324-14**.*

- Profundidad media de la rodera en N ciclos de carga

Se calcula la profundidad media de la rodera de las probetas a los 5.000 y 10.000 ciclos de carga. Se debe considerar que 1 ciclo de carga corresponde a 2 pasadas de la rueda sobre la probeta (ida y vuelta).

Tabla 4-19. Resultados obtenidos para RD de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T 324-14.

	Medio ensayo	Seco						Agua					
	Contenido CA-24	4,7%		5,1%		5,5%		4,7%		5,1%		5,5%	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Deformación promedio (RD)	RD (5.000 ciclos)	4,0	6,55	6,61	10,45	8,42	13,35	4,05	6,57	6,9	11,09	8,07	12,85
	RD (10.000 ciclos)	5,0	8,12	8,17	12,91	10,25	16,26	10,13	16,44	9,89	15,9	11,98	19,07

- Gráfico profundidad de la huella v/s número de pasadas:

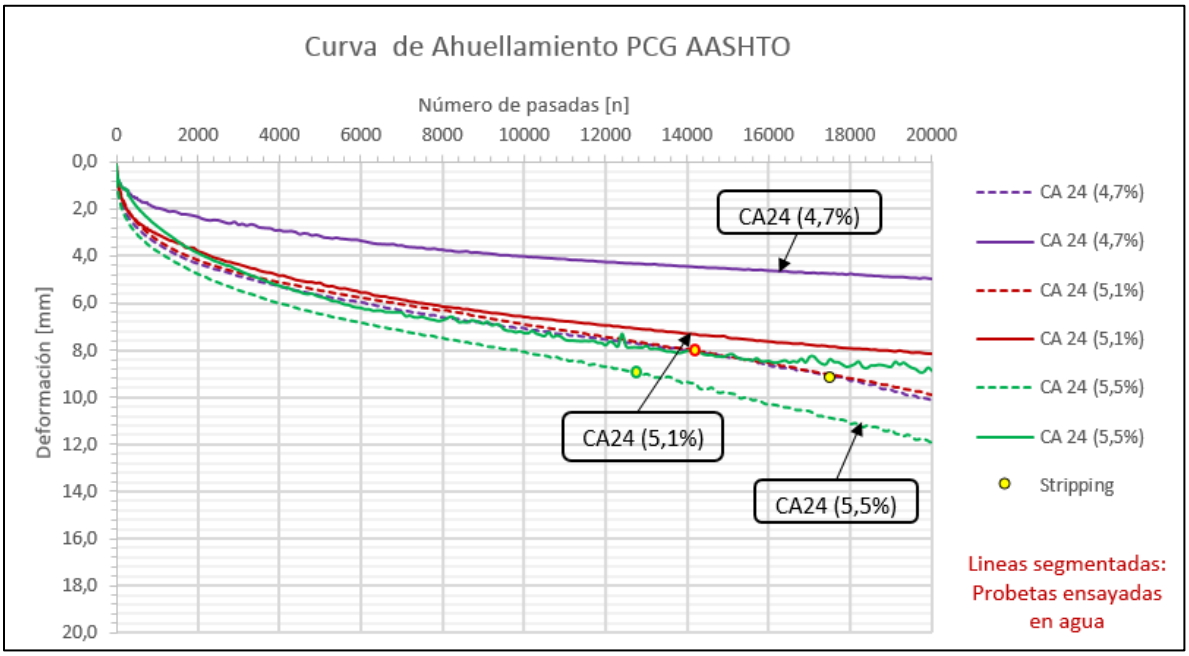


Gráfico 4-9. Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT, en seco y en agua para probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, según norma AASHTO T324-14.

En el Gráfico 4-9, se grafican las deformaciones registradas al someter las probetas a ensayo de Rueda de Hamburgo en un ambiente seco y en agua. Las líneas segmentadas corresponden a probetas ensayadas en agua, mientras que las líneas continuas corresponden a probetas ensayadas en seco. También, se tiene que las líneas de color morado, rojo y verde representan las probetas con contenido de asfalto 4,7%; 5.1% y 5,5% de CA-24, respectivamente. El punto amarillo corresponde al Punto de Inflexión Stripping (SIP).

Ver ANEXO, punto 7-4 para observar un ejemplo detallado del informe entregado por la máquina del ensayo Rueda de Hamburgo en un par de probetas ensayadas.

- Punto de inflexión stripping (SIP)

De lo observado en el Gráfico 4-9, se tiene que las probetas ensayadas no presentan un punto de inflexión stripping (SIP) bien definido, por el contrario, posterior al periodo de consolidación de la mezcla (después de las 1.000 pasadas), la deformación de las curvas es prácticamente “lineal” y todas las mezclas terminan el ensayo a las 20.000 pasadas, por lo que la mezcla se deforma hasta la zona secundaria de deformación, es decir, es susceptible al ahuellamiento, pero no alcanza a sufrir daños producto de la humedad una vez finalizado el ensayo.

No obstante, lo anterior, es posible calcular un SIP parcial, pero al no estar bien definido, no es concluyente para poder realizar análisis posteriores.

El SIP queda determinado por la Ecuación 3-2. Fórmula para determinar el punto de inflexión stripping (SIP). Para desarrollar dicha ecuación, se debe determinar la ecuación de la

recta (Ecuación 3-3. Ecuación de la recta.) en los estados estacionarios (donde la curva es "lineal") como se observan en el Gráfico 3-2. Curva característica de ensayo de Rueda de Hamburgo**.**

Luego, utilizando el software Excel se tienen las siguientes ecuaciones de los estados estacionarios en cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 4-20. Ecuaciones de estados estacionarios en probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, según norma AASHTO T324-14.

Norma AASHTO T324-14		
Ligante CA-24	**Ecc. 1º Estado estacionario**	**Ecc. 2º Estado estacionario**
4,7%	$y = 0{,}0002 * x + 4{,}7555$	$y = 0{,}0004 * x + 1{,}2520$
5,1%	$y = 0{,}0003 * x + 4{,}0913$	$y = 0{,}0004 * x + 2{,}6542$
5,5%	$y = 0{,}0003 * x + 5{,}0095$	$y = 0{,}0004 * x + 3{,}5698$

Donde y corresponde a la profundidad de la huella (mm) en x cantidad de pasadas.

Al desarrollar la Ecuación 3-2 con los datos obtenidos en de la Tabla 4-20, se tiene que los valores del SIP son:

Tabla 4-21. Resultados obtenidos para SIP de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, ensayadas en agua.

Ligante CA-24	**SIP (pasadas)**	**Def. en SIP (mm)**
4,7%	17.518	8,26
5,1%	14.371	8,40
5,5%	14.397	9,33

Las deformaciones registradas en las probetas ensayadas en agua al terminar el ensayo se registran en la siguiente tabla:

*Tabla 4-22. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, al finalizar el ensayo en **agua**.*

Ligante CA-24	**Nº Pasadas**	**Def. a las 20.000 pasadas (mm)**
4,7%	20.000	10,13
5,1%	20.000	9,89
5,5%	20.000	11,98

En las probetas secas, se observan las siguientes deformaciones al finalizar el ensayo:

*Tabla 4-23. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, al finalizar el ensayo en **seco**.*

Ligante CA-24	Nº Pasadas	Def. a las 20.000 pasadas (mm)
4,7%	20.000	4,96
5,1%	20.000	8,17
5,5%	20.000	8,89

- Pendiente de Fluencia

Las pendientes de fluencia o “creep slope” (previo al SIP) obtenidas del Gráfico 4-9, se registran en la siguiente Tabla:

Tabla 4-24. Pendiente de fluencia de mezclas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T 324

% CA-24	Pendiente de Fluencia	
	Probetas secas	Probetas agua
4,7%	0,0001	0,0002
5,1%	0,0002	0,0003
5,5%	0,0002	0,0003

- Pendiente de Pérdida de Adherencia

Las pendientes de pérdida de adherencia (posterior al SIP) de las mezclas del Gráfico 4-9 son:

Tabla 4-25. Pendiente de pérdida de adherencia de mezclas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T 324-14.

% CA-24	Pendiente Pérdida de Adherencia
4.7	0,0004
5,1	0,0003
5,5	0,0004

4.1.3.2. *Probetas elaboradas con 5,1% CA-24; 5,1% CA-24 + AMA; 5,1% + AMT.*

A continuación, se realiza un resumen de algunas propiedades físicas de las probetas ensayadas y se verifica el cumplimiento de las restricciones (Tabla 3-5. Comparación entre normas para ensayo Rueda de Hamburgo.) según norma AASHTO T324-14.

Tabla 4-26. Verificación de cumplimiento de requisitos para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma AASHTO T324-14.

Norma AASHTO	**5,1% CA-24**				**5,1% CA-24 + AMA**				**5,1% CA-24 + AMT**			
	Seco		Agua		Seco		Agua		Seco		Agua	
# Probeta	2512	2513	2527	2528	2514	2539	2515	2529	2516	2531	2517	2530
% Vacíos	8,0	7,7	7,1	7,3	6,2	6,0	6,1	6,2	7,6	6,1	6,6	7,3
% Comp. Ref. Marshall	97,0	97,4	97,9	97,8	98,9	99,0	99,0	98,9	97,5	99,0	98,5	97,7
Densidad (Kg/m3)	2286	2294	2307	2304	2331	2333	2332	2331	2298	2333	2321	2303
Promedio densidades	2290		2306		2332		2332		2316		2312	
Promedio alturas (mm)	62,9	62,3	61,9	62,5	62,0	61,7	61,5	61,4	62,3	62,4	62,7	61,9
Cumple condiciones	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

- Pendiente de deformación promedio de las probetas

Se calculan las pendientes de deformación promedio de las probetas entre los 1.000 y 2.000 ciclos de carga, entre los 2.500 y 5.000 ciclos de carga y entre los 5.000 y 10.000 ciclos de carga. Se debe considerar que 1 ciclo de carga corresponde a 2 pasadas de la rueda sobre la probeta (ida y vuelta).

Tabla 4-27 Resultados obtenidos para WTS de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma AASHTO T324-14.

	Medio ensayo	**Seco**			**Agua**		
	Contenido asfalto	**5,1**	**5,1 + AMA**	**5,1 + AMT**	**5,1**	**5,1 + AMA**	**5,1 + AMT**
Pendiente de deformación (WTS)	WTS (d2.000 - d1.000) /1	1,04	0,95	1,0275	0,945	0,855	0,96
	WTS (d5.000 - d2.500) /2,5	0,58	0,52	0,695	0,574	0,426	0,588
	WTS (d10.000 – d5.000) /5	0,311	0,332	0,3795	0,598	0,258	0,47

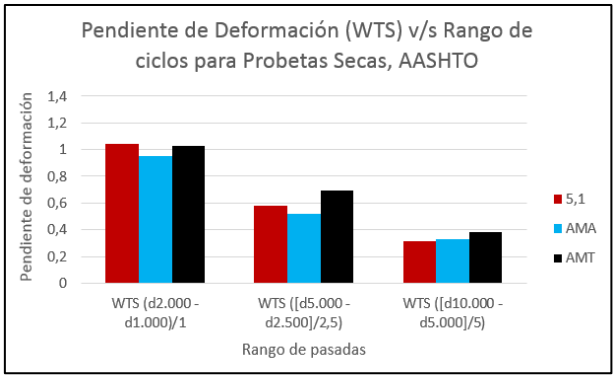


*Gráfico 4-10. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas en **seco**, norma AASHTO T324-14*

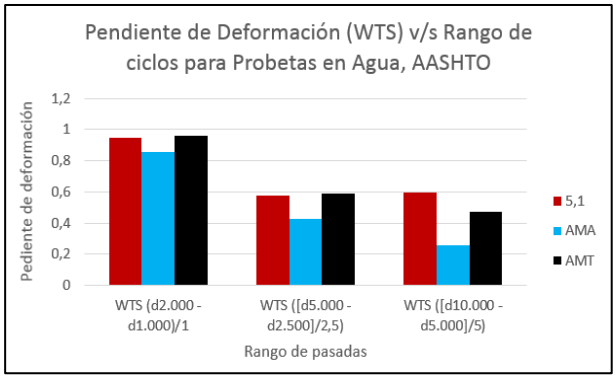


*Gráfico 4-11. Gráfico WTS v/s Rango de ciclos de pasadas para probetas ensayadas **en agua**, norma AASHTO T324-14.*

- Profundidad media de la rodera en N ciclos de carga

Se calcula la profundidad media de la rodera de las probetas a los 5.000 y 10.000 ciclos de carga. Se debe considerar que 1 ciclo de carga corresponde a 2 pasadas de la rueda sobre la probeta (ida y vuelta).

Tabla 4-28. Resultados obtenidos para RD de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma AASHTO T324-14.

