



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

EFFECTO DE LA PRESENCIA DE HUMEDAD EN EL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SOMETIDAS A ENSAYO DE RUEDA DE CARGA (NORMA NLT-173/84)

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MARCELO ANDRÉS MORENO CHÁVEZ

PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEBROS DE LA COMISIÓN:
GABRIELA MUÑOZ ROJAS
GUSTAVO GONZÁLEZ REVECO

SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2011

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: MARCELO MORENO CHÁVEZ
FECHA: 16/11/2011
PROF. GUÍA: SR. FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

EFFECTO DE LA PRESENCIA DE HUMEDAD EN EL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SOMETIDAS A ENSAYO DE RUEDA DE CARGA (NORMA NLT-173/84)

Para determinar la susceptibilidad al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, el Manual de Carreteras (M.C.) especifica el ensayo "Método para determinar la deformación en mezclas asfálticas utilizando la máquina de ahuellamiento" homologado de la norma NLT-173/84, ensayo que considera alta temperatura ambiente (60 °C) y una presión de contacto rueda-probeta de 9 kgf/cm². No obstante esta especificación no incluye como factor la presencia de agua superficial, condición que sí se considera en otras normas internacionales por su importante influencia en la pérdida de adherencia entre el cemento asfáltico y el sustrato mineral.

En este trabajo de título se investigan alternativas para adaptar la especificación antes mencionada, incorporando el factor agua superficial bajo la rueda y manteniendo las otras condiciones.

Para ello se diseñó un programa de ensayos que, en una primera parte, aborda el estudio del comportamiento de mezclas asfálticas sometidas al ensayo NLT 173/84 y al ensayo AASHTO T324-04 "Hamburg Wheel Tracking Device". Para realizar esta investigación se utilizan dos tipos de cemento asfáltico, el CA24 y cemento asfáltico modificado con polímeros y además se incorpora un aditivo promotor de adherencia a cada uno de ellos. Por otra parte se varía el método de compactación de las probetas, utilizando la compactación de placa vibratoria del método NLT-173/84 y compactación mediante el compactador giratorio. Posteriormente en una segunda etapa, el estudio evalúa un ensayo alternativo de ahuellamiento incorporando agua superficial en la interfaz rueda-probeta en el ensayo NLT 173/84 y compara los resultados con el método NLT normal y con el método de Hamburgo.

De los resultados obtenidos se pudo concluir que el aditivo promotor de adherencia mejora el comportamiento en deformación permanente de mezclas asfálticas tanto en el ensayo seco como en el ensayo estándar Hamburg Wheel Tracking Device, al retardar la pérdida de adherencia del cemento asfáltico con el sustrato mineral. En efecto, en el ensayo NLT 173/84 se observó una disminución en la velocidad de deformación para las probetas con aditivo de entre un 31% y 48%, mientras que en el ensayo con la máquina de Hamburgo se logró retardar el inicio del desprendimiento del cemento asfáltico ("stripping") 50 minutos llegando incluso a su total supresión.

Al comparar el comportamiento de los diferentes cementos asfálticos considerados en el ensayo NLT modificado en medio húmedo, con respecto a su respuesta frente al ensayo NLT normal, se observa un aumento en las deformaciones de ahuellamiento, en aproximadamente un 100%, con respecto a las obtenidas en el ensayo normal, dentro del periodo estándar de 120 minutos. El desarrollo de "stripping" en el ensayo NLT modificado sólo ocurrió en las probetas confeccionadas con CA24, mientras que en la máquina de Hamburgo este fenómeno se desarrolló tanto en las probetas de CA24 como en las de cemento asfáltico modificado con polímeros sin aditivo promotor de adherencia.

Finalmente, comparando el ensayo NLT modificado con el Hamburg Wheel Tracking Device, se puede concluir que no obstante para algunos tipos de mezcla se percibe la pérdida de adherencia, en forma similar en ambos ensayos, no es posible obtener una correlación general entre ambos ensayos.

“Dedicado a mis padres Gladys y Antonio,
a mi hermana Gladys y a mi sobrino Matías”

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a mi Prof. Guía Sr. Federico Delfín, Co-Guía Sra. Gabriela Muñoz y Prof. De Comisión Sr. Gustavo González, por su apoyo y ayuda durante este largo proceso.

A la sección de pavimentación de Idiem, en forma muy especial a Cristián Díaz, Náyade Ramírez, Maximiliano Aliaga, Juan Carlos Verdugo, Juan Pablo Lobos y Daniela Zapata, por su cooperación, apoyo y tiempo que me brindaron en el laboratorio durante toda la etapa experimental de este trabajo.

Agradezco también al CDI de Bitumix por todo el apoyo, comprensión y las facilidades que me brindaron poniendo a disposición sus equipamientos y conocimiento.

No puedo olvidar a mis compañeros y amigos, con quienes pude hacer que esta larga y difícil estadía fuera más amena y entretenida, pasamos muchos momentos alegres y otros no tanto. Quiero agradecer especialmente a Osvaldo, Felipe, Mauricio, Sergio, Pablo, Eduardo, Pancho, Carlos y Manfred.

De todo corazón agradezco a mi familia, por su comprensión, apoyo incondicional y muy especialmente el amor que me han brindado siempre, en cada etapa de mi vida y especialmente en esta que hoy termina.

Para finalizar quiero agradecer a mi polola, Betzabé, por su comprensión, apoyo, consejo y el amor que me entrega siempre.

A todos ellos y muchos otros que también fueron parte de esta dura tarea, muchas gracias.

Índice General.

Índice de Figuras.	5
Índice de Tablas.	8
Capítulo 1.....	9
1.1 Motivación.	9
1.2 Importancia de la Investigación.....	10
1.3 Objetivos Generales.	11
1.4 Objetivos específicos.....	11
1.5 Alcances.....	11
1.6 Metodología.....	12
1.7 Diagrama de ensayos.....	13
Capítulo 2.....	15
2.1 Comportamiento plástico de las mezclas asfálticas.	15
2.1.1 Efecto de las distintas variables que afectan la deformación permanente en las mezclas asfálticas.....	18
2.2 Pérdida de afinidad agregado/ligante asfáltico: “Stripping”.	19
Capítulo 3.....	21
3.1 Ensayos de rueda de carga que sólo permiten condición seca.....	22
3.1.1 Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT).	22
3.1.2 Equipo para ensayo de Pista de Laboratorio	23
3.1.3 French Pavement Rutting Tester	24
3.2 Ensayos de rueda de carga que permiten condición bajo agua.	25
3.2.1 Asphalt Pavement Analyzer (APA)	25
3.2.2 Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD)	26
3.2.3 Purdue University Laboratory Wheel- Tracking Device	27
3.2.4 Model Mobile Load Simulator (MMLS3).....	28

Capítulo 4.....	30
4.1 Materiales.....	30
4.1.1 Áridos.....	30
4.1.2 Cementos Asfálticos.....	31
4.1.3 Mezcla de Áridos.....	36
4.1.4 Dosificación de la mezcla asfáltica según método Marshall.....	37
4.2 Confección de probetas.....	39
4.2.1 Secado del material granular.....	39
4.2.2 Corte de los materiales.....	39
4.2.3 Preparación de las bandejas.....	39
4.2.4 Mezclado de las probetas.....	40
4.2.5 Compactación de las probetas.....	40
4.3 Máquinas de ensayo.....	48
4.3.1 Máquina de la Rueda de Carga (Wheel Tracking) Laboratorio de asfaltos (IDIEM).	48
4.3.2 Máquina de ensayo Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD) Laboratorio CDI Bitumix.....	50
4.4 Ensayo de las probetas.....	52
4.4.1 Ensayo en Aire (ensayo en pista de laboratorio o ensayo de rueda de carga).....	52
4.4.2 Ensayo Húmedo.....	53
4.4.3 Ensayo en la máquina de Hamburgo (HWTD).....	55
4.4.4 Ensayo con probeta Superficialmente Seca.....	56
4.4.5 Ensayo con Esponja Seca.....	56
4.5 Cálculo de parámetros y tasas comparativas.....	57
4.5.1 Ensayo en pista de laboratorio.....	57
4.5.2 Ensayo en la Máquina de Hamburgo.....	58
Capítulo 5.....	59
5.1 Resultados ensayo en Aire.....	60

5.1.1	Cemento asfáltico CA24.	60
5.1.2	Cemento Asfáltico CA24 con aditivo promotor de adherencia.	62
5.1.3	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.	64
5.1.4	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros con aditivo promotor de adherencia.	66
5.2	Resultados ensayo Húmedo.	68
5.2.1	Cemento asfáltico CA24.	68
5.2.2	Cemento Asfáltico CA24 con aditivo promotor de adherencia.	69
5.2.3	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.	70
5.2.4	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros con aditivo promotor de adherencia.	71
5.3	Resultados ensayos en la máquina de Hamburgo.	72
5.3.1	Cemento asfáltico CA24.	72
5.3.2	Cemento asfáltico CA24 con aditivo promotor de adherencia.	74
5.3.3	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.	76
5.3.4	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros con aditivo promotor de adherencia.	78
5.4	Resultados ensayo saturado superficialmente seco.	80
5.4.1	Cemento asfáltico modificado con polímeros.	80
5.5	Resultados ensayo con esponja seca superficial.	81
5.5.1	Cemento asfáltico modificado con polímeros.	81
Capítulo 6	82
6.1	Comparación ensayo en Aire y Saturado Superficialmente Seco.	83
6.1.1	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.	83
6.2	Efecto de la incorporación de una esponja.	84
6.2.1	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.	84
6.3	Comparación ensayo en aire y ensayo Húmedo.	86
6.3.1	Probetas compactadas por vibrado.	86
6.4	Comparación de cementos asfálticos.	89

6.4.1	Ensayo en Aire.	89
6.4.2	Ensayo Húmedo.	93
6.4.3	Ensayo en la Máquina de Hamburgo.	95
6.5	Comparación Tipos de compactación.	99
6.5.1	Ensayo en Aire.	99
6.5.2	Ensayo en Máquina de Hamburgo.	103
6.6	Comparación ensayo Húmedo-V y HWTD-G.	107
6.6.1	Cemento Asfáltico CA24.	108
6.6.2	Cemento Asfáltico CA24 con aditivo promotor de adherencia.	109
6.6.3	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.	110
6.6.4	Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros con aditivo promotor de adherencia.	111
6.7	Obtención del factor que correlacione el ensayo Húmedo-V y el HWTD-G.	112
Capítulo 7	116
7.1	Introducción.	116
7.2	Comportamiento de los distintos tipos de cementos asfálticos.	117
7.3	Efecto de los tipos de compactación.	118
7.4	Ensayos en medio Húmedo.	118
7.5	Correlación del ensayo Húmedo con HWTD.	119
7.6	Comentarios y recomendaciones.	120
Referencias	121
Anexos	123
A.	Procedimiento de calibración de la presión generada por la rueda sobre la probeta en la máquina de rueda de carga.	123
B.	Resultados de Ensayos.	126

Índice de Figuras.