	Medio ensayo	Seco						Agua					
	Contenido CA-24	5,1%		5,1% + AMA		5,5% + AMT		5,1%		5,1% + AMA		5,5% + AMT	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Deformación promedio (RD)	RD (5.000 ciclos)	6,61	10,45	5,65	9,12	7,21	11,55	6,9	11,09	5,53	8,99	6,45	10,43
	RD (10.000 ciclos)	8,17	12,91	7,31	11,8	9,12	14,6	9,89	15,9	6,82	11,09	8,84	14,21

- Gráfico profundidad de la huella v/s número de pasadas:

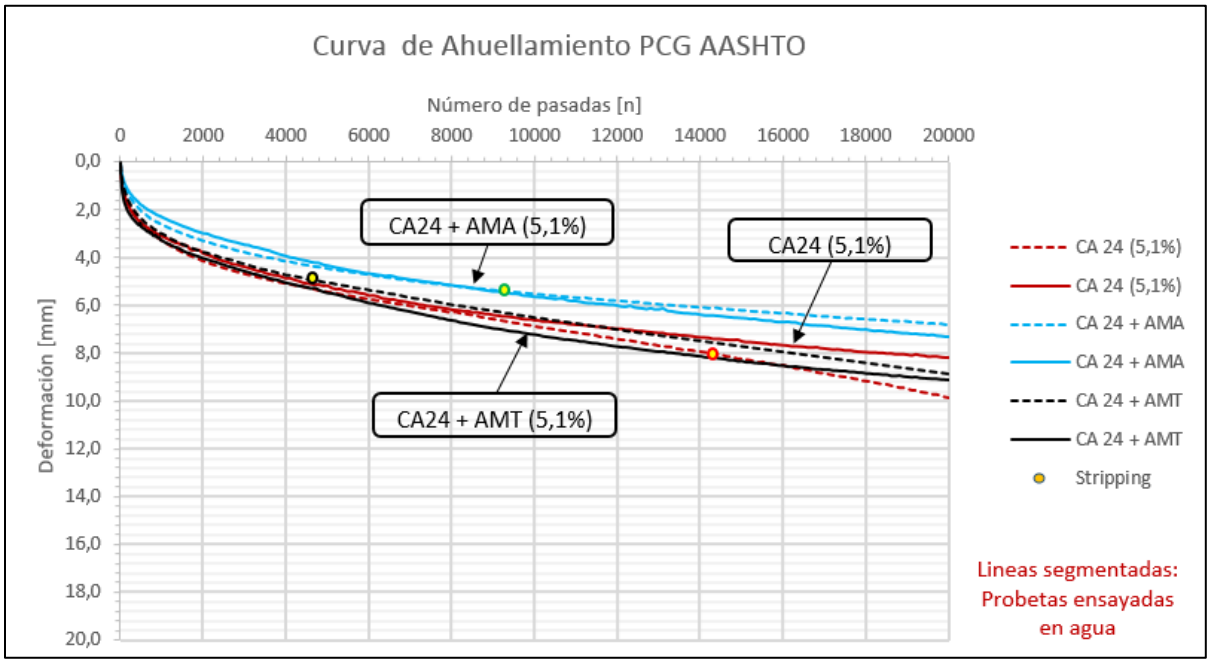


Gráfico 4-12. Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT, en seco y en agua para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma AASHTO T324-14.

En el Gráfico 4-12, se grafican las deformaciones registradas al someter las probetas a ensayo de Rueda de Hamburgo en un ambiente seco y en agua. Las líneas segmentadas corresponden a probetas ensayadas en agua, mientras que las líneas continuas corresponden a probetas ensayadas en seco. También, se tiene que las líneas de color rojo, celeste y negro representan las probetas con contenido óptimo de asfalto sin aditivo (5,1% CA-24), con aditivo mejorador de adherencia (5,1% CA-24 + AMA) y con aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% + AMT), respectivamente. El punto amarillo corresponde al Punto de Inflexión Stripping (SIP).

Ver ANEXO, punto 7-4. para observar un ejemplo detallado del informe entregado por la máquina del ensayo Rueda de Hamburgo en un par de probetas ensayadas.

- Punto de inflexión stripping (SIP)

De lo observado en el Gráfico 4-12, se tiene que las probetas ensayadas no presentan un punto de inflexión stripping (SIP) bien definido, por el contrario, posterior al periodo de consolidación de la mezcla (después de las 1.000 pasadas), la deformación de las curvas es prácticamente “lineal” y todas las mezclas terminan el ensayo a las 20.000 pasadas, por lo que la mezcla se deforma hasta la zona secundaria de deformación, es decir, es susceptible al ahuellamiento, pero no alcanza a sufrir daños producto de la humedad una vez finalizado el ensayo.

No obstante, lo anterior, es posible calcular un SIP parcial, pero al no estar bien definido, no es concluyente para poder realizar análisis posteriores.

El SIP queda determinado por la Ecuación 3-2. Fórmula para determinar el punto de inflexión stripping (SIP). Para desarrollar dicha ecuación, se debe determinar la ecuación de la

recta (Ecuación 3-3. Ecuación de la recta.) en los estados estacionarios (donde la curva es "lineal") como se observan en el Gráfico 3-2. Curva característica de ensayo de Rueda de Hamburgo**.**

Luego, utilizando el software Excel se tienen las siguientes ecuaciones de los estados estacionarios en cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 4-29. Ecuaciones de estados estacionarios en probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, elaboradas según norma AASHTO T324-14.

Norma AASHTO T324-14		
Ligante CA-24	**Ecc. 1º Estado estacionario**	**Ecc. 2º Estado estacionario**
5,1%	$y = 0{,}0003 * x + 4{,}0913$	$y = 0{,}0004 * x + 2{,}6542$
5,1% + AMA	$y = 0{,}0002 * x + 3{,}3655$	$y = 0{,}0001 * x + 4{,}2900$
5,1% + AMT	$y = 0{,}0005 * x + 2{,}8376$	$y = 0{,}0002 * x + 4{,}2423$

Donde y corresponde a la profundidad de la huella (mm) en x cantidad de pasadas.

Al desarrollar la Ecuación 3-2. con los datos obtenidos en de la Tabla 4-29, se tiene que los valores del SIP son:

Tabla 4-30. Resultados obtenidos para SIP de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, ensayadas en agua.

Ligante CA-24	**SIP (pasadas)**	**Def. en SIP (mm)**
5,1%	14.371	8,4
5,1% + AMA	9.245	5,22
5,1% + AMT	4.682	5,18

Las deformaciones registradas en las probetas ensayadas en agua al terminar el ensayo se registran en la siguiente tabla:

Tabla 4-31. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, al finalizar el ensayo en agua.

Ligante CA-24	**Nº Pasadas**	**Def. a las 20.000 pasadas (mm)**
5,1%	20.000	9,89
5,1% + AMA	20.000	6,82
5,1% + AMT	20.000	8,85

En las probetas secas, se observan las siguientes deformaciones al terminar el ensayo:

Tabla 4-32. Deformaciones y Nº de pasadas de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, al finalizar el ensayo en seco.

Ligante CA-24	Nº Pasadas	Def. a las 20.000 pasadas (mm)
5,1%	20.000	8,17
5,1% + AMA	20.000	7,31
5,1% + AMT	20.000	9,11

- Pendiente de Fluencia

Las pendientes de fluencia o “creep slope” (previo al SIP) obtenidas del Gráfico 4-12, se registran en la siguiente Tabla:

Tabla 4-33. Pendiente de fluencia de mezclas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, norma AASHTO T 324-14.

% CA-24	Pendiente de Fluencia	
	Probetas secas	Probetas agua
5,1%	0,0002	0,0003
5,1% + AMA	0,0002	0,0002
5,1% + AMT	0,0003	0,0005

- Pendiente de Pérdida de adherencia

Las pendientes de pérdida de adherencia posterior al Punto de Inflexión Stripping (SIP) de las mezclas del Gráfico 4-12 son:

Tabla 4-34. Pendiente de pérdida de adherencia de mezclas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, norma AASHTO T 324-14.

% CA-24	Pendiente pérdida de adherencia
5,1%	0,0004
5,1% + AMA	0,0001
5,1% + AMT	0,0002

4.1.4. Análisis de resultados ensayo HWT, según norma AASHTO T 324-14

4.1.4.1. *Mezclas con distinto contenido de asfalto*

Con respecto al ambiente en el cual fueron ensayadas las mezclas del Gráfico 4-9**.** Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT, en seco y en agua para probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, según norma AASHTO T324-14., se analiza que el ensayo en agua es más severo que el ensayo en seco, puesto que se observa una mayor deformación en las probetas ensayadas en agua. Al comparar las deformaciones de las mezclas ensayadas en agua con respecto a las deformaciones de las mezclas ensayadas en seco, se observa que la mezcla con 4,7% de CA-24, es la mezcla que presenta mayor diferencia entre las deformaciones (202%), mientras que la mezcla que presenta menor diferencia entre sus deformaciones es la elaborada con 5,1% de CA-24 (121%).

De las mezclas ensayadas en agua, no se observa un Punto de Inflexión Stripping (SIP) bien definido, debido a que la mezcla solo es susceptible al ahuellamiento, es decir, no presenta daños producto de la humedad al finalizar el ensayo.

Al analizar los resultados obtenidos, se tiene que las mezclas obedecen a lo que debe suceder en teoría, puesto que al envejecer las mezclas (4 hrs a 135 ºC), el árido absorbe más asfalto, mejorando la adherencia entre el CA y el árido. También, la mezcla se rigidiza, alcanzando menores deformaciones en comparación a las deformaciones obtenidas en las probetas elaboradas según norma UNE 12697-22. Si bien al rigidizarse la mezcla se observan menores ahuellamientos, también se tiene que la mezcla se convierte lentamente en un material frágil susceptible a agrietarse.

De las deformaciones promedio (RD) presentadas en la Tabla 4-19. Resultados obtenidos para RD de probetas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T 324-14., se tiene que la mezcla con 5,5% de CA-24 es la que registra mayor deformación, tanto en seco como en agua. Este comportamiento de la mezcla implica que, de las tres mezclas en estudio, ésta será la más propensa a mostrar exudación; Mientras que la mezcla que alcanza un RD menor es la elaborada con 4,7% de CA-24, tanto en seco como en agua, es decir, es la mezcla que opone mayor resistencia al ahuellamiento en cualquier ambiente. Este comportamiento responde a lo que debe suceder en teoría, puesto que, al aumentar el contenido de asfalto con respecto al óptimo, la mezcla es menos resistentes a las deformaciones y, en consecuencia, presentan deformaciones mayores. Por el contrario, al disminuir el contenido de asfalto en la mezcla, el reacomodo de los agregados al pasar la rueda cargada es menor, por ende, se observan menores deformaciones. Si bien una deformación baja implica un mejor desempeño de la carpeta asfáltica con respecto al ahuellamiento, es altamente probable que esta mezcla tenga una baja vida útil cuando sea puesta en servicio, debido a que disminuye su resistencia a la fatiga.

De la Tabla 4-25. Pendiente de pérdida de adherencia de mezclas elaboradas con distinto contenido de asfalto, norma AASHTO T 324-14., se analiza que la mezcla más susceptible a sufrir daños producto de la humedad es la elaborada con 4,7 y 5,5% de CA-24, mientras que la mezcla menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad es la elaborada con 5,1% de CA-24. En este punto existe una diferencia con respecto a las probetas elaboradas según norma

UNE 12697-22, debido a que, en teoría, la mezcla al tener mayor contenido de asfalto se vuelve más impermeable y en consecuencia menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad, situación que no ocurre en mezclas envejecidas.

Al realizar un análisis general de las tres mezclas en estudio, se tiene que la mezcla óptima, en base a su desempeño en un ambiente seco y en agua, es la elaborada con 5,1% de CA-24, mientras que la mezcla con peor desempeño es la elaborada con 5,5% de CA-24, debido a que es la mezcla que presenta la mayor deformación plástica tanto en seco como en agua y, además, presenta la mayor diferencia entre estas deformaciones, siendo una mezcla inestable debido a su desempeño en distintos ambientes.