Figura 1: Diagrama de ensayos.....	13
Figura 2: Deformación permanente en el tiempo	16
Figura 3: Etapas de la deformación permanente.....	17
Figura 4: Georgia Loaded Wheel Tester	22
Figura 5: Máquina para ensayo de Pista de Laboratorio	23
Figura 6: French Pavement Rutting Tester	25
Figura 7: Asphalt Pavement Analyzer.....	26
Figura 8: Hamburg Wheel-Tracking Device.....	27
Figura 9: Purdue University Laboratory Wheel- Tracking Device.....	28
Figura 10: Model Mobile Load Simulator.....	29
Figura 11: Gráficos diseño Marshall mezcla patrón.....	38
Figura 12: Conjunto de compactación.....	41
Figura 13: Base de compactación.....	42
Figura 14: Elemento compactador.....	42
Figura 15: Dispositivos de extensión y enrase.....	43
Figura 16: Extracción testigo para ensayar en máquina de Hamburgo.....	44
Figura 17: Probetas formando "8".....	44
Figura 18: Diagrama del movimiento de la probeta en el compactador giratorio.....	45
Figura 19: Compactador giratorio y gato para desmolde.....	46
Figura 20: Máquina de ensayo Wheel Tracking.....	49
Figura 21: Cámara termostática.....	50
Figura 22: Adaptador para probeta circular Máquina de Hamburgo.....	51
Figura 23: Probeta confeccionada por vibrado ensayada en Aire.....	53
Figura 24: Ensayo Húmedo	55
Figura 25: Probetas luego de ser ensayadas en Máquina Hamburgo.....	56
Figura 26: Curva deformación vs N° de ciclos – Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD).....	58
Figura 27: Probetas de CA24-V-A.....	60
Figura 28: Promedio CA24-V-A.....	60
Figura 29: Probetas de CA24-G-A.....	61
Figura 30: Promedio CA24-G-A.....	61
Figura 31: Probetas de CA24K-V-A.....	62
Figura 32: Promedio CA24K-V-A.....	62
Figura 33: Probetas de CA24K-G-A.....	63

Figura 34: Promedio CA24K-G-A.....	63
Figura 35: Probetas de CAMD-V-A.....	64
Figura 36: Promedio CAMD-V-A.....	64
Figura 37: Probetas de CAMD-G-A.....	65
Figura 38: Promedio CAMD-G-A.....	65
Figura 39: Probetas de CAMDK-V-A.....	66
Figura 40: Promedio CAMDK-V-A.....	66
Figura 41: Probetas de CAMDK-G-A.....	67
Figura 42: Promedio CAMDK-G-A.....	67
Figura 43: Probetas de CA24-V-Hu.....	68
Figura 44: Promedio CA24-V-Hu.....	68
Figura 45: Probetas de CA24K-V-Hu.....	69
Figura 46: Promedio CA24K-V-Hu.....	69
Figura 47: Probetas de CAMD-V-Hu.....	70
Figura 48: Promedio CAMD-V-Hu.....	70
Figura 49: Probetas de CAMDK-V-Hu.....	71
Figura 50: Promedio CAMDK-V-Hu.....	71
Figura 51: Probetas de CA24-V-Ha.....	72
Figura 52: Promedio CA24-V-Ha.....	72
Figura 53: Probetas de CA24-G-Ha.....	73
Figura 54: Promedio CA24-G-Ha.....	73
Figura 55: Probetas de CA24K-V-Ha.....	74
Figura 56: Promedio CA24K-V-Ha.....	74
Figura 57: Probetas de CA24K-G-Ha.....	75
Figura 58: Promedio CA24K-G-Ha.....	75
Figura 59: Probetas de CAMD-V-Ha.....	76
Figura 60: Promedio CAMD-V-Ha.....	76
Figura 61: Probetas de CAMD-G-Ha.....	77
Figura 62: Promedio CAMD-G-Ha.....	77
Figura 63: Probetas de CAMDK-V-Ha.....	78
Figura 64: Promedio CAMDK-V-Ha.....	78
Figura 65: Probetas de CAMDK-G-Ha.....	79
Figura 66: Promedio CAMDK-G-Ha.....	79
Figura 67: Probetas de CAMD-V-SSS.....	80
Figura 68: Promedio CAMD-V-SSS.....	80

Figura 69: Probetas de CAMD-V-ES.....	81
Figura 70: Promedio CAMD-V-ES.....	81
Figura 71: Pérdida del contacto entre el tornillo solidario con la rueda y el micrómetro.....	82
Figura 72: Comparación CAMD en Aire y saturado superficialmente Seco.....	83
Figura 73: Efecto producido por la esponja.....	85
Figura 74: Comparación CA24 en Aire y en condición Húmeda.....	86
Figura 75: Comparación CA24K en Aire y en condición Húmeda.	86
Figura 76: Comparación CAMD en Aire y en condición Húmeda.	87
Figura 77: Comparación CAMDK en Aire y en condición Húmeda.....	87
Figura 78: Comparación de cementos asfálticos vibrados en ensayo en Aire.....	89
Figura 79: Comparación de cementos asfálticos por compactador giratorio en ensayo en Aire. 91	
Figura 80: Comparación de cementos asfálticos vibrados en ensayo Húmedo.....	93
Figura 81: Comparación de cementos asfálticos vibrados ensayados en HWTD.....	95
Figura 82: Comparación de cementos asfálticos por compactador giratorio ensayados en HWTD.....	97
Figura 83: Comparación de compactación CA24 en Aire.....	99
Figura 84: Comparación de compactación CA24K en Aire.....	99
Figura 85: Comparación de compactación CAMD en Aire.	100
Figura 86: Comparación de compactación CAMDK en Aire.	100
Figura 87: Comparación de compactación CA24 en HWTD.....	103
Figura 88: Comparación de compactación CA24K en HWTD.	103
Figura 89: Comparación de compactación CAMD en HWTD.....	104
Figura 90: Comparación de compactación CAMDK en HWTD.....	104
Figura 91: Comparación CA24 en ensayo Húmedo y HWTD.....	108
Figura 92: Comparación CA24K en ensayo Húmedo y HWTD.	109
Figura 93: Comparación CAMD en ensayo Húmedo y HWTD.	110
Figura 94: Comparación CAMDK en ensayo Húmedo y HWTD.....	111
Figura 95: Regresión Polinómica de orden 3 CA24.	112
Figura 96: Regresión Lineal CA24K.....	113
Figura 97: Regresión exponencial CAMD.	113
Figura 98: Regresión polinómica de orden 3 CAMDK.....	114
Figura 99: Dispersión de deformación en HWTD vs ensayo Húmedo con todos los ligantes estudiados.	115

Índice de Tablas.

Tabla 1: Resumen de los factores que afectan la deformación permanente de mezclas asfálticas.....	18
Tabla 2: Granulometría de los materiales pétreos.....	31
Tabla 3: Características físicas e hídricas de los materiales pétreos	31
Tabla 4: Ensayos físico químicos CA 24.....	32
Tabla 5: Ensayos físico químicos CA 24 aditivado con Kaoamin.	33
Tabla 6: Ensayos físico químicos Asfalto Modificado con Polímeros.	34
Tabla 7: Ensayos físico químicos Asfalto Modificado con Polímeros aditivado con Kaoamin....	35
Tabla 8: Granulometría de la mezcla de áridos.....	36
Tabla 9: Constantes físicas e hídricas de la mezcla de áridos.	36
Tabla 10: Parámetros Marshall de la dosificación.	37
Tabla 11: Cálculo del contenido óptimo de cemento asfáltico.	38
Tabla 12: Temperaturas de mezclado y compactación.	40
Tabla 13: Comparación vel. de deformación ensayo en Aire y Sat. Superficialmente Seco.	84
Tabla 14: Comparación vel. de deformación ensayo en Aire y con esponja seca.	85
Tabla 15: Comparación vel. de deformación con esponja seca sin probeta 1.	85
Tabla 16: Comparación vel. de deformación ensayo Aire y Húmedo.	88
Tabla 17: Vel. de deformación cementos asfálticos vibrados en ensayo en Aire.....	90
Tabla 18: Vel. de deformación cementos asfálticos por compactador giratorio en ensayo en Aire.	92
Tabla 19: Punto de stripping probetas vibradas en ensayo Húmedo.....	94
Tabla 20: Vel. de deformación cementos asfálticos vibrados en Ensayo Húmedo.	94
Tabla 21: Punto de stripping probetas vibradas ensayadas en HWTD.....	96
Tabla 22: Vel. de deformación cementos asfálticos vibrados ensayados en HWTD.	96
Tabla 23: Punto de stripping probetas en el compactador giratorio ensayadas en HWTD	97
Tabla 24: Vel. de deformación cementos asfálticos en el compactador giratorio ensayados en la Máquina de Hamburgo.	98
Tabla 25: Densidades promedio probetas ensayadas en Aire.	101
Tabla 26: Velocidades de deformación probetas ensayadas en Aire.	102
Tabla 27: Densidades promedio probetas ensayadas en HWTD.	105
Tabla 28: Puntos de stripping probetas ensayadas en HWTD.	106
Tabla 29: Velocidades de deformación probetas ensayadas en HWTD.....	106
Tabla 30: Comparación de factores que afectan el ensayo Húmedo y el ensayo HWTD.....	107

Capítulo 1

Introducción.

1.1 Motivación.

La historia de las mezclas asfálticas en nuestro país se inicia el año 1924 con la construcción del primer camino pavimentado con asfalto proveniente del lago Trinidad, pero es en los años 80`s cuando se acrecienta su uso debido a la mayor demanda de pavimentos en las ciudades y las ventajas comparativas que tenía con el pavimento de hormigón, por el menor costo en la inversión inicial.

Fue a mediados de los 90`s, con la implementación del sistema de concesiones, cuando se dieron todas las condiciones para que las mezclas asfálticas llegaran a ser lo que son hoy, un factor importante para el desarrollo de las comunicaciones y la conectividad del país. Todos estos factores dieron fruto en la actual red de autopistas que conectan la ciudad de Santiago, teniendo el más alto nivel en cuanto a seguridad y fluidez de tráfico.

Hoy en día además de la preocupación de vialidad por mantener la conectividad entre las ciudades del país y con los países aledaños, es la red de conexión para el sistema público de transporte el principal desafío en infraestructura vial por parte del SERVIU (Servicio de Vivienda y Urbanismo), debiendo cumplir esta con los más altos estándares de calidad debido a las altas intensidades de tráfico y grandes cargas, demandas a las que son sometidos los pavimentos. Además está la externalidad de que la opinión pública tiene los ojos puestos en el buen desempeño del sistema Transantiago que constituye la solución para satisfacer las necesidades de movilización de aproximadamente 6 millones de usuarios.

Si bien hoy en día el desafío es muy grande, hay un déficit en nuestro país de tecnologías que permitan diseñar las mezclas asfálticas de alto desempeño que las condiciones de servicio actuales imponen.

1.2 Importancia de la Investigación.

Dado la fuerte inversión que se realiza hoy en día en infraestructura vial, resulta necesario contar con parámetros que permitan evaluar el costo de vida útil involucrado en estas obras, de modo de optimizar el desempeño, para ello se deben estudiar las fallas que se podrían producir debido al uso normal de la infraestructura. La mayor parte del presupuesto vial es destinado a la pavimentación de las vías, por lo que si se le suma que más del 95% de los kilómetros pavimentados en nuestro país son de asfalto, podemos decir que los esfuerzos deben ser dirigidos con mayor énfasis en cómo se comportan las mezclas asfálticas bajo las sollicitaciones a las que se enfrentan.

En general, los criterios de falla más empleados son la fisuración por fatiga de las capas asfálticas, y la acumulación de deformaciones permanentes, conocida como ahuellamiento, pero en el último tiempo se ha sumado a estas la pérdida de la película asfáltica que recubre a los agregados pétreos, conocida como “stripping”, este fenómeno produce la pérdida de la cohesión de la mezcla. El stripping aparece principalmente cuando hay agua de por medio, ya que el agua afecta directamente la adherencia entre el agregado y el asfalto.

Para evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente ante la deformación permanente, existen variados tipos de ensayos en pista del tipo “Wheel Tracking”, estos ensayos simulan el paso de vehículos a través de una rueda cargada. En Chile el ensayo más utilizado para determinar el comportamiento de mezclas asfálticas en deformación permanente es el que ha adoptado el Manual de Carreteras, correspondiente a la norma española NLT-173/84. Este ensayo evalúa las deformaciones permanentes que se producen en probetas sometidas a cargas cíclicas del tipo vaivén de una rueda cargada, bajo condiciones de temperatura y humedad controlada (humedad ambiental).

Se ha introducido en Europa y Estados Unidos ensayos que evalúan la performance de las mezclas asfálticas frente a la sollicitación de una rueda cargada, que pasa en forma cíclica, pero realizados con la probeta sumergida en agua, evaluando el comportamiento frente a la deformación permanente y al stripping simultáneamente.

Por tal motivo en este trabajo de título se propone investigar el comportamiento de las mezclas frente al ensayo de rueda de carga tanto en aire, como sumergido en agua, e intentar establecer si existe algún método que permita adaptar el ensayo seco para simular el ensayo sumergido.

1.3 Objetivos Generales.

Los objetivos generales de este trabajo son:

- Estudiar el comportamiento en deformación permanente de mezclas asfálticas en caliente, bajo sollicitación de rueda de carga a escala de laboratorio.
- Comparar la performance de dos tipos de cementos asfálticos bajo ensayo de rueda de carga.

1.4 Objetivos específicos.

Como objetivos específicos de este trabajo se plantean los siguientes:

- Evaluar la influencia de la presencia de agua superficial durante el periodo de ensayo, en la tasa de deterioro (ahuellamiento y desprendimiento de la película asfáltica) de la carpeta asfáltica.
- Estudiar el comportamiento en deformación permanente de un cemento asfáltico modificado con polímeros sin aditivar y otro con aditivo mejorador de adherencia, bajo las condiciones de ensayo seco y Húmedo.

1.5 Alcances.

Las variables que intervienen en el comportamiento que presentará la probeta afecta al ensayo de rueda de carga son cuantiosas, para este estudio se clasifican estas variables según método de ensayo o según el tipo de la mezcla que se utilizará.

- Variables con respecto al método de ensayo.
 - Carga o presión de contacto aplicada por la rueda a las probetas.
 - Velocidad con que pasa la rueda.
 - Método con que se compacta la mezcla.
 - Temperatura de ensayo.
 - Tiempo que dura el ensayo.
 - Incorporación de agua al ensayo.

- Variables con respecto al tipo de la mezcla.
 - Tipo de ligante asfáltico utilizado.
 - Tipo de áridos utilizados.
 - Granulometría de la mezcla
 - Contenido de ligante asfáltico utilizado.
 - Incorporación de aditivos al ligante.

En el presente trabajo se recurre a estudiar tres de estas variables, una de ellas es el método de compactación de la mezcla, ya que se compactan probetas con una placa vibratoria y con un compactador giratorio, otra variable es la incorporación de agua al ensayo, y por último el tipo de asfalto debido a la incorporación de un aditivo mejorador de adherencia a dos tipos de cementos utilizados. Al mismo tiempo se comparan dos ensayos del tipo Wheel Tracking, los que involucran máquinas de ensayo con calibraciones distintas según sus especificaciones.

1.6 Metodología

- Revisión de antecedentes sobre la respuesta al ahuellamiento de distintos tipos de mezclas asfálticas.
- Revisión de ensayos que evalúen mezclas asfálticas mediante rueda de carga que incorporen agua o no en su metodología.
- Estudio experimental de una variante que permita involucrar agua superficial al ensayo de rueda de carga de la norma española NLT-173/84 (Método para determinar la deformación en mezclas asfálticas utilizando la máquina de ahuellamiento).
- Confección de probetas con cemento asfáltico con y sin aditivo mejorador de adherencia, compactadas con placa vibratoria.
- Confección de probetas con cemento asfáltico con y sin aditivo mejorador de adherencia, compactadas con compactador giratorio.
- Ensayos en máquina de ahuellamiento española (Norma NLT-173/84) en seco y con agua superficial.
- Ensayos en máquina de ahuellamiento de Hamburgo (Hamburg Wheel Tracking Device) según norma AASHTO T324-04.
- Recopilación de los resultados obtenidos de los ensayos de ahuellamiento para las distintas probetas confeccionadas.

- Calibración de ensayo con agua superficial adoptado para máquina española con la máquina de Hamburgo.
- Estudio de los datos obtenidos para formular conclusiones y recomendaciones.

1.7 Diagrama de ensayos.

El diagrama de ensayos se muestra en la Figura 1.

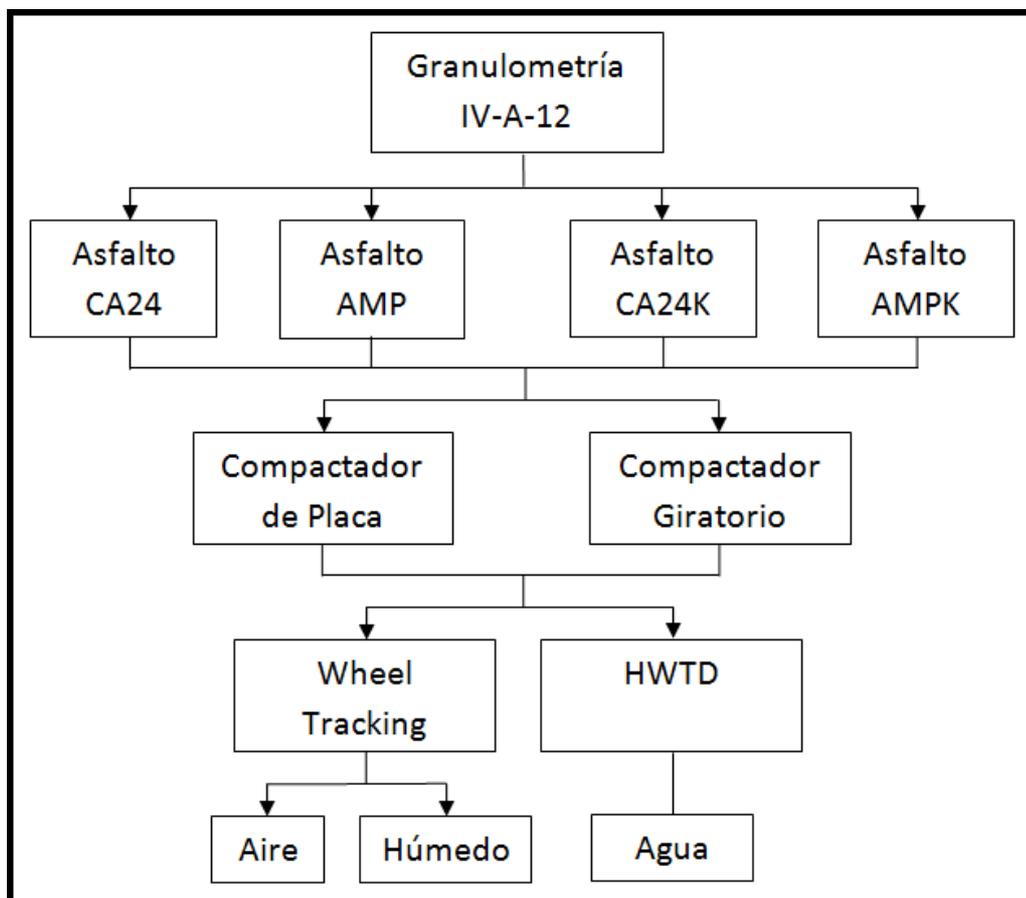


Figura 1: Diagrama de ensayos.

Donde:

Wheel Tracking: Máquina del ensayo en pista de laboratorio (Norma LNT 173/84 homologada en el M.C.-V.8)

HWTD: "Hamburg Wheel Tracking Device" (AASHTO T 324-04)

CA24: Cemento asfáltico cuya viscosidad absoluta original a 60° C y 300 mm de Hg, debe ser mayor o igual a 2400 poises.

CA24K: CA24 aditivado con promotor de adherencia.

AMP: Cemento asfáltico modificado con polímeros.

AMPK: AMP aditivado con promotor de adherencia.

Aire, Húmedo, Agua: Acondicionamiento del ensayo detallado en 4.4.

Capítulo 2

Marco Teórico

Para analizar el desempeño de una mezcla asfáltica con agua en su superficie durante el ensayo de rueda de carga, es necesario discriminar dos tipos de fallas en su performance, una producto de la acumulación de deformaciones plásticas debido al paso reiterado de una rueda que aplica a la superficie de la mezcla asfáltica una carga determinada y una segunda falla producto de la pérdida de adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo, ambos procesos de deterioro se explican en este capítulo.

2.1 Comportamiento plástico de las mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas son materiales viscoelásticos con propiedades que dependen de la temperatura y la frecuencia con que se aplican las cargas, estructuralmente las propiedades mecánicas más importantes son el módulo de deformación, resistencia a la fatiga y la resistencia a las deformaciones permanentes.

El comportamiento de estas mezclas frente a un proceso de carga se traduce en el desarrollo de deformaciones instantáneas de tipo elástico seguidas luego por otras de naturaleza viscosa y dependientes del tiempo. Cuando se produce la descarga, la deformación elástica es recuperada de forma inmediata, luego se recuperan otras deformaciones que son principalmente de origen viscoelástico, que dependen del tiempo al ser amortiguadas, quedando finalmente las deformaciones plásticas irreversibles. Debido a que las cargas que se ejercen sobre las carpetas asfálticas son cíclicas, la acumulación de las deformaciones permanentes se produce de forma gradual a lo largo del tiempo.