4.1.4.2. *Mezclas con contenido óptimo de asfalto con y sin aditivos.*

Del Gráfico 4-12**.** Gráfico de Deformación v/s Nº de pasadas. Ensayo HWT, en seco y en agua para probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, según norma AASHTO T324-14., se observa que todas las mezclas ensayadas terminan el ensayo a las 20.000 pasadas. A diferencia de todos los ensayos realizados anteriormente, se observa que las mezclas con aditivos ensayadas en agua, se deforman menos que las mezclas con aditivos ensayadas en seco. Así, al comparar las deformaciones de las mezclas ensayadas en agua con respecto a las secas, se tiene que la mezcla con 5,1% de CA-24 + AMA es de un 93%, es decir, la mezcla ensayada en agua se deforma un 7% menos que la misma mezcla ensayada en seco. Algo similar ocurre con la mezcla elaborada con 5,1% de CA-24 + AMT, donde al comparar las deformaciones se obtiene un 98%, es decir, la mezcla ensayada en agua se deforma un 2% menos que la misma mezcla ensayada en seco. Por el contrario, al comparar las deformaciones presentadas por la mezcla elaborada con 5,1% de CA-24, se tiene que la deformación de la mezcla en agua es 21% mayor que la deformación de la mezcla ensayada en seco.

Del párrafo anterior, se concluye que el desempeño de las probetas, al envejecer la mezcla, mejora considerablemente al aplicar un aditivo mejorador de adherencia o trabajabilidad. Debido a que las deformaciones son similares, independiente del medio en que se ensaye la mezcla, por lo que, frente a factores externos, como climas adversos, la mezcla presenta un comportamiento similar, más estable.

Al analizar los resultados obtenidos, se tiene que las mezclas obedecen a lo que debe suceder en teoría, puesto que al envejecer las mezclas (4 hrs a 135 ºC), el árido absorbe más asfalto, mejorando la adherencia entre el CA y el árido. También, la mezcla se rigidiza, alcanzando menores deformaciones en comparación a las deformaciones obtenidas en las probetas elaboradas según norma UNE 12697-22. Si bien al rigidizarse la mezcla se observan menores ahuellamientos, también se tiene que la mezcla se convierte lentamente en un material frágil susceptible a agrietarse.

De las mezclas ensayadas en agua, no se observa un SIP bien definido, debido a que la mezcla ofrece una baja resistencia, por lo que se concluye que las mezclas presentan sólo tendencia a la pérdida de adherencia.

De la Tabla 4-30, se tiene que, en general las pendientes de pérdida de adherencia son bajas, por lo que, al envejecer la mezcla, es menos susceptible a sufrir daños producto de la

humedad, en comparación a los resultados obtenidos en la mezcla sin envejecer. También, se observa que la mezcla menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad es la mezcla elaborada con 5,1% CA-24 + AMA, mientras que la mezcla más susceptible a sufrir daños producto de la humedad es la mezcla con 5,1% de CA-24.

En general, se tiene que el envejecimiento de las mezclas previo a su compactación altera el desempeño de ésta cuando sea puesta en servicio, debido a que las pendientes de deformación obtenidas en los ensayos donde se usó la norma AASHTO T324-14 son menores que las pendientes de deformación registradas en las probetas elaboradas según norma UNE 12697-22. Esta diferencia se evidencia aún más en las probetas ensayadas en agua. Así, se tiene que el envejecimiento de la mezcla aporta en la disminución de la deformación plástica y ésta es menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad.

4.2. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

En el ensayo de Tracción Indirecta, según norma AASHTO T 283-14, establece que para cada tipo de mezcla (con y sin aditivos) se debe graficar el promedio de las cargas soportadas por las probetas al ser sometidas a ensayo (3 secas y 3 en agua). Los cálculos exigidos por la norma AASHTO T283-14 son:

- Resistencia media a la tracción indirecta (St), definido por la Ecuación 3-6. Resistencia media a la tracción indirecta.
- Resistencia a la tracción indirecta (TSR), definido por la Ecuación 3-7. Resistencia a la tracción indirecta (TSR).

En ANEXO se adjuntan las tablas que contienen las propiedades y resultados obtenidos en cada una de las probetas ensayadas. (Tabla 7-6. Propiedades y resultados de probetas elaboradas con diferente contenido de asfalto para ensayo TSR y Tabla 7-7. Propiedades y resultados de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, para ensayo TSR.).

4.2.1. Resultados ensayo TSR

La incidencia que tiene el daño por humedad en las MAC se presenta en los siguientes gráficos:

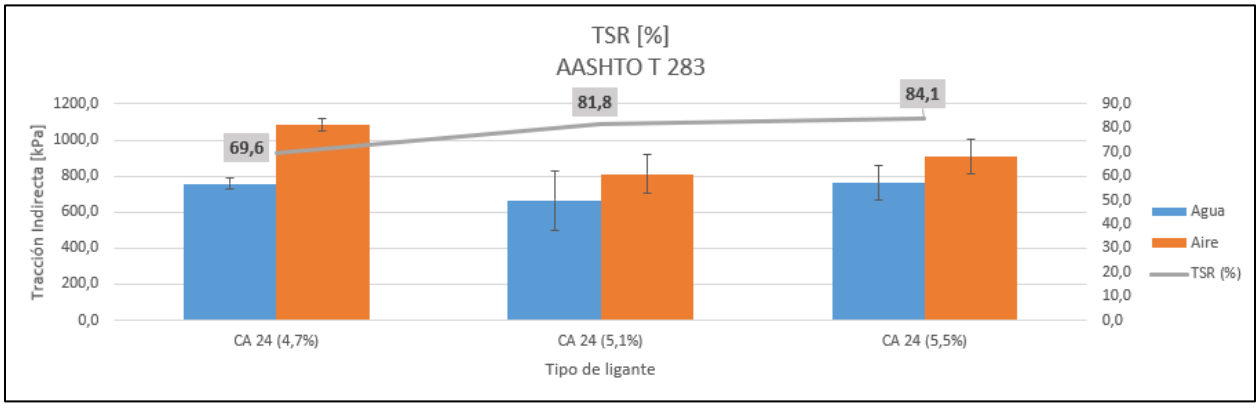


*Gráfico 4-13 (a)**.** Gráfico Valor de TSR v/s **Distintos contenidos de ligante**, según norma AASHTO T 283-14.*

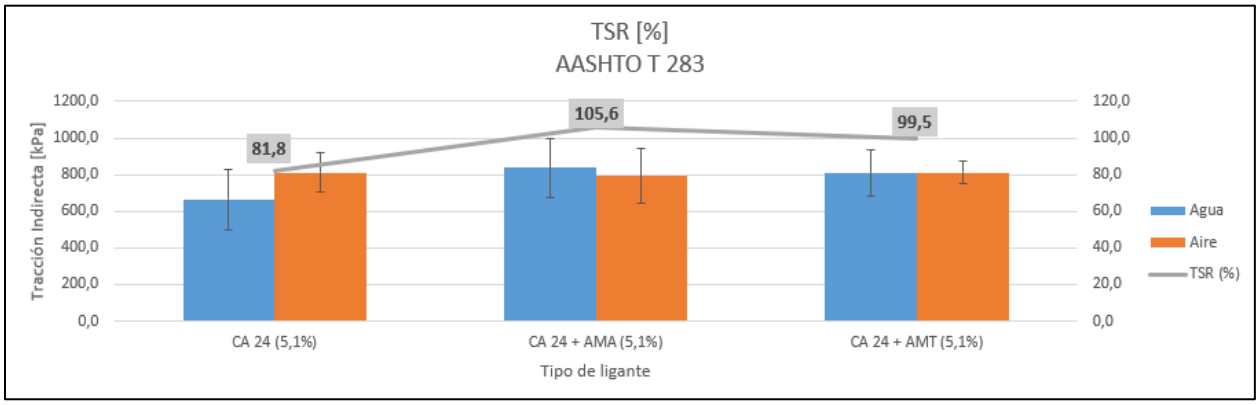


*Gráfico 4-13 (b)Gráfico Valor de TSR v/s **Ligantes con/sin aditivos**, según norma AASHTO T283-14.*

Los gráficos muestran barras de color azul, que representan las probetas ensayadas en agua, mientras que las barras de color naranjo representan las probetas ensayadas en seco. La línea gris muestra el valor del TSR y se agrega el intervalo de confianza en cada uno de los ensayos.

Al realizar un análisis volumétrico de la mezcla, se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 4-35. Análisis volumétrico de las mezclas evaluadas en ensayo TSR, en un ambiente seco y en agua.

	En aire			**En agua**		
% CA-24	**Va**	**VFA**	**VAM**	**Va**	**VFA**	**VAM**
4,7	6,9	8,4	15,3	6,9	8,4	15,3
5,1	7,0	9,4	16,4	7,0	9,4	16,4
5,5	7,1	10,0	17,1	7,1	10,0	17,1
5,1 + AMA	6,9	9,4	16,3	6,9	9,4	16,3
5,1 + AMT	7,1	9,4	16,5	7,1	9,3	16,5

4.2.2. Análisis de resultados

Como se observan en los Gráfico 4-13 (a)**.** Gráfico Valor de TSR v/s **Distintos contenidos de ligante**, según norma AASHTO T 283-14., las probetas en las cuales varía el % de CA-24 y son ensayadas en agua tienen menor resistencia a la tracción indirecta que las ensayadas en seco. Mientras que este comportamiento cambia en las mezclas con aditivo, obteniendo resultados similares para la resistencia a la tracción indirecta, en ambos medios en que se realiza el ensayo.

Así se observa que las probetas sin aditivos presentan menor % de TSR que las probetas con aditivos, en consecuencia, las probetas sin aditivos son más susceptibles a sufrir daños producto de la humedad.

Al comparar los resultados obtenidos en las probetas donde varía el % de CA-24, se tiene que la probeta elaborada con 4,7% de CA es la que presenta menor TSR, pero a su vez, es la mezcla que registra la mayor resistencia a la tracción indirecta en un medio seco, mientras que la probeta elaborada con 5,5% de CA es la que presenta mayor TSR de las tres, pero no es la mezcla que registra mayor resistencia a la tracción indirecta.

Dado lo anterior, para validar los resultados obtenidos, es necesario establecer un valor mínimo para el % TSR y, además, se debe fijar un valor mínimo para la resistencia a la tracción indirecta que deben soportar las probetas.

Al analizar los resultados de la Tabla 4-35. Análisis volumétrico de las mezclas evaluadas en ensayo TSR, en un ambiente seco y en agua., se tiene que la mezcla con mayor contenido de ligante (5,5% de CA-24) es la que tiene mayor porcentaje de volumen asfalto efectivo (VFA), debido a esto, la mezcla es más impermeable, ya que, el CA tiene como propiedad ser impermeable, entonces al tener mayor % de VFA, aumenta el nivel de impermeabilización de la

mezcla, por ende, la mezcla es menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad (TSR 84,1%). En el caso de las mezclas con 4,7% de CA-24, al tener menor % de VFA, la mezcla se vuelve menos impermeable y por consecuencia, es más susceptible a sufrir daños producto de la humedad (TSR 69,6%).

Según la norma AASHTO T 283, el mínimo exigido para el ensayo TSR es 80%, por lo tanto, la única probeta que no cumple con la exigencia mínima es la mezcla sin aditivos con 4,7% de CA-24.

Cabe destacar que, según la normativa vigente en Chile, no existe un análisis detallado sobre la susceptibilidad al daño producto de la humedad de MAC, en consecuencia, al no considerar este factor en el diseño de mezclas, actualmente ocurren fallas producto de la humedad en los caminos y carreteras.

4.3. ENSAYO DE ADHERENCIA PASIVA SEGÚN NORMA XP T66-043

La norma aplicada en este ensayo es la XP T66-043. Donde la mezcla evaluada es sometida a una serie de procedimientos, para que finalmente se realice un análisis visual.

4.3.1. Resultados ensayo de Adherencia Pasiva

Del ensayo se observan los siguientes resultados:

Tabla 4-36. Resultados obtenidos en ensayo de Adherencia Pasiva, según norma XP T66-043.