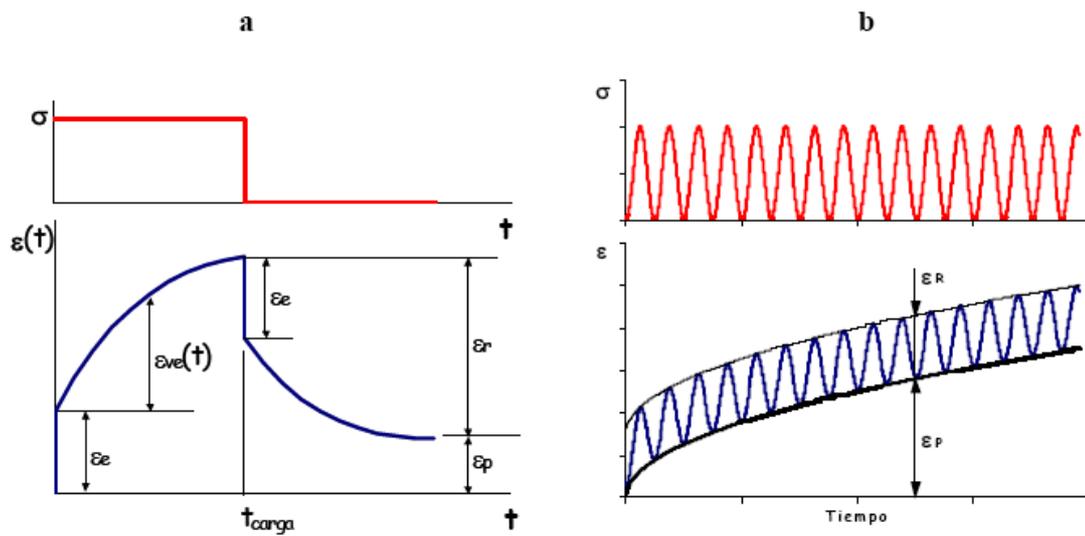


Figura 2: Deformación permanente en el tiempo

Para a) carga estática, b) carga cíclica.

Las variables dispuestas en la Figura 2 se definen a continuación:

- σ : Tensión provocada por una carga.
- $\varepsilon(t)$: Deformación en función del tiempo.
- ε_e : Deformación instantánea de tipo elástica.
- $\varepsilon_{ve}(t)$: Deformación de naturaleza viscosa y dependiente del tiempo.
- ε_r : Deformación total recuperada.
- ε_p : Deformación plástica irrecuperable.

La deformación permanente durante la vida de servicio de las mezclas se desarrolla en tres fases (Figura 3):

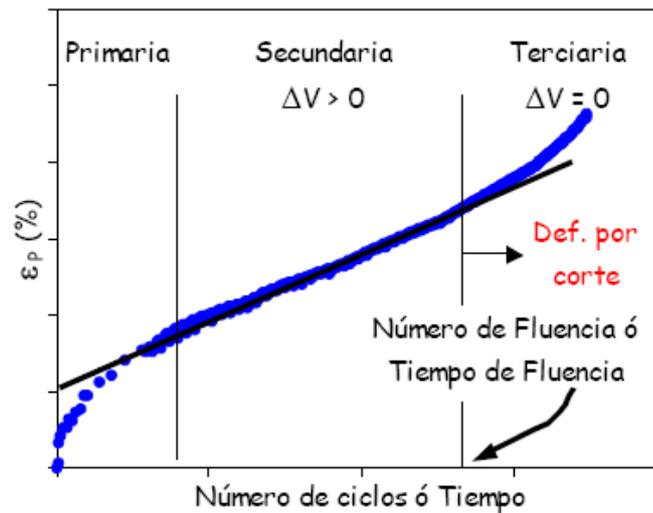


Figura 3: Etapas de la deformación permanente

- Etapa primaria (o inicial): se produce un cambio de volumen ya que el contenido de vacíos inicial de la mezcla es reducido debido a la densificación por tráfico, produciéndose una pérdida de volumen y un incremento en la densidad.
- Etapa secundaria: La velocidad de deformación es una característica propia de cada mezcla con ligantes asfálticos.
- Etapa terciaria: Las deformaciones se producen a volumen constante, siendo causadas por corte.

2.1.1 Efecto de las distintas variables que afectan la deformación permanente en las mezclas asfálticas.

Las variables que afectan el comportamiento de las mezclas asfálticas se resumen en la Tabla 1, además se indica el efecto que produce una variación de ellas:

Tabla 1: Resumen de los factores que afectan la deformación permanente de mezclas asfálticas.

	FACTOR	CAMBIO DEL FACTOR	EFFECTO SOBRE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO
AGREGADO	Textura superficial	De lisa a rugosa	Incremento
	Granulometría	De discontinua a continua	Incremento
	Forma	De redondeada a angular	Incremento
	Tamaño	Aumento del tamaño máximo	Incremento
LIGANTE ASFALTICO	Modulo 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 DE ENSAYO	Temperatura	Incremento	Disminución
	Estado 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

Algunos de los factores que afectan el desempeño de la mezcla 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 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 sollicitación vienen dadas por las características del lugar y el tipo de vía donde será puesta la mezcla asfáltica.

2.2 Pérdida de afinidad agregado/ligante asfáltico: “Stripping”.

Las mezclas asfálticas no sólo deben ser diseñadas anticipándose al daño que producen las cargas impuestas por el tránsito, sino también se debe considerar la acción del medio ambiente. Actualmente para introducir el medio ambiente se estudia por separado cada uno de los factores que lo conforman (estos factores son el agua, el aire, la temperatura y los rayos ultravioleta), se evalúa el comportamiento mecánico y químico de cada uno de ellos de manera separada sobre el ligante y las mezclas.

Generalmente para realizar estos ensayos se recurre a 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 ligantes asfálticos. 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 sometidas a condiciones reales del ambiente.

Uno de los principales modos de daño de las mezclas asfálticas es el efecto de separación del ligante asfáltico con el agregado pétreo. Este fenómeno fue descubierto en la década de los treinta y se le denomina “stripping”.

El stripping ocurre por un efecto físico-químico entre el asfalto y el agregado pétreo, por lo tanto la calidad este último y su composición mineralógica son factores que afectan la magnitud de este fenómeno. La adherencia entre el asfalto y el agregado pétreo depende fuertemente de la mineralogía del agregado según reportes de Kanitpong y Bahia.

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 ha realizado sobre este tema, tanto el fenómeno como las causas que lo generan no han sido totalmente entendidas ni identificadas.

El stripping generalmente es definido 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 pétreo la unión entre los materiales que componen la mezcla asfáltica se rompe”.

Capítulo 3

Estado del Arte.

Los ensayos de rueda de carga intentan simular el tránsito al que será sometido el pavimento durante su vida útil, fueron creados originalmente para evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas frente al ahuellamiento, pero con el tiempo se ha introducido al estudio realizado en este tipo de máquinas la variable que incorpora el agua a la deformación permanente, resultando un daño sustancial en los especímenes ensayados con un comportamiento totalmente distinto al que se acostumbraba a obtener de los ensayos realizados sobre probetas en aire (secas).

Todos los ensayos de rueda de carga deben definir cada una de las variables que afectan a la performance de los pavimentos, estas son: temperatura, carga o presión que efectúa la rueda sobre las probetas de asfalto, longitud del recorrido de la rueda sobre la probeta, frecuencia del paso de la rueda, forma y dimensiones de los especímenes a ensayar y duración del ensayo, donde el ensayo puede ser finalizado al cumplir cierto número de ciclos o bien cuando las probetas presentan una deformación mayor a la permitida en criterios de aceptación/rechazo establecidos.

El procedimiento general de ensayo consiste en medir la velocidad de deformación o la deformación vertical que se produce en la probeta que se esté ensayando, pudiendo ser una probeta de laboratorio o un testigo extraído de terreno de forma cilíndrica o prismática, ante la aplicación de una carga dinámica aplicada mediante una rueda cargada.

Los equipos desarrollados con el fin de estudiar el ahuellamiento difieren según su procedencia en sus características, pudiendo algunos realizar el ensayo en aire (condición seca) o en condición húmeda (probetas sumergidas en agua).

3.1 Ensayos de rueda de carga que sólo permiten condición seca.

Entre los ensayos de rueda de carga que sólo permiten ser realizados en aire se encuentran:

3.1.1 Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT).

El GLWT fue desarrollado a mediados de los 80` a partir de modificaciones introducidas a un modelo diseñado por C. R. Benedict de Benedict Slurry Seals Inc., para ensayar lechadas de asfalto (slurry seals) con el fin de generar un instrumento que permitiera realizar ensayos de medición de ahuellamiento en laboratorio así como también control de calidad en obra de mezclas asfálticas en caliente.

Las probetas que se utilizan para el ensayo deben ser cilíndricas de 15 cm de diámetro y 7,5 cm de altura o de forma rectangular con 12,5 cm de ancho, 30 cm de largo y 7,5 cm de altura, siendo compactadas con un contenido de vacíos entre un 4% y un 7% aceptando distintos métodos de compactación.

El ensayo consiste en la aplicación de una carga de 445 N utilizando una rueda metálica, que se apoya sobre una manguera neumática presurizada a 690 kPa, sobre el espécimen a ensayar, donde se simula la circulación vehicular a partir del movimiento de ida y vuelta (1 ciclo) de la rueda, permitiendo la medición del ahuellamiento, en particular en la última medida que es a los 8000 ciclos. La temperatura de la operación varía entre los 35 °C y los 60°C, con una velocidad de la rueda de 55.55 cm/s (33 ciclos/min), sobre un recorrido de 33 cm.



Figura 4: Georgia Loaded Wheel Tester

3.1.2 Equipo para ensayo de Pista de Laboratorio

Equipamiento desarrollado por el Centro de Carteras de España (CEDEX), este equipo permiten determinar la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas de una mezcla bituminosa, tanto en probetas preparadas en laboratorio como en testigos procedentes de pavimentos. Las dimensiones de las probetas son de 300 mm de ancho, 300 mm de largo y 50 mm de espesor, y en el caso de testigos con dimensiones menores a las especificadas se acepta la utilización de material adecuado que permita una buena fijación y asentamiento de la muestra a la base del molde.

La compactación de las probetas se realiza mediante el vibrado de una placa de acero que posee las mismas dimensiones de que las probetas en su cara superior (30 cm x 30 cm), por lo que sólo se pueden crear probetas con las características descritas anteriormente.

El ensayo consiste en someter una probeta de la mezcla bituminosa, al paso alternativo de una rueda metálica de 20 cm de diámetro, recubierta con 20 mm de caucho con una dureza de 80 en la escala Dunlop, en condiciones determinadas de presión, temperatura y frecuencia del paso de la rueda, las que son de $900 \pm 25 \text{ kN/m}^2$, $60 \pm 1^\circ \text{ C}$ y 42 ± 1 pasadas de vaivén por minuto respectivamente, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida durante los 120 minutos que dura el ensayo.



Figura 5: Máquina para ensayo de Pista de Laboratorio

3.1.3 French Pavement Rutting Tester

El ensayo francés del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées es un ensayo que permite medir la sensibilidad al ahuellamiento de mezclas asfálticas en caliente con un movimiento alternativo de dos ruedas de goma neumática, el que permiten ensayar dos probetas simultáneamente, pudiendo ser bases asfálticas o la superficie de rodadura. Se pueden probar losas de concreto asfáltico con temperaturas de ensayo que van desde los 30 a los 70 °C (típicamente a 60 °C) y la susceptibilidad de la mezcla se mide en criterios de pasa o no pasa. Este ensayo ha sido utilizado por más de 25 años en Francia y también su uso se extendió a Estados Unidos, principalmente en el estado de Colorado y en el centro de investigación de carreteras de Turner Fairbank (FHWA), siendo utilizado principalmente en mezclas que, o bien no tienen un historial de rendimiento o serán sometidas a tráfico pesado.

La metodología de este aparato es similar a la de los equipos ya descritos; se aplica una carga estándar de 5.000 ± 50 N a través de una rueda neumática de 400 mm de diámetro y 80 mm de ancho, con una presión de inflado de $0,6 \pm 0,03$ MPa, a una velocidad de 67 ciclos por minuto. Las dimensiones de la probeta utilizada son de 500 mm de longitud, 180 mm de ancho y de 50 a 100 mm de espesor. Finalizado 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 tres distribuidas en el ancho de la huella dejada por la rueda. Las deformaciones se expresan como un porcentaje del espesor original de la muestra.

Se toman mediciones a los 30, 100, 300, 1.000, y 3.000 ciclos cuando las probetas tienen 50 mm de espesor, y en 300, 1.000, 3.000, 10.000 y 30.000 ciclos, cuando las probetas son de 100 mm de espesor.



Figura 6: French Pavement Rutting Tester

3.2 Ensayos de rueda de carga que permiten condición bajo agua.

Entre los ensayos de rueda de carga que permiten ser realizados bajo agua se encuentran:

3.2.1 Asphalt Pavement Analyzer (APA)

El APA es una modificación de la GLWT y fue fabricada por primera vez en 1996 por Pavement Technology, Inc. Su uso se encuentra estandarizado a través de la Norma AASHTO TP 63-03 Standard Test Method for determining Rutting Susceptibility of Asphalt Paving Mixtures using the Asphalt Pavement Analyzer. El APA se utiliza para evaluar el ahuellamiento, la fatiga y la resistencia a la humedad de mezclas asfálticas en caliente (HMA).

Debido a que es la segunda generación de la GLWT, sigue un procedimiento con la misma rutina; una rueda sobre la que se coloca una manguera presurizada a una presión de 690 kPa o 830 kPa, la rueda mediante un movimiento de ida y vuelta (1 ciclo) brinda una carga de 445 N o 533 N, dependiendo de la presión dada, simulando los vehículos circulantes. Las muestras que se ensayan pueden tener forma cilíndrica o rectangular y se someten a una temperatura de entre 40.6 °C y 64 °C.

El método de compactación puede ser mediante vibrado o amasado, logrando un 4% o un 7% de contenido de vacíos en las probetas cilíndricas y 7% en las rectangulares. Los especímenes pueden ser ensayados secos o saturados y se pueden confeccionar en el laboratorio o extraídas in situ. El ensayo se realiza hasta los 8000 ciclos y los resultados se presentan en una gráfica de la deformación versus el tiempo.



Figura 7: Asphalt Pavement Analyzer.

3.2.2 Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD)

La máquina de Hamburgo fue desarrollada por Helmut Wind Incorporated de Hamburgo, Alemania en 1970, tomando como idea principal un modelo de origen británico. Está normado en EE.UU. por la norma AASHTO T 324-04 Standard Method of test of Hamburg Wheel- Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt y en Europa por la norma UNE-EN 12697-22 Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 22: Ensayo de rodadura, donde está catalogado como un dispositivo de tamaño pequeño y se caracteriza el ensayo bajo agua en el procedimiento B.

El ensayo de Hamburgo permite evaluar mezclas asfálticas en relación a su resistencia a la humedad y al ahuellamiento y permite el ensayo de dos muestras simultáneamente, mediante dos ruedas paralelas

Las pruebas se realizan sobre losas de 260 milímetros de ancho y 320 milímetros de largo, el espesor es variable aunque típicamente se utiliza de 40 milímetros, las probetas hechas en laboratorio con estas dimensiones se compactan normalmente para poseer un índice de huecos de 7 ± 1 % para mezclas densamente graduadas y 5% a 6% para mezclas tipo S.M.A. (compactadas por amasado), también se pueden realizar pruebas sobre probetas cilíndricas (de 15.2 cm o 25,4 cm de diámetro, 6.2 cm de espesor y densidad de 93%). La temperatura de ensayo de las probetas bajo agua es variable, y esta va desde los 25°C a los 70°C, pero la

temperatura de ensayo más común es de 50°C. Se aplica una carga de 705 N sobre una rueda de acero de 47 milímetros de ancho. La rueda se desplaza hacia adelante y hacia atrás a lo largo de la superficie de la losa. El ensayo tiene una duración de 20.000 pasadas o hasta que se obtienen 20 milímetros de deformación. La frecuencia de paso de la rueda es de 53 pasadas por minuto (26,5 ciclos por minuto) y a una velocidad de 34 cm/seg.



Figura 8: Hamburg Wheel-Tracking Device.

3.2.3 Purdue University Laboratory Wheel- Tracking Device

Este ensayo fue desarrollado por la Universidad de Purdue y es muy similar al ensayo de Hamburgo, ya que evalúa ahuellamiento potencial y sensibilidad a la acción de la humedad. La presión de ensayo es de 620 kPa sobre la muestra que puede ser un testigo extraído de campo o una probeta fabricada en laboratorio, la velocidad del paso de la rueda es de 33,2 cm/seg y esta rueda posee una manguera presurizada que es inflada a una presión de 793 kPa.

Las dimensiones de las probetas son de 50 cm de largo, 18 cm de ancho y de entre 1 cm a 5cm de espesor. Los testigos son rectangulares de 29 cm de ancho, 31 cm de largo y un espesor que es variable dependiendo del tipo de mezcla que se está ensayando: Superficiales 3,8 cm; mezclas de base 5,1 cm; y mezclas asfálticas gruesas para base 7,6 cm. Las probetas se compactan por medios de compactación lineales con contenidos de vacíos entre 6% y 8% pudiendo ensayarse en condiciones húmedas y secas.

Al igual que la máquina de Hamburgo el ensayo se realiza hasta las 20.000 pasadas o hasta que se alcanzan los 2 cm de ahuellamiento. Finalizado el ensayo se procede a obtener el coeficiente de humedad definido como la relación entre el número de ciclos para los que

alcanza una huella de 1,27 cm en condiciones secas y el correspondiente a condiciones húmedas (el valor de 1,27 cm define un límite entre buen y mal comportamiento a la humedad)

Cabe destacar que es este ensayo puede adaptarse una rueda móvil con la cual simular un movimiento en sentido transversal en el ancho de la muestra.



Figura 9: Purdue University Laboratory Wheel- Tracking Device.

3.2.4 Model Mobile Load Simulator (MMLS3)

Este ensayo fue desarrollado en Sudáfrica y consiste en un simulador de carga móvil con una escala 1/3 respecto de la real. Se aplica a la evaluación de muestras de mezclas asfálticas en caliente producidas en el laboratorio o in situ con dimensiones de 120 cm de largo y 24 cm de ancho, estas muestras se pueden ensayar tanto en condición húmeda como seca.

La carga que se aplica sobre las muestras por la rueda es de 2,1 kN, con una presión de inflado de la rueda de 800 kPa generando una presión de contacto de 690 kPa. La rueda se mueve a una velocidad de 7200 pasadas/hora (120 pasadas/minuto) y sus dimensiones son 30 cm de diámetro y 8 cm de ancho. La temperatura de ensayo varía según la condición del ensayo: 50°C y 60°C para condición seca y 30°C para condición húmeda, además se puede incorporar una rueda móvil que simule el movimiento transversal de la misma.

Los valores que deben obtenerse a partir del ensayo son los correspondientes a 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 Analysis of Surface Waves Moduli), el que permite evaluar ahuellamiento o daños producidos por agrietamiento o humedad.

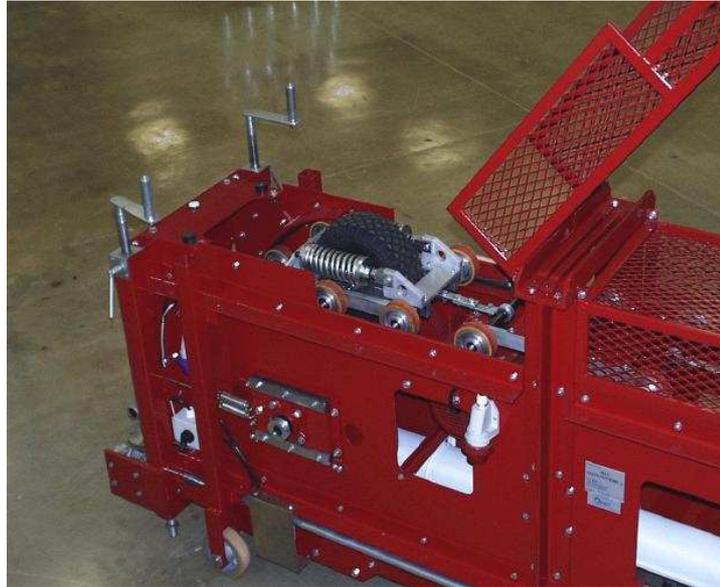


Figura 10: Model Mobile Load Simulator.

Capítulo 4

Metodología de Ensayo.

En este capítulo se planteará la secuencia que se seguirá para la realización de los ensayos, detallando además las características y las exigencias que deben cumplir tanto los materiales como la máquina Española y la de Hamburgo.

4.1 Materiales.

4.1.1 Áridos.

Los materiales granulares utilizados para la confección de las probetas son proporcionados por la Sociedad de Mezclas Viales Mixvial Ltda. Sucursal Rancagua, la granulometría y características de estos materiales se presentan en las Tablas 2 y 3 respectivamente. Los materiales que componen la mezcla de áridos son:

- Material N°1 (M1): Gravilla de tamaño máximo 3/4".
- Material N°2 (M2): Gravilla de tamaño máximo 1/2".
- Material N°3 (M3): Polvo roca de tamaño máximo 3/8".

Tabla 2: Granulometría de los materiales pétreos.