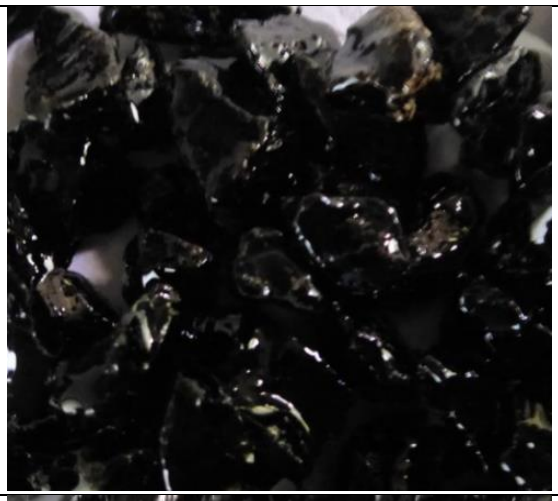
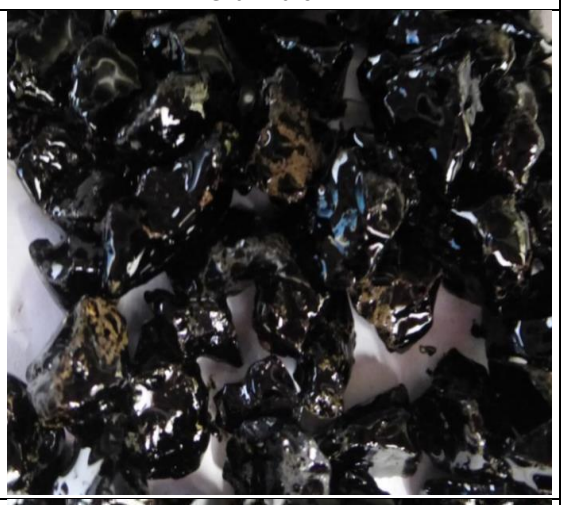
Tipo de ligante	Gravilla 1/2”	Gravilla 3/4”	Promedio
CA-24	75 %	70 %	73 %
CA-24 + AMA	95 %	90 %	93 %
CA-24 + AMT	95+ %	95+ %	95+ %

4.3.2. Análisis de resultados

De los tres tipos de ligantes en estudio, se tiene:

- CA-24 + AMT: es el ligante que mejor se adhiere al agregado, ya que, al observar la mezcla al finalizar el ensayo, más de un 95% del agregado está cubierto por ligante asfáltico.
- CA-24 + AMA: al observar la mezcla al finalizar el ensayo, se tiene las aristas del agregado se encuentran desprovistas de asfalto, pero en general, el asfalto cubre completamente la superficie del agregado.
- CA-24: Se observa que es el ligante que menos se adhiere al agregado de los tres en estudio. Quedando parte de la superficie desprovista de asfalto, por lo tanto, se concluye que es el ligante que presenta menor adherencia.

Tabla 4-37. Registro fotográfico del ensayo de adherencia pasiva, según método francés.

	Gravilla 1/2”	Gravilla 3/4”
CA-24 **Árido: Confluencia** **Fracción: 3/8” – 1 /4”** **16 h a 60 °C** **Fecha: 12.12.17**		
CA-24 + AMA **Árido: Confluencia** **Fracción: 3/8” – 1 /4”** **16 h a 60 °C** **Fecha: 12.12.17**		
CA-24 + AMT **Árido: Confluencia** **Fracción: 3/8” – 1 /4”** **16 h a 60 °C** **Fecha: 12.12.17**		

4.4. CORRELACIÓN ENTRE ENSAYOS Y ANÁLISIS

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. Cuyo valor varía entre [-1 ,1], donde:

- (r = 1), existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada “relación directa”, es decir, cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- (0 < r < 1), existe una correlación positiva.
- (r = 0), no existe relación lineal.
- (-1 < r < 0), existe una correlación negativa.
- (r = -1), existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada “relación inversa”, es decir, cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

Por otro lado, en estadística, el Coeficiente de determinación R^2 es el estadístico usado en el contexto de un modelo estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados. El valor del Coeficiente de determinación R^2, es simplemente el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson.

El valor del Coeficiente de determinación R^2 varía entre 0 y 1, donde más cercano a 1, significa que existe un mayor ajuste del modelo, basado en una regresión lineal simple, a la variable que se está intentando explicar. Por el contrario, mientras se obtenga un valor más cercano a 0, significa que el modelo está menos ajustado, por lo tanto, no existe correlación entre las variables en estudio.

Para evaluar la correlación entre los ensayos TSR, Rueda de Hamburgo (HWT UNE y HWT AASHTO) y Adherencia Pasiva, se vuelve necesario unificar los resultados obtenidos por cada tipo de ligante. Así, en el ensayo TSR y Adherencia Pasiva se tiene un resultado para cada tipo de ligante. Pero para el caso de los ensayos Rueda de Hamburgo, se tienen dos resultados por cada tipo de ligante (Deformación y Número de pasadas de la rueda cargada), por lo que, se determina que la forma representativa de relacionar los resultados obtenidos es aplicando la siguiente ecuación:

$$Relación\ HWT = 100 * \frac{Deformación\ [mm]}{N°\ Pasadas}$$

Ecuación 4-1. Relación entre la Deformación en (mm) y el Nº de pasadas en ensayo Rueda de Hamburgo.

La Ecuación 4-1 se aplica en los siguientes casos:

i. Cuando en el Gráfico de Deformación vs Nº de pasadas se observa un SIP bien definido, calcular en este punto la relación.
ii. En el caso contrario, cuando el SIP no está bien definido, la relación se debe calcular con la deformación registrada a las 20.000 pasadas.

Luego, al aplicar la Ecuación 4-1 a los resultados del ensayo HWT, según norma UNE 12697-22 y AASHTO T 324-14, se obtiene la siguiente tabla resumen, quien también considera los resultados de los demás ensayos:

Tabla 4-38. Resumen de resultados obtenidos en cada ensayo para cada tipo de ligante, aplicando la Ecuación 4-1. Para los resultados del ensayo Rueda de Hamburgo, según norma UNE y AASHTO.

			HWT UNE 12697-22		**HWT AASHTO T324-14**	
			Seco	**Agua**	**Seco**	**Agua**
Ligante	**TSR**	**ADH. PASIVA**	**Relación**	**Relación**	**Relación**	**Relación**
4,7% CA-24	69,6	73	0,07465	0,12603	0,02480	0,05065
5,1% CA-24	81,6	73	0,06810	0,11772	0,04085	0,04945
5,5% CA-24	84,1	73	0,09680	0,21423	0,04445	0,05990
5,1% CA-24 + AMA	105,6	93	0,05605	0,12579	0,03655	0,03410
5,1% CA-24 + AMT	99,5	95	0,05290	0,06250	0,04555	0,04425

4.4.1. Correlación entre ensayos TSR vs HWT

4.4.1.1. *Correlación entre ensayos TSR vs HWT según norma UNE 12697-22*

En la siguiente tabla se muestra el valor de las correlaciones obtenidas al comparar los resultados registrados en los ensayos de Rueda de Hamburgo usando norma UNE 12697-22 y el ensayo de tracción indirecta, TSR.

Tabla 4-39. Correlación entre resultados obtenidos para ensayo HWT (UNE) v/s TSR.

HWT (UNE) vs TSR		**Coef. Pearson**	R^2
Seco	4,7; 5,1; 5,5%	0,4494	0,2019
	5,1; ama; amt	**-0,9028**	**0,8150**
Agua	4,7; 5,1; 5,5%	0,5711	0,3261
	5,1; ama; amt	-0,1585	0,0251

En la Tabla 4-39, se observa correlación cercana a 1 en uno de los cuatro casos en estudio. Así, la correlación más cercana a 1 corresponde al subgrupo de mezclas hechas con el contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos. Donde las mezclas evaluadas son elaboradas con 5,1% CA-24, con aditivo mejorador de adherencia (5,1% CA-24 + AMA) y con aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% CA-24 + AMT). La correlación más alta se observa en el ensayo HWT en seco y TSR. El valor del coeficiente de determinación los resultados, es de 0,8160.

Como el Coeficiente de Pearson es negativo, significa que la relación entre los resultados es inversamente proporcional, donde a mayor valor en la relación del ensayo de HWT (UNE) en seco, menor es el resultado obtenido para el % TSR. En resumen, se tiene que, “a mayor deformación plástica, la mezcla sufrirá mayor daño producto de la humedad”. Cuando las mezclas son elaboradas con el porcentaje óptimo de asfalto y con aditivos mejoradores de adherencia o trabajabilidad.

Por lo tanto, se concluye que existe una relación directa entre la deformación plástica de la mezcla y la susceptibilidad a sufrir daños producto de la humedad (a mayor deformación plástica, mayor susceptibilidad a sufrir daños producto de la humedad) cuando la mezcla es elaborada con el contenido óptimo de asfalto y aditivos mejoradores de adherencia y trabajabilidad, usando la norma UNE para ensayo HWT y la mezcla es ensayada en seco.

4.4.1.2. *Correlación entre ensayos TSR vs HWT según norma AASHTO T324-14*

En la siguiente tabla se muestra el valor de las correlaciones obtenidas al comparar los resultados registrados en los ensayos de Rueda de Hamburgo usando la norma AASHTO T324-14 y el ensayo de tracción indirecta, TSR.

Tabla 4-40. Correlación entre resultados obtenidos para ensayo HWT (AASHTO) v/s TSR.

HWT (AASHTO) vs TSR		**Coef. Pearson**	R^2
Seco	4,7; 5,1; 5,5%	**0,999**	**0,9999**
	5,1; ama; amt	-0,2196	0,0482
Agua	4,7; 5,1; 5,5%	0,5484	0,3007
	5,1; ama; amt	**-0,8958**	**0,8024**

En la Tabla 4-40, se observa correlación cercana a 1 en dos de los cuatro casos en estudio. Donde, el primer subgrupo de mezclas es elaborada con porcentajes diferentes de asfalto (4,7%; 5,1%; 5,5% de CA-24) y son ensayadas en Rueda de Hamburgo en seco y TSR. El valor del coeficiente de determinación es de 0,9999. El segundo subgrupo de mezclas es elaborado con el óptimo de asfalto y aditivos mejorador de adherencia y trabajabilidad (5,1% CA-24; 5,1% CA-24 + AMA; 5,1% CA-24 + AMT) y son ensayadas en Rueda de Hamburgo en agua y TSR. El valor del coeficiente de determinación es de 0,8024, valor no tan cercano a 1, pero que indica que existe correlación entre los ensayos en estudio.

Del primer subgrupo de mezclas, se tiene que el Coeficiente de Pearson es positivo, es decir, la relación entre los resultados es directamente proporcional, donde a menor valor en la relación del ensayo de HWT (AASHTO) en seco, menor es el valor del % de TSR. Así se concluye que el desempeño de las mezclas al variar el % de CA se relaciona de la siguiente manera: “a mayor contenido de asfalto de la mezcla, mayor es la deformación plástica y es menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad”, por el contrario, “a menor contenido de asfalto en la mezcla, menor es la deformación plástica y es más susceptible a sufrir daños producto de la humedad”.

Del segundo subgrupo de mezclas, se tiene que el Coeficiente de Pearson es negativo, es decir, la relación entre los resultados es inversamente proporcional, donde a menor valor en la relación del ensayo HWT (AASHTO) en agua, mayor es el % TSR. Así se concluye que el desempeño de las mezclas cuando éstas son elaboradas con el porcentaje óptimo de asfalto y con aditivos mejoradores de adherencia y trabajabilidad es “a mayor deformación plástica de la

mezcla cuando es ensayada en HWT en agua, usando norma AASHTO, será más susceptible a sufrir daños producto de la humedad".

Por lo tanto, se concluye que existe relación entre la deformación plástica de la mezcla y la susceptibilidad a sufrir daños producto de la humedad, en algunos casos en estudio. Se generaliza de la siguiente manera:

- Existe relación entre ensayo HWT (AASHTO) seco y TSR en mezclas donde se varía el contenido de asfalto. Desde el punto de vista del desempeño de la mezcla, la relación se traduce en "A mayor contenido de asfalto, existe una mayor deformación plástica y menor será el daño en la mezcla producto de la humedad", en mezclas donde se varía el porcentaje de asfalto con respecto al óptimo.
- Existe relación entre ensayo HWT (AASHTO) en agua y TSR en mezclas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto y aditivos mejoradores de adherencia y trabajabilidad. Desde el punto de vista del desempeño de la mezcla, la relación se traduce en "A mayor deformación plástica de la mezcla, mayor es la susceptibilidad de la mezcla a sufrir daños producto de la humedad".

4.4.2. Correlación entre ensayos TSR vs Adherencia Pasiva

En la siguiente tabla se muestra el valor de las correlaciones obtenidas al comparar los resultados registrados en los ensayos TSR y Adherencia Pasiva.

Tabla 4-41. Correlación entre ensayos TSR v/s Adherencia Pasiva.

TSR vs ADH. PASIVA	Coef. Pearson	R^2
4,7; 5,1; 5,5%	0,5950	0,3541
5,1; ama; amt	**0,9463**	**0,8954**

En la Tabla 4-41, se observa una correlación cercana a 1 en uno de los dos casos en estudio. Donde el subgrupo de mezclas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto (5,1% CA-24), aditivo mejorador de adherencia (5,1% CA-24 + AMA) y aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% CA-24 + AMT), son mezclas que alcanzan un coeficiente de determinación de 0,8954 entre los ensayos TSR y Adherencia Pasiva.

El Coeficiente de Pearson es positivo, es decir, la relación entre los resultados es directamente proporcional, donde a menor valor en el % de TSR, menor es el % de Adherencia Pasiva. Así se concluye que mientras menor sea la adherencia entre el ligante y el árido, la mezcla es más susceptible a sufrir daños producto de la humedad.

De lo anterior, se concluye que existe una relación entre la adherencia del CA con el árido y el desempeño de la mezcla a sufrir daños producto de la humedad. Donde "a mayor afinidad entre el CA y el árido, menos susceptible es la mezcla a sufrir daños producto de la humedad, en mezclas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto y con aditivos mejorador de adherencia

y trabajabilidad, que para este caso es 5,1% de CA-24, 5,1% CA-24 + AMA y 5,1% CA-24 + AMT".

4.4.3. Correlación entre ensayos HWT vs Adherencia Pasiva

4.4.3.1. *Correlación entre ensayos HWT según norma UNE 12697-22 vs Adherencia Pasiva*

En la siguiente tabla se muestra el valor de las correlaciones obtenidas al comparar los resultados registrados en los ensayos HWT (UNE) y Adherencia Pasiva.

Tabla 4-42. Correlación entre resultados obtenidos para ensayos HWT (UNE) vs Adherencia Pasiva.

HWT (UNE) vs ADH. PASIVA		**Coef. Pearson**	R^2
Seco	4,7; 5,1; 5,5%	0,4591	0,2108
	5,1; ama; amt	**-0,9934**	**0,9868**
Agua	4,7; 5,1; 5,5%	0,2796	0,0782
	5,1; ama; amt	-0,4693	0,2202

En la Tabla 4-42, se observa que existe correlación cercana a 1 en uno de los cuatro casos en estudio. Donde en el caso del subgrupo de mezclas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto (5,1% CA-24), aditivo mejorador de adherencia (5,1% + AMA) y aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% CA-24 + AMT), al ser sometidas a ensayo HWT (UNE) en seco y Adherencia Pasiva, alcanzan un coeficiente de determinación de 0,9868.

El Coeficiente de Pearson es negativo, es decir, la relación entre los resultados es inversamente proporcional, mientras mayor sea la relación de deformación / n° de pasadas en ensayo HWT en seco, menor es el % de Adherencia Pasiva. Así se concluye que mientras mayor sea la deformación plástica de la mezcla, menor es la afinidad entre el CA y el árido.

De lo anterior, se concluye que existe una relación entre la deformación plástica de la mezcla y la adherencia entre el CA y el árido, donde "a mayor deformación plástica, menor es la afinidad entre el CA y el árido, en mezclas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto y con aditivos mejorador de adherencia y trabajabilidad, que para este caso es 5,1% de CA-24, 5,1% CA-24 + AMA y 5,1% CA-24 + AMT".

4.4.3.2. *Correlación entre ensayos HWT según norma AASHTO T324-14 vs Adherencia Pasiva*

En la siguiente tabla se muestra el valor de las correlaciones obtenidas al comparar los resultados registrados en los ensayos HWT (AASHTO) y Adherencia Pasiva.

Tabla 4-43. Correlación entre resultados obtenidos para ensayos HWT (AASHTO) vs Adherencia Pasiva.

HWT (AASHTO) vs ADH. PASIVA		**Coef. Pearson**	R^2
Seco	4,7; 5,1; 5,5%	0,5780	0,3341
	5,1; ama; amt	0,1077	0,0116
Agua	4,7; 5,1; 5,5%	0,3412	0,1164
	5,1; ama; amt	-0,7039	0,4954

En la Tabla 4-43 se observa que no existen valores de correlación cercanos a 1, en ninguno de los cuatro casos en estudio. Por lo tanto, se concluye que no existe relación entre los ensayos HWT (AASHTO) y el ensayo de Adherencia Pasiva.

5. CONCLUSIONES

- Conclusiones Ensayo Rueda de Hamburgo

De los gráficos, tablas y en general, de los resultados obtenidos al someter las distintas mezclas a pruebas de desempeño Rueda de Hamburgo en este estudio, se concluye que los factores influyentes en el desempeño de las mezclas son:

- La norma aplicada, debido al acondicionamiento de la mezcla. Concretamente, si la mezcla es envejecida o no.
- El tipo de ligante utilizado.
- El contenido de asfalto de la mezcla.

Norma aplicada

Por norma AASHTO T324-14 al envejecer la mezcla, el desempeño de ésta se ve alterado considerablemente, debido a que se observan menores deformaciones permanentes producto de la rueda cargada (ahuellamiento) y un mejor desempeño de la mezcla al ser expuesta a humedad, es decir, disminuye la susceptibilidad de la mezcla a sufrir daños producto de la humedad, en comparación a los resultados obtenidos aplicando la norma UNE 12697-22. Esto se debe a que la mezcla al ser envejecida, se rigidiza.

Tipo de ligante utilizado.

El desempeño de la mezcla dependerá también del tipo de ligante utilizado, es importante considerar el comportamiento reológico del ligante, según las condiciones de servicio, ya sea, niveles de tránsito, velocidades de aplicación de carga, temperatura, etc.

También, se debe considerar que el ligante se extraiga de la misma partida o batch, debido a que algunas partidas de ligantes del mismo tipo, como el CA-24, presentan diferencias en sus propiedades.

En este caso, el ligante utilizado en todas las mezclas, es un CA-24, de una misma partida. Pero la diferencia se observa cuando al ligante se le agrega un aditivo, ya sea, aditivo mejorador de adherencia o aditivo mejorador de trabajabilidad. Todas las mezclas en estudio lograron un mejor desempeño al incorporar un aditivo, tanto en el ensayo seco, como en el ensayo en agua.

Al realizar una comparación entre los aditivos empleados, se concluye que el Aditivo Mejorador de Trabajabilidad es el aditivo con el cual se logra el mejor desempeño de la mezcla con este tipo de agregado, por lo tanto, es la mejor opción, por sobre el Aditivo Mejorador de Adherencia y las mezclas sin aditivo.

Contenido de asfalto de la mezcla.

Al variar el contenido de asfalto con respecto al óptimo, se concluye que efectivamente la mezcla elaborada con el porcentaje óptimo de asfalto logra un mejor desempeño. Mientras que, al disminuir el porcentaje de CA con respecto al óptimo, es menos desfavorable que aumentar el

contenido de asfalto con respecto al óptimo, que es el caso donde se registra el peor desempeño de las mezclas ensayadas, tanto en seco como en agua.

Es importante considerar que, al disminuir el porcentaje de contenido de asfalto con respecto al óptimo, es altamente probable que la mezcla al ser puesta en servicio tenga una menor vida útil, puesto que se evidenciarán fallas por fatiga. Mientras que, al aumentar el contenido de asfalto con respecto al óptimo, se observará exudación en el pavimento y un ahuellamiento mayor que en cualquiera de los tres casos en estudio.

Un factor no considerado en este estudio y que puede complementarlo, es el tiempo de envejecimiento que se aplican a las mezclas, ya que, es interesante investigar sobre el desempeño de la mezcla cuando es envejecida un tiempo determinado en laboratorio, versus el desempeño de la mezcla cuando es elaborada en planta, utilizando el mismo tipo de ligante y árido. ¿Con cuánto tiempo de envejecimiento en laboratorio, se asemeja mejor el desempeño de la mezcla producida en planta?

- Conclusiones generales

Para desarrollar las conclusiones generales del presente informe, se subdividen las mezclas y su desempeño en dos grupos de ligantes. El primer grupo se compone de mezclas elaboradas variando el porcentaje de cemento asfáltico con respecto al óptimo. El segundo grupo corresponde a mezclas donde se mantiene el contenido de asfalto óptimo, pero se agregan aditivos mejoradores de adherencia y trabajabilidad. Luego se concluye lo siguiente:

i. Efecto del % de CA en pruebas de desempeño HWT, TSR y Adherencia Pasiva, usando diferentes dosificaciones de asfalto con respecto al óptimo. (4,7% de CA-24, 5,1% de CA-24 y 5,5% de CA-24).

El desempeño de la mezcla cuando es puesta en servicio depende considerablemente del contenido de asfalto de éstas. Donde a menor contenido de asfalto con respecto al óptimo, la mezcla sufre menor ahuellamiento, pero es más susceptible a sufrir daños producto de la humedad. Mientras que, si aumenta el contenido de asfalto con respecto al óptimo, la mezcla sufre mayor ahuellamiento, pero es menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad, manteniendo constante la cantidad de vacíos de la mezcla (7 ± 1 %).

Un factor importante a considerar en el desempeño de la mezcla, es el envejecimiento aplicado a ésta. Debido que, al evaluar una mezcla envejecida, las deformaciones plásticas o ahuellamiento, son menores con respecto a las deformaciones registradas en mezclas no envejecidas. Esto se debe principalmente a que, al envejecer la mezcla, ésta se rigidiza. Dejando poca libertad a los áridos dentro de la mezcla para que puedan desplazarse y en consecuencia se registran deformaciones menores.

Al relacionar los resultados obtenidos en los distintos ensayos, se concluye que, en mezclas envejecidas a mayor contenido de asfalto con respecto al óptimo, existe una mayor deformación plástica y la mezcla es menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad. Esta hipótesis, es la única que se comprueba de forma empírica.

ii. Efecto del % de CA en pruebas de desempeño HWT, TSR y Adherencia Pasiva, usando el contenido óptimo de asfalto (5,1% CA-24) y aditivos mejorador de

adherencia (5,1% CA-24 + AMA) y aditivo mejorador de trabajabilidad (5,1% CA-24 + AMT).

Al someter a pruebas de desempeño mezclas elaboradas con el contenido óptimo de asfalto, sin aditivos, con aditivo mejorador de adherencia y con aditivo mejorador de trabajabilidad, se observan comportamientos de la mezcla que se generalizan de la siguiente forma:

- En mezclas envejecidas y no envejecidas, concluye que, a mayor deformación plástica, la mezcla es más susceptible a sufrir daños producto de la humedad.
- Por otro lado, se concluye que mientras mayor sea la adherencia entre el CA y el árido, la mezcla es menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad.

Al unificar las hipótesis planteadas en estas conclusiones, se generaliza el desempeño de estas mezclas como “Al lograr mayor adherencia entre el CA y el árido, la mezcla sufrirá menor ahuellamiento y será menos susceptible a sufrir daños producto de la humedad”.

Todas las afirmaciones planteadas en estas conclusiones se comprobaron de forma empírica a través de ensayos Rueda de Hamburgo (HWT) usando norma UNE 12697-22 y AASHTO T324-14, ensayo de Tracción Indirecta (TSR) y ensayo de Adherencia Pasiva según norma XP T66-043.

6. REFERENCIAS

[1] Dimensionamiento y Características Red Vial Nacional 2016, Departamento de Gestión Vial. Año 2016, Editado 2017.

[2] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). AASHTO T 324-14. USA, 2014.

[3] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixture to Moisture-Induced Damage. AASHTO T 283-14. USA, 2014.

[4] Asociación Española de Normalización y Certificación (UNE). Mezclas bituminosas: "Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente", Parte 22: Ensayo de rodadura. UNE-EN 12697-22: +A1. AENOR. Año 2008. Madrid, España.

[5] Association Française de Normalisation (AFNOR). Ligantes de hidrocarburos: Método para determinar la adherencia pasiva de los ligantes anhidros en presencia de agua. XP T66-043. Francia, 2006.

[6] "Curso de Laboratorista Vial", Laboratorio Nacional de Vialidad, Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, Volumen VI, 5º Edición. Enero 2000, Chile.

[7] Salazar, J. Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Año 2011, Costa Rica.

[8] Silva, J. Ligantes asfálticos y sellos de juntas. Laboratorio Nacional de Vialidad, Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, Año 2015, Santiago de Chile.

[9] Naveda Hidalgo, Luis Alberto. "Incidencia del contenido de arena de río en la deformación permanente de las mezclas asfálticas". Tesis (Ingeniero Civil), Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Año 2014, Guayaquil, Ecuador.

[10] Warh Daniel, Carlos. Apuntes del Curso Vialidad II. Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María. Año 2017, Valparaíso, Chile.

[11] Peña, Yader. "El cemento asfáltico, usos y obtención". Extraído desde página web elcementoasfaltico.blogspot.com. Noviembre 2013.

[12] Marcozzi, R y Morea, F. Mezclas asfálticas semicalientes elaboradas con aditivos tensoactivos. Estudios comparativos del comportamiento mecánico respecto a las mezclas en caliente convencionales. XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA). Año 2011, Río de Janeiro, Brasil.

[13] Padilla Rodríguez, Alejandro. "Análisis de resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista". Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña. Año 2004, México.

[14] Smith, M.R. and Collins, L. (1994). Áridos naturales y de machaqueo para la construcción (ed Colegio Oficial de Geólogos de España); editado en versión española por L. Suárez y M. Regueiro. Año 2015, Cataluña, España.