IDENTIFICACIÓN		M1	M2	M3
TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA EN PESO (%)		
ASTM	mm			
1/12"	40			
1"	25	100		
3/4"	20	100		
1/2"	12,5	35	100	
3/8"	10	6	75	100
1/4"	6,3	3	18	97
Nº 4	5,0	3	6,0	83
Nº 8	2,50	3	4,0	58
Nº 16	1,25	2	3,4	40
Nº 30	0,63	2	3,2	31
Nº 50	0,315	2	2,8	22
Nº 100	0,16	2	2,3	14
Nº 200	0,08	1,3	1,8	10,7

Tabla 3: Características físicas e hídricas de los materiales pétreos

IDENTIFICACIÓN		M1	M2	M3
DENSIDAD REAL SECA	(kg/m ³)	2.697	2.694	2.679
DENSIDAD NETA	(kg/m ³)	2.774	2.780	2.779
ABSORCIÓN DE AGUA	(%)	1,0	1,1	1,3
DENSIDAD APARENTE SUELTA	(kg/m ³)	1.506	1.518	1.659
DESGASTE DE LOS ANGELES ⁽¹⁾	(%)	11,5	12,3	18,7
	(Grado)	5	6	7
DESINTEGRACION POR SULFATOS ⁽¹⁾	(%)			
FRACCION GRUESA	(%)	0,1	0,3	---
FRACCION FINA	(%)	---	---	0,9
PARTICULAS CHANCADAS	(%)	98	100	100
PARTICULAS LAJEADAS	(%)	0,2	0,2	0,9
ÍNDICE DE LAJAS	(%)	14,5	16,0	21,5

4.1.2 Cementos Asfálticos.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizan dos tipos de cementos asfálticos, un CA 24 y un Asfalto Modificado con Polímeros, ambos proporcionados por Shell Bitumen, estos cementos asfálticos son aditivados con Kaoamin 12, promotor de adherencia que se incorpora al cemento asfáltico a través de un proceso de agitación.

El contenido de Kaoamin 12 que se incorpora al ligante es en una proporción de un 0,3% con respecto a la masa final de aditivo mas cemento asfáltico. A continuación se presentan las características de los ligantes utilizados, con y sin Kaoamin 12.

Tabla 4: Ensayos físico químicos CA 24.

ENSAYOS	UNIDAD	RESULTADOS	REQUISITO
VISCOSIDAD ABSOLUTA A (60 °C, 300 mm de Hg)	P	3083	Mín. 2400
DUCTILIDAD A (25 °C, 5 cm/min.)	cm	>150	Mín. 100
ENSAYO DE MANCHA HEPTANO - XILOL	% xilol	<20	30% máx. de xilol
PUNTO DE INFLAMACION	°C	288	Mín. 232
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°C	49,8	Informar
INDICE DE PENETRACION	IP	-0,6	Mín.-1.5 - Máx. +1.0
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	%	99,5	Mín. 99,0
HORNO ROTATORIO			
PERDIDA POR CALENTAMIENTO	%	0,1	Máx. 0,8
VISCOSIDAD ABSOLUTA A (60 °C, 300 mm de Hg)	P	6301	Informar
DUCTILIDAD A (25 °C, 5 cm/min.)	cm	>150	Mín. 100
INDICE DE DURABILIDAD	ID	2,0	Máx. 3,5
CURVA DE VISCOSIDAD			
VISCOSIDAD BROOKFIELD 120°C, HUSILLO S-21, 30 RPM, 59,5% TORQUE	cP	992	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 135°C, HUSILLO S-21, 50 RPM, 43,8 % TORQUE	cP	438	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 150°C, HUSILLO S-21, 100 RPM, 45,1 % TORQUE	cP	226	Informar

Tabla 5: Ensayos físico químicos CA 24 aditivado con Kaoamin.

ENSAYOS	UNIDAD	RESULTADOS	REQUISITO
VISCOSIDAD ABSOLUTA A (60 °C, 300 mm de Hg)	P	3357	Mín. 2400
DUCTILIDAD A (25 °C, 5 cm/min.)	cm	>150	Mín. 100
ENSAYO DE MANCHA HEPTANO - XILOL	% xilol	<20	30% máx. de xilol
PUNTO DE INFLAMACION	°C	278	Mín. 232
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°C	50,0	Informar
INDICE DE PENETRACION	IP	-0,7	Mín.-1.5 - Máx. +1.0
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	%	99,2	Mín. 99,0
HORNO ROTATORIO			
PERDIDA POR CALENTAMIENTO	%	0,09	Máx. 0,8
VISCOSIDAD ABSOLUTA A (60 °C, 300 mm de Hg)	P	6738	Informar
DUCTILIDAD A (25 °C, 5 cm/min.)	cm	>150	Mín. 100
INDICE DE DURABILIDAD	ID	2,0	Máx. 3,5

CURVA DE VISCOSIDAD			
VISCOSIDAD BROOKFIELD 120°C, HUSILLO S-21, 30 RPM, 63,6 % TORQUE	cP	1060	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 135°C, HUSILLO S-21, 50 RPM, 82,8 % TORQUE	cP	460	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 150°C, HUSILLO S-21, 100 RPM, 45,8 % TORQUE	cP	229	Informar

Tabla 6: Ensayos físico químicos Asfalto Modificado con Polímeros.

ENSAYOS	UNIDAD	RESULTADOS	REQUISITO
PENETRACION (25 °c. 100 g, 5 s)	0,1 mm	64	Mín. 60 - Máx. 80
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°C	73,0	Mín. 65
INDICE DE PENETRACION (pen25-pto. abl)	IP	2,9	Mín. 2,0
INDICE DE PENETRACION (pen15-pen35)	IP	---	Informar
INDICE DE PENETRACION (pen25-pen40)	IP	1,0	Informar
DUCTILIDAD (25 °C, 5 cm/min.)	cm	107	Mín. 80
DUCTILIDAD (5 °C, 5 cm/min.)	cm	40	Mín. 50
INDICE DE FRAASS	°C	---	Máx. -17
RECUPERACION ELASTICA LINEAL (13°C, 20cm, 1h)	%	85	Mín. 50
RECUPERACION ELASTICA POR TORSION, 25 °C	%	61	Mín. 60
PUNTO DE INFLAMACION	°C	270	Mín. 235
VISCOSIDAD ABSOLUTA A (60 °C, 300 mm de Hg)	P	23033	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD, 60 °C, S-29	P	5830	Informar
ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO	°C	---	Informar
TIPO DE POLIMERO	---	---	Informar
CONTENIDO DE POLIMERO	---	---	Mín. 3
HORNO ROTATORIO			
PERDIDA POR CALENTAMIENTO	%	0,2	Máx. 0,8
PENETRACION DE RESIDUO, % ORIGINAL	%	78	Mín. 65

CURVA DE VISCOSIDAD			
VISCOSIDAD BROOKFIELD 120°C, HUSILLO S-21, 10 RPM, 44,0 % TORQUE	cP	2200	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 135°C, HUSILLO S-21, 30 RPM, 62,3 % TORQUE	cP	1038	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 150°C, HUSILLO S-21, 50 RPM, 52,0 % TORQUE	cP	520	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 170°C, HUSILLO S-21, 100 RPM, 48,8 % TORQUE	cP	244	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 180°C, HUSILLO S-21, 100 RPM, 37,7 % TORQUE	cP	189	Informar

Tabla 7: Ensayos físico químicos Asfalto Modificado con Polímeros aditivado con Kaoamin

ENSAYOS	UNIDAD	RESULTADOS	REQUISITO
PENETRACION (25 °c. 100 g, 5 s)	0,1 mm	71	Mín. 60 - Máx. 80
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°C	64,6	Mín. 65
INDICE DE PENETRACION (pen25-pto. abl)	IP	2,9	Mín. 2,0
INDICE DE PENETRACION (pen15-pen35)	IP	---	Informar
INDICE DE PENETRACION (pen25-pen40)	IP	1,7	Informar
DUCTILIDAD (25 °C, 5 cm/min.)	cm	103	Mín. 80
DUCTILIDAD (5 °C, 5 cm/min.)	cm	36	Mín. 50
INDICE DE FRAASS	°C	---	Máx. -17
RECUPERACION ELASTICA LINEAL (13°C, 20cm, 1h)	%	86	Mín. 50
RECUPERACION ELASTICA POR TORSION, 25 °C	%	69	Mín. 60
PUNTO DE INFLAMACION	°C	---	Mín. 235
VISCOSIDAD ABSOLUTA A (60 °C, 300 mm de Hg)	P	21358	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD, 60 °C, S-29	P	10000	Informar
ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO	°C	---	Informar
TIPO DE POLIMERO	---	---	Informar
CONTENIDO DE POLIMERO	---	---	Mín. 3
HORNO ROTATORIO			
PERDIDA POR CALENTAMIENTO	%	0,19	Máx. 0,8
PENETRACION DE RESIDUO, % ORIGINAL	%	76	Mín. 65

CURVA DE VISCOSIDAD			
VISCOSIDAD BROOKFIELD 120°C, HUSILLO S-21, 10 RPM, 50,3 % TORQUE	cP	2515	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 135°C, HUSILLO S-21, 30 RPM, 66,1 % TORQUE	cP	1102	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 150°C, HUSILLO S-21, 50 RPM, 56,5 % TORQUE	cP	565	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 170°C, HUSILLO S-21, 100 RPM, 50,0 % TORQUE	cP	250	Informar
VISCOSIDAD BROOKFIELD 180°C, HUSILLO S-21, 100 RPM, 36,3 % TORQUE	cP	182	Informar

4.1.3 Mezcla de Áridos.

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 Tabla 8:

Tabla 8: Granulometría de la mezcla de áridos.

		M1	M2	M3		
DOSIFICACION		18%	29%	53%		
GRANULOMETRÍA DE MEZCLA DE ÁRIDOS						
TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA EN PESO (%)			ESPECIFICACION IV-A-12	
ASTM	mm				min	Max
3/4"	20	100			100	100
1/2"	12,5	88			80	95
3/8"	10	76			70	85
Nº 4	5	46			43	58
Nº 8	2,50	32			28	42
Nº 16	1,25	23			---	---
Nº 30	0,63	18			13	24
Nº 50	0,315	13			8	17
Nº 100	0,16	8			6	12
Nº 200	0,08	6,4			4	8

Con la ponderación de las distintas fracciones de material se obtienen las propiedades físicas de la mezcla de áridos dadas por la Tabla 9, donde para realizar el ensayo de adherencia de Riedel y Weber se utilizó el cemento asfáltico modificado con polímeros de la Tabla 6.

Tabla 9: Constantes físicas e hídricas de la mezcla de áridos.

PARTICULAS CHANCADAS	(%)	99	MIN 95
PARTICULAS LAJEADAS	(%)	0,4	MAX 10
INDICE DE LAJAS	(%)	16,4	
INDICE DE PLASTICIDAD	(%)	NP	NP
DESINTEGRACION POR SULFATOS	(%)	0,6	MAX 12
DESGASTE DE LOS ANGELES	(%)	15,5	MAX 25
ADHERENCIA METODO ESTATICO	(%)	+95	MAX 95
ADHERENCIA RIEDEL WEBER	(%)	2-7	MIN 0-5
EQUIVALENTE DE ARENA	(%)	54,3	MIN 45
DENSIDAD REAL SECA	(kg/m ³)	2.686	
DENSIDAD EFECTIVA	(kg/m ³)	2.710	
ABSORCION DE ASFALTO	(%)	0,34	
DMM a 5,5 % de CA	(kg/m ³)	2.498	
DENSIDAD DE ASFALTO (25°C)	(kg/m ³)	1.030	

4.1.4 Dosificación de la mezcla asfáltica según método Marshall.

Mediante este método se logra obtener el contenido óptimo de bitumen que requiere la mezcla asfáltica, este contenido es expresado como un porcentaje sobre el peso del agregado mineral. En general la obtención del óptimo de cemento asfáltico se calcula como el promedio de tres valores, ellos son los que maximizan la estabilidad y la densidad, y aquel que haga que la mezcla se encuentre en el valor medio de los huecos especificados. Luego de obtener el porcentaje óptimo se verifica que con él cada uno de los parámetros cumpla con la especificación.