[15] Zuñiga C., Rosa. “Mezclas asfálticas en caliente”. Curso Laboratorista Vial C. Laboratorio Nacional de Vialidad. Junio 2015. Chile.

[16] Asphalt Institute. MS-2 Asphalt mix design methods. 7ta Ed. USA, 2014.

[17] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA). AASHTO T 209-12. USA, 2012.

[18] Garnica A., Paul, Delgado A., Horacio, Gómez L., José, Alonso R., Sergio y Alarcón O., Humberto. “Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas”. Publicación Técnica Nº 246. Instituto Mexicano del Transporte. Año 2004. Querétaro, México.

[19] Kandal, P., Foo, K. and Mallick, R. Critical review of voids in mineral aggregate requirements in Superpave. Transportation Research Record (Journal of the Transportation Research Board). Nº 2180. Año 1998, Washington, USA.

[20] Albornoz L., N. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas en caliente con RAP y comprobación de la fórmula de trabajo a través de la metodología del polígono de vacíos. Tesis (Construcción Civil). Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Año 2012. Santiago, Chile.

[21] Padilla Rodríguez, Alejandro. “Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos”. Tesis de Grado. Universidad Politécnica de Cataluña. Año 2007. México.

[22] Huamán Guerrero, Néstor W. La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. Tesis. (Magister en ciencias con mención en ingeniería de transportes). Universidad Nacional de Ingeniería. Año 2011. Lima, Perú.

[23] Romero L., F., Delgado A., H., Ayala T., Y. y Garnica A., Paul. Influencia de la variación de parámetros de diseño en la deformación permanente de mezclas asfálticas de alto desempeño. Congreso Mexicano de Asfalto. Año 2017. Cancún, México.

[24] Valdéz, Calabi, Sanchez, Miró & Reyes. Matriz árido-ligante: Factores implicados en la capacidad adhesiva y cohesiva del ligante asfáltico. Revista Ingeniería de Obras Civiles (RIOC). Universidad de la Frontera. Año 2015. Chile.

[25] Read, J. and Whiteoak, D. The Shell Bitumen Handbook. United States Patent and Trademark Office. 5º Edition. USA, 2003.

[26] MS-26 The Asphalt Binder Handbook. Asphalt-Institute.1º Edition. USA, May 2011.

[27] Malan, G., Strauss, P. and Hugo, F. A Field Study of Premature Surface Cracking in Asphalt. Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 58, pp. 142-162. USA, 1989.

[28] Kandhal, P. S. and Chakraborty, S. Evaluation of Voids in The Mineral Aggregates for HMA Paving Mixtures. NCAT Report Nº 96-4. National Center for Asphalt Technology. March 1996, USA.

[29] Sengoz, B. and Agar, E. Effect of Asphalt Film Thickness on the Moisture Sensitivity Characteristics of Hot-Mix Asphalt. Build Environment. p. 3621–3628, 2007.

[30] Moreno Chávez, M. Efecto de la presencia de humedad en el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a ensayo de rueda de carga (Norma NLT-173/84). Tesis (Ingeniero Civil). Universidad de Chile. Septiembre, 2011. Santiago, Chile.

[31] Cáceres Morales, C. Capítulo 4: Pruebas de desempeño para mezclas asfálticas. Tesis (Ingeniero Civil). Universidad de las Américas de Puebla. Noviembre, 2007. Puebla, México.

[32] Plaza Torralvo, S. y Rincón Caicedo, G. Estudio de la susceptibilidad al daño or humedad de una mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su relación con el desempeño de campo. Tesis (Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Javeriana. Enero, 2014. Bogotá, Colombia.

[33] Moisture Damage Performance Test of Asphalt Mixtures: A Review. Journal of Industrial Engineering Research. P. 7-15. September, 2015.

[34] Botasso, G., Rebollo, O., Soengas, C., Balige, M., Bisio, A. y Berardo, A. Metodología para la Evaluación de Promotores de Adherencia en Cementos Asfálticos. XVI CILA - Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. Año 2011. Río de Janeiro, Brasil.

[35] Aranda Bohm, J. Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente utilizando ensayo de tracción indirecta. Tesis (Ingeniero Civil). Universidad Técnica Federico Santa María. Junio, 2017. Valparaíso, Chile.

[36] Boyes, A. J. (2011). Reducing Moisture Damage in Asphalt Mixes Using Recycled Waste Additives. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, California.

[37] Mercado, E. A. Influence of fundamental material properties and air void structure on moisture damage of asphalt mixes. Texas A&M University. May, 2007. USA.

[38] Miller, J.S. and BELLINGER, W.Y. Distress identification manual for the long-term pavement performance program. US Department of Transportation. June, 2003. USA.

[39] Copeland, A.R. Influence of moisture on bond strength of asphalt-aggregate systems. Doctor of Philosophy Vanderbilt University. 2007.

[40] Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M. and Tandon, V. Test methods to predict moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements. Transportation Research Board National Seminar. P. 77-110. San Diego, California.

[41] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Method of Test for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures. AASHTO T 165. USA, 2002.

[42] American Society of Testing Materials. ASTM D 1075

[43] ASTM D 4867: Resistencia de mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad.

[44] Asociación Española de Normalización y Certificación. Mezclas bituminosas: Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio. UNE-EN 12697-35: 2006 +A1. AENOR. 2008. Madrid, España.

[45] Asociación Española de Normalización y Certificación. Mezclas bituminosas: Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 31: Preparación de la muestra mediante compactador giratorio. UNE-EN 12697-31. AENOR. Enero, 2008. Madrid, España.

[46] Asociación Española de Normalización y Certificación. Mezclas bituminosas: Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático. UNE-EN 12697-6: 2003 +A1. AENOR. Diciembre, 2007. Madrid, España.

[47] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor. AASHTO T 312-15. USA, 2015.

[48] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA). AASHTO Designation R 30-02. USA, 2002.

[49] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures. AASHTO Designation R 35-15. USA, 2015.

[50] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens. AASHTO T 166-13. USA, 2013.

[51] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Method of Test for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures. AASHTO T 269-14. USA, 2014.

7. ANEXOS

7.1. RESULTADOS DE ENSAYOS FÍSICO QUÍMICO DE LIGANTES CON ADITIVOS

Tabla 7-1. Ensayo físico químico del ligante CA-24 + AMA.

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación
Viscosidad a 60 °C	Poises	2994	Mín. 2400
Ductilidad a 25 °C, 5cm./min., cm.	Cm	>100	Mín. 100
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	0,1 mm	60	Mín. 40
Ensayo de la mancha, 30% Xilol	-	Negativo	Máx. 30
Solubilidad en Tricloroetileno	%	>99	Mín. 99
Punto de ablandamiento	°C	49,6	Informar
Punto de inflamación	°C	318	Mín. 232
Punto de penetración	°C	-0,9	Mín. -2,0 Máx. +1,0
Película Delgada Rotatoria			
Pérdida por Calentamiento	%	0,01	Máx. 0,8
Viscosidad a 60 °C	Poises	6493	Informar
Ductilidad a 25 °C, 5 cm./min., cm.	Cm	>100	Mín. 100
Índice de Durabilidad	-	2,2	Máx. 4,0
Temperatura de Compactación	°C	143 ± 5	Informar
Temperatura de Mezclado	°C	153 ± 5	Informar
Densidad	Kg/m3	1035	Informar

Tabla 7-2. Ensayo físico químico del ligante CA-24 + AMT.

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación
Viscosidad a 60 °C	Poises	2994	Mín. 2400
Ductilidad a 25 °C, 5cm./min., cm.	Cm	>100	Mín. 100
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	0,1 mm	60	Mín. 40
Ensayo de la mancha, 30% Xilol	-	Negativo	Máx. 30
Solubilidad en Tricloroetileno	%	>99	Mín. 99
Punto de ablandamiento	°C	49,6	Informar
Punto de inflamación	°C	318	Mín. 232
Película Delgada Rotatoria			
Pérdida por Calentamiento	%	0,01	Máx. 0,8
Viscosidad a 60 °C	Poises	6493	Informar
Ductilidad a 25 °C, 5 cm./min., cm.	Cm	>100	Mín. 100
Índice de Durabilidad	-	2,2	Máx. 4,0
Temperatura de compactación	°C	143 ± 5	Informar
Temperatura de Mezclado	°C	153 ± 5	Informar
Densidad	Kg/m3	1035	Informar

7.2. ANTECEDENTES DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA MEZCLA DISEÑADA

Tabla 7-3. Dosificación y granulometría del diseño de la mezcla de áridos.

DOSIFICACION		G. 3/4" 26%	G. 1/2" 26%	PR 48%
GRANULOMETRIA DE MEZCLA DE ARIDOS				
TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA EN PESO (%)	ESPECIFICACION IV-A-12	
ASTM	mm		Mín.	Máx.
3/4"	19	100	100	100
1/2"	12,5	84	80	95
378"	9,5	71	70	85
Nº 4	4,75	46	43	58
Nº 8	2,36	32	28	42
Nº 30	0,6	16	13	24
Nº 50	0,3	11	8	17
Nº 100	0,15	8	6	12
Nº 200	0,075	5,3	4	8

Tabla 7-4. Características del diseño de la mezcla.

ENSAYO		UNIDAD	VALOR	ESPECIFICACION	
Partículas chancadas	(2 caras)	(%)	100	mín.	90
Partículas lajeadas		(%)	1,4	máx.	10
Índice de Lajas		(%)	12		
Desgaste Los Ángeles		(%)	14	máx.	25
Índice de plasticidad		(%)	N.P.		N.P.
Sales solubles		(%)	no contiene	máx.	2
Adherencia Método Estático :		(%)	≥ 95	mín.	95
Adherencia Método Dinámico :		(%)	≥ 95	mín.	95
Adherencia Riedel - Weber		(%)	3 - 10	mín.	0 - 5
Equivalente de Arena		(%)	73	mín.	50
Desintegración en Sulfato de Sodio F. Gruesa		(%)	1,4	máx.	12
Desintegración en Sulfato de Sodio F. Fina		(%)	2,2	máx.	15
Densidad real seca ponderada		(Kg/m^3)	2664		
Densidad Máxima Mezcla (DMM) para	(5,5 % de asf)	(Kg/m^3)	2469	[CA Dens=1.010]	
Densidad efectiva		(Kg/m^3)	2682		
Absorción de asfalto		(%)	0,26		

Tabla 7-5. Parámetros Marshall.

PARÁMETROS MARSHALL				CERTIFICADO D 029/17-a			
	75 golpes por cara (TP)						
CA-24*	(% ref. ag.)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	**Rangos**
Asfalto Total	(% ref. ag.)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	
DMM	(Kg/m^3)	2.504	2.486	2.469	2.452	2.436	
Densidad Hidrostática	(Kg/m^3)	2.326	2.356	2.358	2.348	2.338	
Huecos	(%)	7,1	5,2	4,5	4,3	4,0	**4 - 6**
V.A.M.	(%)	16,5	15,8	16,1	16,9	17,6	**Mín. 14**
Huecos Llenos	(%)	57	67	72	75	77	
Fluencia	(0,01")	9,3	9,7	10,0	10,3	11,3	**8 - 16**
Estabilidad	(N)	11.356	11.982	12.474	12.156	11.536	**Mín. 9.000**
Razón Filler/Asfalto		1,18	1,06	0,96	0,88	0,82	
Relac Estab/Fluencia	(Kg/cm)	5.000	5.058	5.107	4.831	4.177	

*Procedencia: Probisa con Densidad (Batch) = 1.010 (gr/cm^3)

Temperatura mezclado probetas en laboratorio = 152 °C +/- 3 °C
Temperatura compactación probetas en laboratorio = 141 °C +/- 3 °C

Según M.C.V.8 8.302.47 :				
	Óptimo por densidad	=	5,3	
	Óptimo por estabilidad	=	5,0	
	Óptimo para 5,0 % de huecos	=	5,1	
	Óptimo a usar	**=**	**5,1**	**+/- 0,3**

7.3. CONFECCION DE PROBETAS SEGÚN TIPO DE COMPACTACIÓN

7.3.1. Confección de probetas tipo COMPACTADOR GIRATORIO (PCG).

CONFECCION DE BRIQUETAS Tipo COMPACTADOR GIRATORIO

Material	Mallas	% ret.	Mezcla	Peso parcial	Peso total para 16 briquetas
0	19 - 12,5	64	26,0	815,36	13046
3/4"	12,5 - 9,5	31	26,0	394,94	6319
CONCEPCION	9,5 - 4,75	4	26,0	50,96	815,4
	4,75 - 2,36		26,0		
	bajo 2,36	1	26,0	12,74	203,8
0	19 - 12,5		26,0		
1/2"	12,5 - 9,5	17	26,0	216,58	3465
CONCEPCION	9,5 - 4,75	81	26,0	1031,94	16511
	4,75 - 2,36	1	26,0	12,74	203,8
	bajo 2,36	1	26,0	12,74	203,8
0	12,5 - 9,5		48,0		
0	9,5 - 4,75		48,0		
0	4,75 - 2,36	33	48,0	776,16	12419
	bajo 2,36	67	48,0	1575,84	25213
0	12,5 - 9,5				
0	9,5 - 4,75				
0	4,75 - 2,36				
	bajo 2,36				
	19 - 12,5				
0	12,5 - 9,5				
0	9,5 - 4,75				
0	4,75 - 2,36				
	bajo 2,36				
	19 - 12,5				
0	12,5 - 9,5				
0	9,5 - 4,75				
0	4,75 - 2,36				
	bajo 2,36				
			Total	4900	78400

Cemento Asfáltico
BATCH
Temp. Mezclado
Temp. Comp.

Diámetro = 150

Intervalo Altura

99 - 157,5

Masa Ideal
0
Masa Mínima
0
Masa Máxima
0
Masa a Usar
4900
Altura mm

7.3.2. Confección de probetas tipo MARTILLO MARSHALL.

CONFECCION DE BRIQUETAS Tipo MARTILLO MARSHALL

Material	Mallas	% ret.	Mezcla	Peso parcial	Peso total para 16 briquetas
0	19 - 12,5	64	26,0	183,04	2929
3/4"	12,5 - 9,5	31	26,0	88,66	1419
CONCEPCION	9,5 - 4,75	4	26,0	11,44	183
	4,75 - 2,36		26,0		
	bajo 2,36	1	26,0	2,86	45,76
0	19 - 12,5		26,0		
1/2"	12,5 - 9,5	17	26,0	48,62	777,9
CONCEPCION	9,5 - 4,75	81	26,0	231,66	3707
	4,75 - 2,36	1	26,0	2,86	45,76
	bajo 2,36	1	26,0	2,86	45,76
0	12,5 - 9,5		48,0		
0	9,5 - 4,75		48,0		
0	4,75 - 2,36	33	48,0	174,24	2788
	bajo 2,36	67	48,0	353,76	5660
0	12,5 - 9,5				
0	9,5 - 4,75				
0	4,75 - 2,36				
	bajo 2,36				
	19 - 12,5				
0	12,5 - 9,5				
0	9,5 - 4,75				
0	4,75 - 2,36				
	bajo 2,36				
	19 - 12,5				
0	12,5 - 9,5				
0	9,5 - 4,75				
0	4,75 - 2,36				
	bajo 2,36				
			Total	1100	17600

Cemento Asfáltico
BATCH
Temp. Mezclado
Temp. Comp.

Diámetro = 150

Intervalo Altura

99 - 157,5

Masa Ideal
0
Masa Mínima
0
Masa Máxima
0
Masa a Usar
1100
Altura mm

7.4. EJEMPLO DE INFORME ENTRAGADO POR LA MÁQUINA PARA ENSAYO HWT

CDI centro de desarrollo e investigación	Cerro Sombrero N° 1020 Maipu, Santiago - Chile Fono: 56 2 26759240 info@centro-cdi.cl	MEZCLA :	CARPETA 20 MM
		N° DISEÑO :	D044-17
		PLANTA :	CHILLAN

REPORTE ENSAYO RUEDA CARGADA EQUIPO HAMBURGO					
Descripción	H 076 Estudio de adherencia CA 24, acondicionado 4h a 135, compactado a 143, proce				
Número de Ensayo	H 076				
Nombre Operador Laboratorista	Jennifer Quezada				
Fecha	15 de noviembre de 2017		Densidad Marshall ref. [g/cm³]:		2358
METODO DE ENSAYO					
Descripción / Norma	Adapatación de Probetas de Compactador Giratorio (PCG) y AASHTO T324				
Medio de Acondicionamiento	Aire				
Temperatura Aire [°C]	60,23	Temperatura Baño de agua [°C]			60,09
Tiempo de Acondicionamiento [hrs]	4				
Rueda	☐ Acero Inoxidable (Ø 203,5 x 47)				
	☑ Acero Inoxidable con Superficie de Caucho (Ø 203,5 x 47 mm)				
Carga [N]	700				
Información Complementaria					
PROBETA 1					
Descripción					
No. de Registro en Base de Datos	2512				
Identificación	2512				
Origen / Fabricación / Compactación			Estudio / CDI / GIRATORIA	N° Giros	37
Ligante Asfáltico	CA 24				
Contenido Asfalto [%]	5,1				
Dimensiones L x Ø x H [mm]	240	150	63,7		
Densidad [g/cm³]	2281				
Compactación ref. D. Marshall [%]	96,73452078				
Información Complementaria					
PROBETA 2					
Descripción					
No. de Registro en Base de Datos	2513				
Identificación	2513				
Origen / Fabricación / Compactación			Estudio / CDI / GIRATORIA	N° Giros	37
Ligante Asfáltico	CA 24				
Contenido Asfalto [%]	5,1				
Dimensiones L x Ø x H [mm]	240	150	62,8		
Densidad [g/cm³]	2295				
Compactación ref. D. Marshall [%]	97,32824427				
Información Complementaria					

RESULTADOS DEL ENSAYO	PROBETA	Ahuellamiento [mm]		Porcentaje Deformación [%]	
10.000 PASADAS	2512	6,64	mm	10,42	[%] ref espesor
	2513	6,58	mm	10,48	[%] ref espesor
	PROMEDIO	6,61	mm	10,45	[%] ref espesor
	EXIGENCIA		mm		[%] ref espesor
20.000 PASADAS	2512	8,48	mm	13,31	[%] ref espesor
	2513	7,85	mm	12,50	[%] ref espesor
	PROMEDIO	8,17	mm	12,91	[%] ref espesor
	EXIGENCIA		mm	10,00	[%] ref espesor

PENDIENTE DEFORMACIÓN	2512	2513,00	PROMEDIO	EXIGENCIA
WTS AIRE $(d_{2.000} - d_{1.000})/1$	1,15	0,93	1,04	[mm/1.000 ciclos]
WTS AIRE $([d_{5.000} - d_{2.500}]/2,5)$	0,604	0,56	0,58	[mm/1.000 ciclos]
WTS AIRE $([d_{10.000} - d_{5.000}]/5)$	0,368	0,25	0,31	1,50 [mm/1.000 ciclos]

7.4.1. Profundidad de la huella v/s Nº de pasadas entregado por la máquina

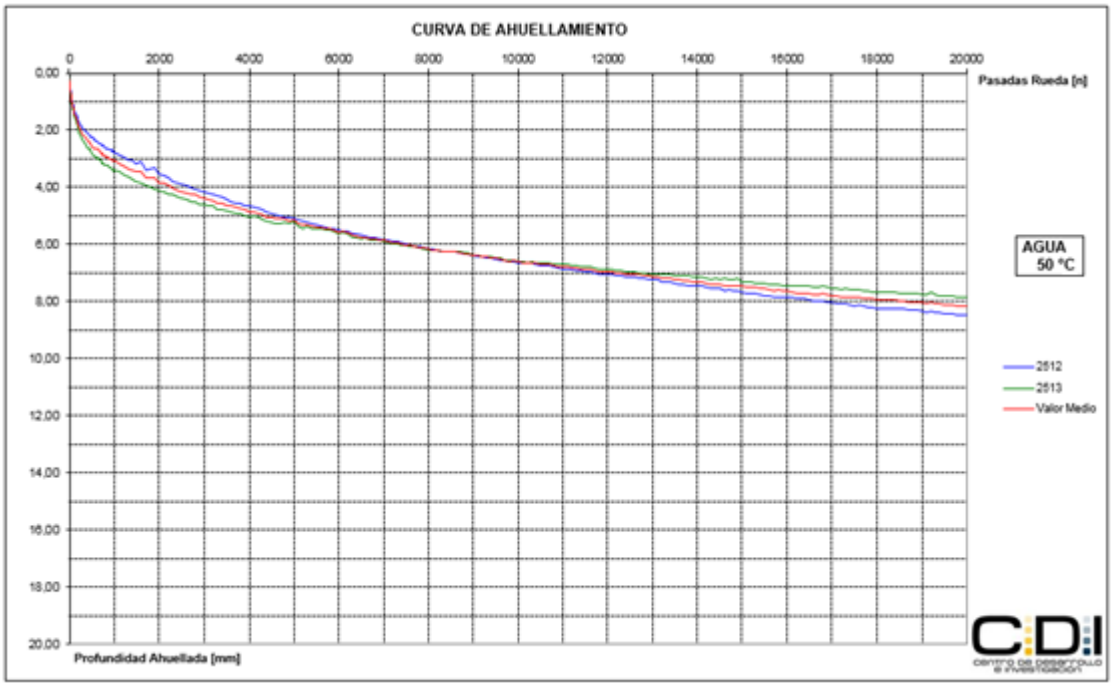


Gráfico 7-1. Profundidad de la huella vs Nº de pasadas ensayo Rueda de Hamburgo.

7.4.2. Curva de Temperatura entregado por la máquina

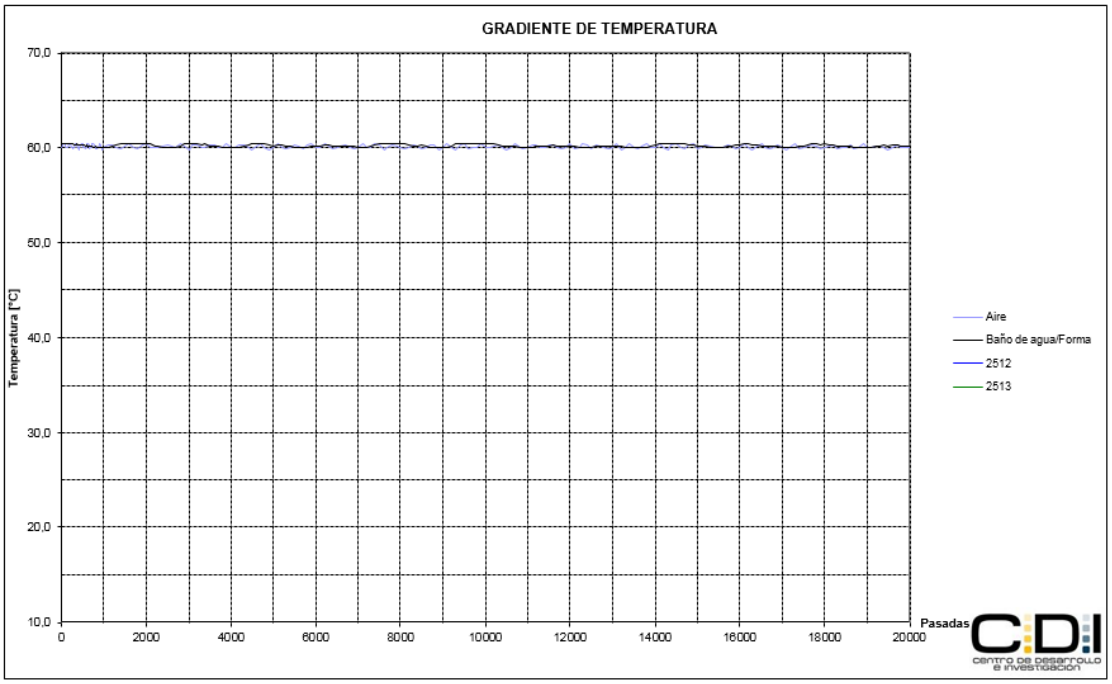


Gráfico 7-2. Curva de Temperatura en ensayo Rueda de Hamburgo.