Para este trabajo se realizó el diseño de una mezcla patrón con asfalto modificado con polímeros (cuyo nombre comercial es Cariphalte MD) cuyo contenido óptimo es replicado para las otras tres variaciones de cemento asfáltico, los parámetros del diseño Marshall de la mezcla son los que están dados por la tabla 10.

Tabla 10: Parámetros Marshall de la dosificación.

CARIPHALTE MD (Shell Bitumen)	(% C/r ag.)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	
DENSIDAD	(kg/m ³)	2.372	2.386	2.390	2.386	2.372	
HUECOS	(%)	6,3	5,1	4,3	3,9	3,8	4 - 5
VAM	(%)	15,5	15,4	15,7	16,2	17,1	MIN 13
FLUENCIA	(0,01")	11,3	11,3	12,3	13,7	15,7	8 - 14
ESTABILIDAD	(N)	10.899	12.424	12.661	12.152	10.711	MIN 12.000
ESTABILIDAD / FLUENCIA	(kgf/cm)	3.863	4.404	4.124	3.572	2.747	
HUECOS LLENOS	(%)	59,1	66,7	72,4	76,3	77,9	65-75
RAZON F/A		1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	MIN 1,3
DMM	(kg/m ³)	2.532	2.515	2.498	2.481	2.465	

Estos datos son llevados luego a gráficas de donde se pueden interpolar los valores óptimos de densidad, fluencia y contenido de huecos, con ellos es calculado el contenido óptimo de cemento asfáltico en la mezcla, resultando ser $5,2 \pm 0,3$ %.

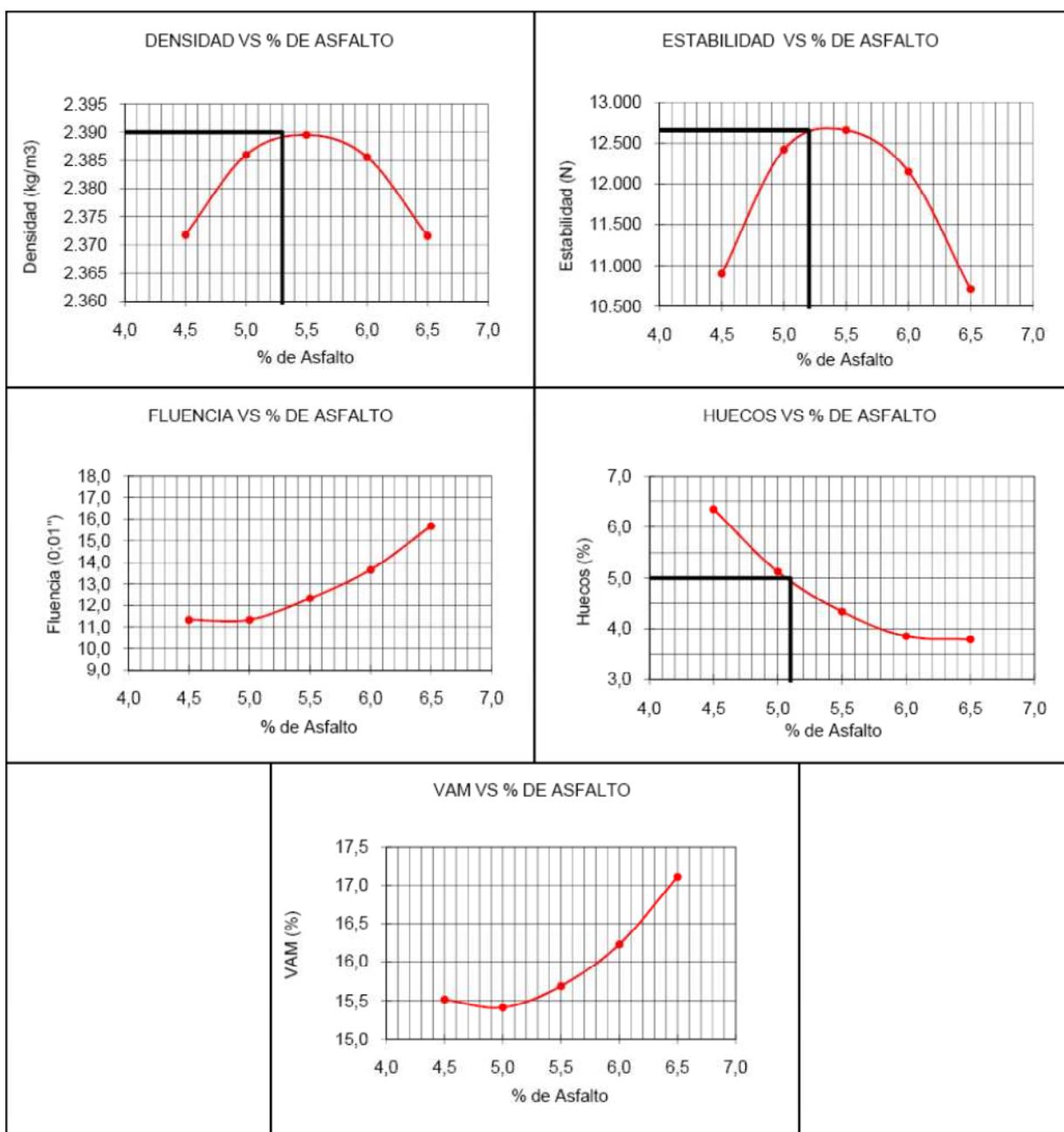


Figura 11: Gráficos diseño Marshall mezcla patrón.

Tabla 11: Cálculo del contenido óptimo de cemento asfáltico.

PARA MAXIMA DENSIDAD	(%)	5,3	
PARA MAXIMA ESTABILIDAD	(%)	5,2	
PARA 5,0 % DE HUECOS	(%)	5,1	
PROMEDIO	(%)	5,2	
CARIPHALTE MD (Shell Bitumen)	(% C/r a.g.)		5,2 ± 0,3
DENSIDAD MARSHALL	(kg/m ³)		2.389

4.2 Confección de probetas.

Para confeccionar las probetas que luego serán ensayadas se deben realizar los siguientes procesos:

4.2.1 Secado del material granular.

El material granular que será utilizado en la confección de probetas debe ser secado en horno hasta masa constante. Esta condición se obtiene cuando dos pesadas sucesivas, separadas por una hora de secado a 110 ± 5 °C, difieren por un porcentaje igual o inferior al 0,1% de la menor masa determinada.

4.2.2 Corte de los materiales.

Los agregados pétreos, dada la granulometría que se representa, deben ser cortados en las mallas 1/2" (12,5 mm), 3/8" (10 mm), N° 4 (5 mm) y N° 8 (2,5 mm), para luego reconstituir la granulometría patrón con que se hizo el diseño.

4.2.3 Preparación de las bandejas.

La preparación de las bandejas con la mezcla de áridos requiere de una masa total distinta para cada tipo de compactación, para la compactación que se hace por vibrado la masa requerida es aquella que se calcula a partir de una densidad del 99% de la densidad Marshall y debe ocupar un molde de 300x300x51 mm. La masa de árido requerida para la confección de probetas mediante el compactador giratorio es de 4900 gramos.

Conocida la masa total de árido requerida para la fabricación de una probeta, se deben calcular las masas correspondientes a cada fracción de áridos, para luego pesar sucesivamente en un recipiente tarado las cantidades de cada fracción necesarias para la fabricación de una probeta.

4.2.4 Mezclado de las probetas.

Los áridos se calientan a una temperatura 30 °C superior a la temperatura de mezclado. Al mismo tiempo se calienta el asfalto hasta la temperatura indicada en el diseño.

Cuando el asfalto y el árido se encuentran a las temperaturas deseadas, se coloca el árido en el recipiente del mezclador mecánico, luego se vierte el contenido necesario de asfalto dado por el diseño Marshall y calculado como un porcentaje de la masa de árido y se mezcla durante 2 minutos procurando que la totalidad de los pétreos se encuentren recubiertos por asfalto.

Tabla 12: Temperaturas de mezclado y compactación.

Cemento Asfáltico	Temperatura Mezclado (°C)	Temperatura Compactación (°C)
CA24	157	147
CA24 Aditivado con Kaoamin	157	147
Modificado con Polímeros	170	160
Modificado con Polímeros Aditivado con Kaoamin	170	160

4.2.5 Compactación de las probetas.

4.2.5.1 Compactación por vibrado.

- Equipo de compactación

Conjunto de compactación: Está formado por el molde, el collarín y los cuatro angulares contruidos en acero según se muestra en la Figura 12

Base de compactación: Está formada por una pieza prismática de hormigón de 60 x 60 x 20 cm. como mínimo, y apoyada en una de sus caras mayores sobre un dispositivo de anclaje con amortiguación tal y como se muestra en la Figura 13.

Elemento compactador: Consiste en una placa de acero sobre la que van montados dos vibradores iguales, cuyas excéntricas, de 9,5 kg de masa y girando a la velocidad de 314 rad/s (3.000 r.p.m.), proporcionan cada uno una fuerza centrífuga de 3 kN (300 kgf) y dispuestos

ambos de tal forma que sus excéntricas giren hacia el centro de la placa. Su forma y dimensiones se indican en la Figura 14.

Dispositivos de extensión y enrase: Estos elementos son utilizados para lograr una distribución homogénea de la mezcla y su posterior enrase, se detallan en la Figura 15.