7.4.3. Perfil longitudinal de la Probeta 1

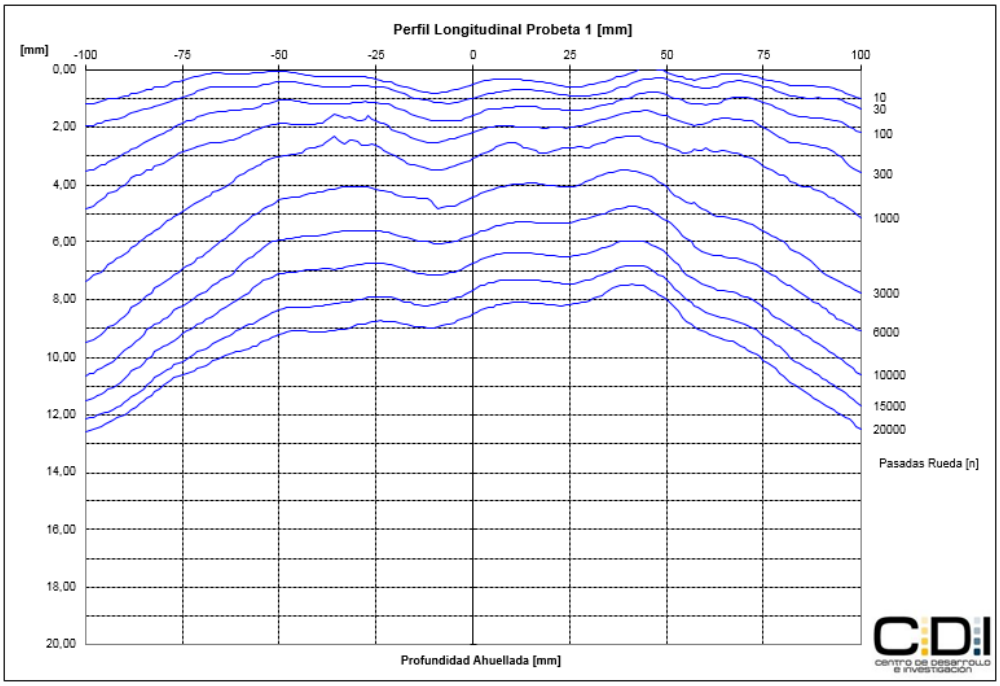


Gráfico 7-3. Perfil longitudinal de Probeta 1 en ensayo Rueda de Hamburgo.

7.4.4. Perfil longitudinal de la Probeta 2

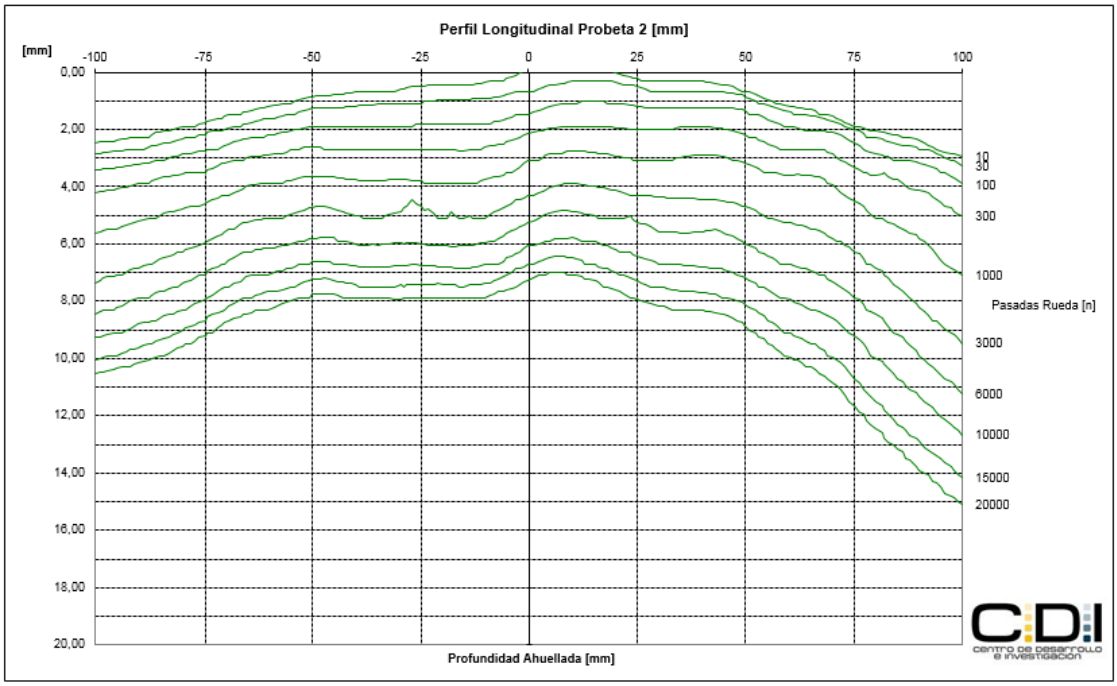


Gráfico 7-4. Perfil longitudinal de Probeta 2 en ensayo Rueda de Hamburgo.

7.5. PROPIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DE PROBETAS UTILIZADAS EN ENSAYO TSR

Tabla 7-6. Propiedades y resultados de probetas elaboradas con diferente contenido de asfalto para ensayo TSR

% CA24	4,7% CA-24						5,1% CA-24						5,5% CA-24					
N° briqueta	6	9	12	3	8	11	1	2	4	5	6	9	3	4	9	5	6	7
P. material	1099,3	1098,2	1099,3	1098,9	1097,5	1098,2	1097,9	1097	1096,4	1096,5	1099	1099,4	1101,3	1097,2	1099,5	1098,2	1098,4	1098,6
P. asfalto	51,7	51,6	51,7	51,6	51,6	51,6	56,0	55,9	55,9	55,9	56,0	56,1	60,6	60,3	60,5	60,4	60,4	60,4
Total	1151,0	1149,8	1151,0	1150,5	1149,1	1149,8	1153,9	1152,9	1152,3	1152,4	1155,0	1155,5	1161,9	1157,5	1160,0	1158,6	1158,8	1159,0
Altura	6,25	6,27	6,23	6,35	6,24	6,2	6,25	6,29	6,34	6,32	6,36	6,46	6,42	6,33	6,34	6,35	6,33	6,43
Diametro	10,14	10,12	10,12	10,15	10,09	10,13	10,14	10,11	10,11	10,12	10,14	10,14	10,13	10,12	10,11	10,14	10,13	10,13
P. aire	1141,4	1142,6	1143,5	1138,9	1139,4	1142,7	1138,2	1138,1	1141,3	1143,3	1141,6	1145,7	1147,5	1141,7	1148,5	1145	1140,5	1152,1
P. agua	655,9	660,3	659,4	655,6	657,5	659,1	655	652,1	652,1	656,6	654,4	658,1	655	652,9	657,6	652,7	653,1	653,5
P. sss	1146,6	1146,8	1148	1145,2	1143,6	1146,2	1144,1	1144,2	1145,9	1148,2	1146,8	1155	1155	1145,7	1155,9	1149,1	1145,6	1155,4
Volumen	492,1271688	487,914953	490,021061	491,02397	487,51379	488,516698	490,52	493,53	495,24	493,03	493,83	498,35	501,45	494,23	499,75	497,84	493,93	503,36
Densidad	2,319	2,342	2,334	2,319	2,337	2,339	2,320	2,306	2,305	2,319	2,312	2,299	2,288	2,310	2,298	2,300	2,309	2,289
% Vacios	**7,4**	**6,5**	**6,8**	**7,4**	**6,7**	**6,6**	**6,6**	**7,2**	**7,3**	**6,7**	**7,0**	**7,5**	**7,5**	**6,7**	**7,1**	**7,1**	**6,7**	**7,5**
DMM	2505						2485						2475					
Condicion	Agua			Seco			Agua			Seco			Agua			Seco		
SATURACIÓN																		
Altura'	6,26	6,28	6,25	6,35	6,24	6,2	6,24	6,27	6,30	6,32	6,36	6,46	6,44	6,34	6,36	6,35	6,33	6,43
Diámetro '	10,14	10,12	10,12	10,15	10,09	10,13	10,14	10,11	10,12	10,12	10,14	10,14	10,13	10,12	10,11	10,14	10,13	10,13
P. sss '	1169,44	1164,94	1167,02				1163,3	1165,8	1169,6				1174,65	1165,96	1173,86			
Vol. Agua abs.	28,04	22,34	23,52				25,1	27,7	28,3				27,15	24,26	25,36			
Vol. Vacíos aire	36,48	31,79	33,53				32,49	35,54	35,96				37,82	32,94	35,71			
% Saturación	76,87	70,28	70,14				77,24	77,93	78,70				71,79	73,65	71,02			
(55 - 80) %	72,43						77,96						72,15					
Lect. Carga	168	175	180	248	256	249	113	169	177	207	196	168	159	194	183	228	218	192
Convers. Carga	7263,40	7564,69	7779,84	10700,98	11044,05	10743,87	4892,78	7306,45	7650,76	8940,79	8467,98	7263,40	6875,89	8381,99	7908,90	9842,76	9413,36	8295,99
Trac. Ind. [kPa]	728,46	757,76	783,05	1056,97	1116,69	1089,03	492,28	733,78	763,95	889,94	835,92	705,91	670,99	831,68	783,05	973,16	934,57	810,83
Promedio	756,42			1087,56			663,34			810,59			761,91			906,19		
TSR	69,6						81,8						84,1					

Tabla 7-7. Propiedades y resultados de probetas elaboradas con contenido óptimo de asfalto, con y sin aditivos, para ensayo TSR.

% CA24	5,1% CA-24						5,1% CA-24 + AMA						5,1% CA-24 + AMT					
N° briqueta	1	2	4	5	6	9	6	7	12	5	8	9	8	11	12	10	13	14
P. material	1097,9	1097	1096,4	1096,5	1099	1099,4	1097,9	1098,2	1099,5	1096,4	1098,6	1098,8	1098,3	1098,4	1098,4	1098,3	1098,9	1098,3
P. asfalto	56,0	55,9	55,9	55,9	56,0	56,1	56,0	56,0	56,1	55,9	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0
Total	1153,9	1152,9	1152,3	1152,4	1155,0	1155,5	1153,9	1154,2	1155,6	1152,3	1154,6	1154,8	1154,3	1154,4	1154,4	1154,3	1154,9	1154,3
Altura	6,25	6,29	6,34	6,32	6,36	6,46	6,265	6,38	6,32	6,324	6,32	6,38	6,33	6,31	6,34	6,38	6,29	6,31
Diametro	10,14	10,11	10,11	10,12	10,14	10,14	10,15	10,13	10,18	10,13	10,16	10,14	10,15	10,13	10,14	10,14	10,14	10,14
P. aire	1138,2	1138,1	1141,3	1143,3	1141,6	1145,7	1138,1	1142,2	1144,4	1140,3	1144,6	1144	1142,8	1144,8	1140,6	1144,8	1143,6	1144,8
P. agua	655	652,1	652,1	656,6	654,4	658,1	652,4	656,7	660,3	652,3	659,8	658,4	656,5	658,4	653,2	655,4	657,3	658,3
P. sss	1144,1	1144,2	1145,9	1148,2	1146,8	1155	1143,7	1150,2	1151,6	1143,5	1152,6	1151,9	1151,8	1149,3	1147,7	1152	1149,4	1150,1
Volumen	490,52	493,53	495,24	493,03	493,83	498,35	492,73	494,94	492,73	492,63	494,23	494,94	496,74	492,33	495,94	498,04	493,53	493,23
Densidad	2,320	2,306	2,305	2,319	2,312	2,299	2,310	2,308	2,323	2,315	2,316	2,311	2,301	2,325	2,300	2,299	2,317	2,321
% Vacios	**6,6**	**7,2**	**7,3**	**6,7**	**7,0**	**7,5**	**7,0**	**7,1**	**6,5**	**6,8**	**6,8**	**6,9**	**7,5**	**6,5**	**7,5**	**7,5**	**6,8**	**6,6**
DMM	2485						2484						2486					
Condicion	Agua			Seco			Agua			Seco			Agua			Seco		
SATURACIÓN																		
Altura'	6,24	6,27	6,30	6,32	6,36	6,46	6,24	6,37	6,33	6,31	6,32	6,38	6,31	6,3	6,3	6,37	6,28	6,28
Diámetro '	10,14	10,11	10,12	10,12	10,14	10,14	10,12	10,14	10,21	10,13	10,16	10,14	10,14	10,19	10,3	10,14	10,14	10,14
P. sss '	1163,3	1165,8	1169,6				1163,2	1168,8	1169,4				1168,7	1168,5	1170,8			
Vol. Agua abs.	25,1	27,7	28,3				25,1	26,6	25				25,9	23,7	30,2			
Vol. Vacíos aire	32,49	35,54	35,96				34,56	35,11	32,02				37,05	31,83	37,13			
% Saturación	77,24	77,93	78,70				72,63	75,76	78,08				69,91	74,46	81,34			
(55 - 80) %	77,96						75,49						75,24					
Lect. Carga	113	169	177	207	196	168	230	173	181	219	162	174	167	179	220	182	181	202
Convers. Carga	4892,78	7306,45	7650,76	8940,79	8467,98	7263,40	9928,62	7478,62	7822,86	9456,31	7005,08	7521,65	7220,35	7736,81	9499,26	7865,88	7822,86	8725,91
Trac. Ind. [kPa]	492,28	733,78	763,95	889,94	835,92	705,91	1000,93	737,10	770,58	941,81	694,52	740,18	718,41	767,23	931,95	775,27	782,07	872,35
Promedio	663,34			810,59			836,20			792,17			805,86			809,90		
TSR	81,8						105,6						99,5					