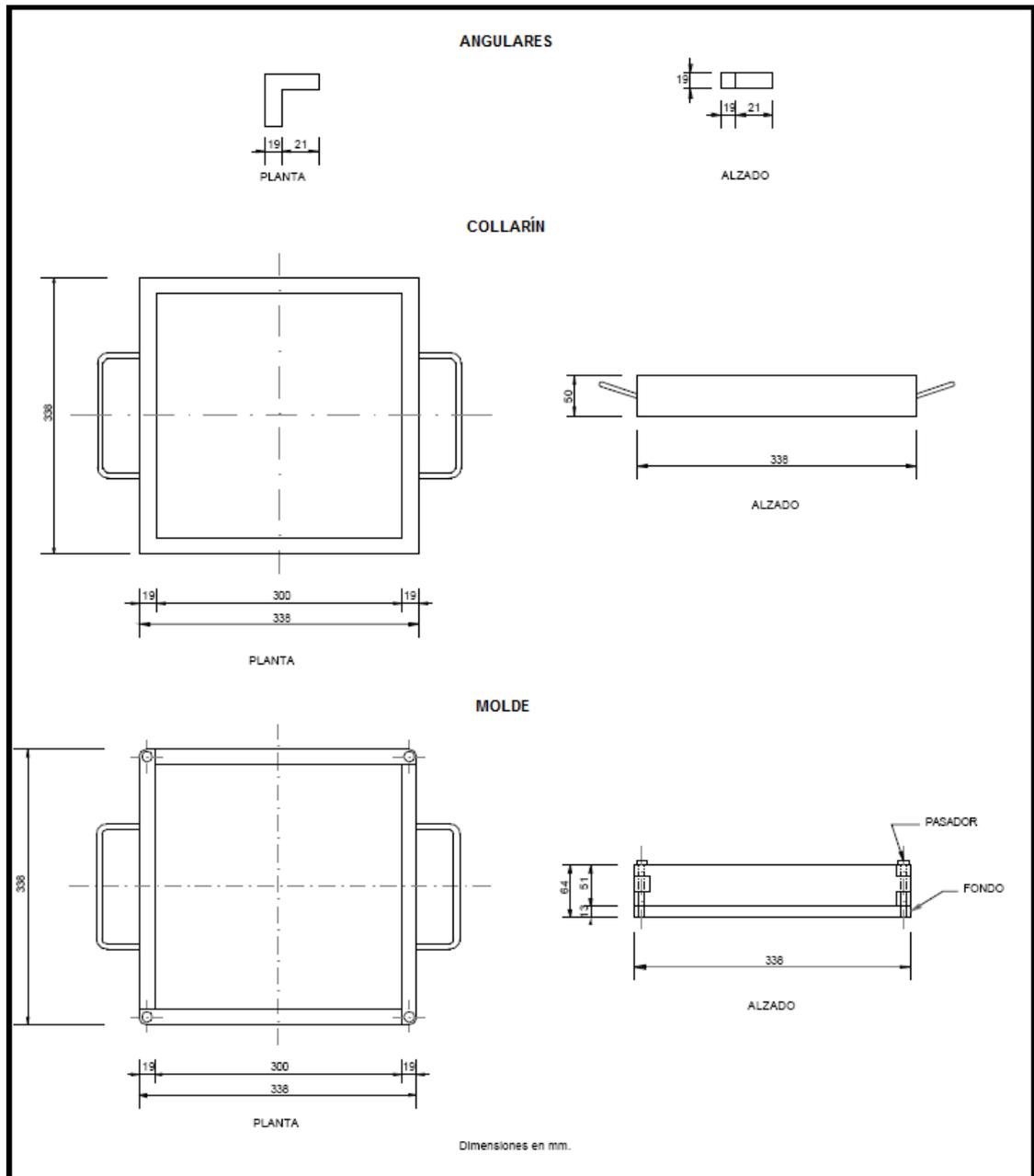


Figura 12: Conjunto de compactación.

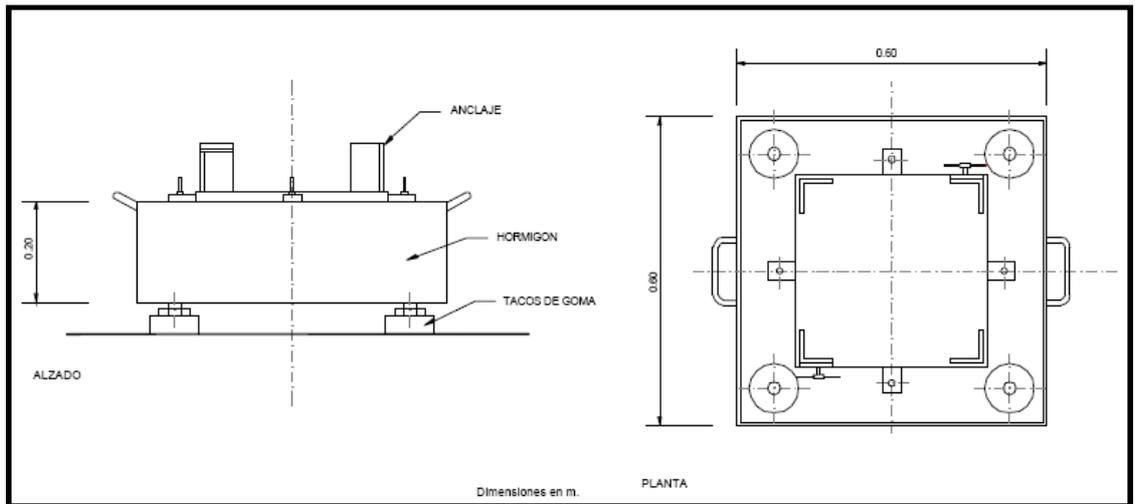


Figura 13: Base de compactación.

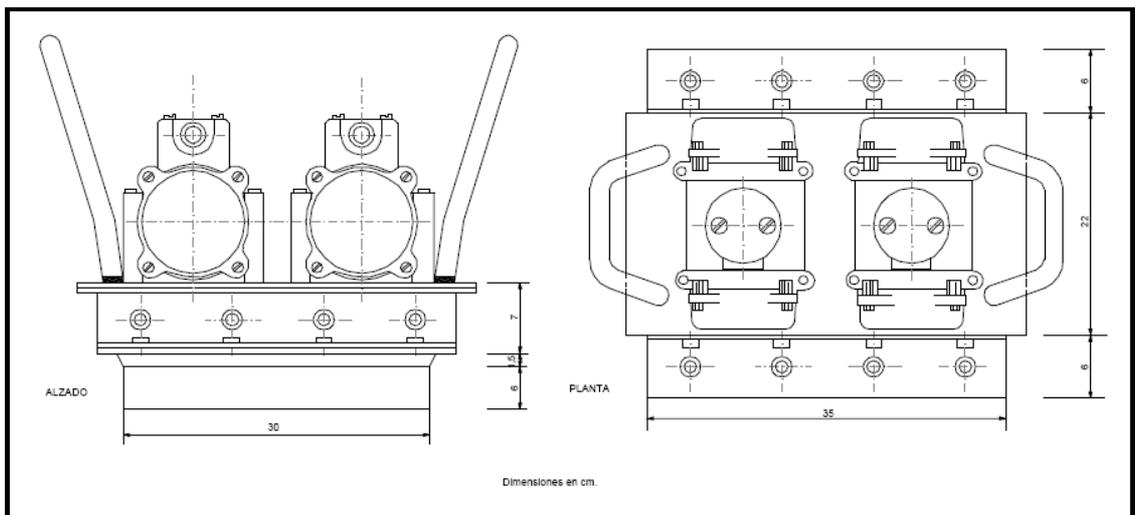


Figura 14: Elemento compactador.

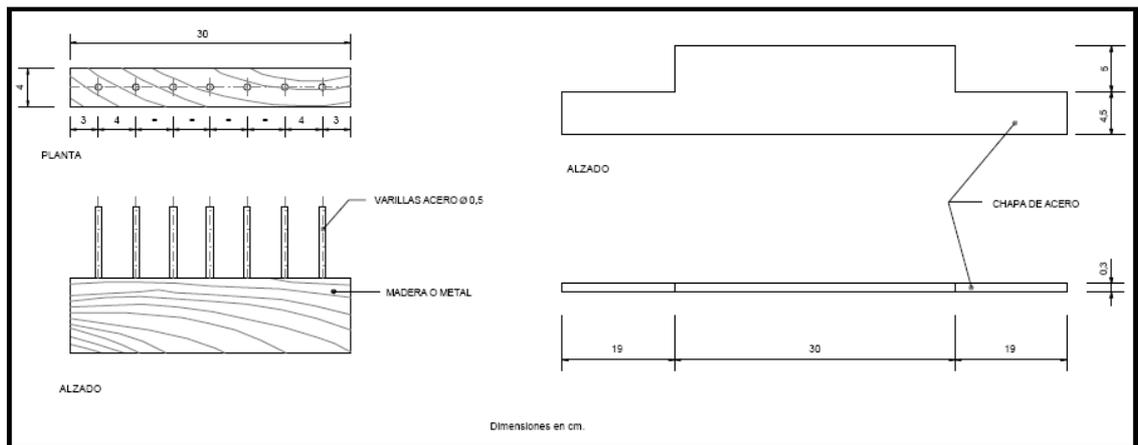


Figura 15: Dispositivos de extensión y enrase.

- Método de compactación

Previo a la etapa de compactación de la mezcla se debe calentar el molde y el collarín a una temperatura 15 °C superior a la de compactación. Una vez alcanzada la temperatura se ubica el molde y el collarín sobre los anclajes de la base de compactación. Luego se vierte la mezcla en el molde, la cual debe estar como mínimo 10 °C por sobre la temperatura de compactación, distribuyéndola uniformemente, enrasándola y evitando la segregación del material.

Con el elemento compactador se realiza una compactación inicial de 75 segundos de duración, luego de la cual se desmonta el collarín y se reemplaza por cuatro angulares que van colocados en las esquinas del molde y se completa el proceso de compactación mediante otros 3 periodos de 75 segundos cada uno, girando el compactador en ángulos de 90° en un mismo sentido antes de comenzar cada uno de estos periodos.

La compactación se considera correcta cuando la altura de la probeta está dentro del rango ± 2 mm respecto de los bordes del molde.

El tamaño de las probetas varía dependiendo de la máquina en la cual están destinadas a ser ensayadas, así las probetas que serán ensayadas en la máquina española en condición seca (aire) se ensayarán con las mismas dimensiones que quedan una vez compactadas en el molde, las probetas que se ensayen en condición húmeda disminuirán su tamaño con una sierra industrial quedando con dimensiones en planta de 295 x 295 mm debido a que es necesario dado su acondicionamiento, mientras que los especímenes que se destinarán a

mostrar su desempeño en la máquina de Hamburgo, serán extraídos de la probeta que resulta de esta compactación con una testiguera de 6 in (152 mm) de diámetro, obteniendo 2 testigos circulares por probeta. A estos testigos se les cortará un borde para formar un “8” con el testigo sacado de la misma probeta fabricada por vibrado, permitiendo ser colocados en la máquina de ensaye.



Figura 16: Extracción testigo para ensayar en máquina de Hamburgo.



Figura 17: Probetas formando “8”.

4.2.5.2 Compactación con Compactador Giratorio.

El principio consiste en que la mezcla bituminosa se encuentra contenida en un molde cilíndrico, limitada por placas de suplemento, y durante todo el ensayo se mantiene a una temperatura constante dentro de las tolerancias especificadas.

La compactación se consigue por la acción simultánea de una compresión estática débil, y de la acción de esfuerzo cortante resultante del movimiento del eje de la probeta, que genera una superficie cónica de revolución de vértice O y cuyo ángulo en el vértice es 2ϕ , mientras que los planos de las bases de la probeta deberían permanecer aproximadamente perpendiculares al eje de la superficie cónica (ver Figura 18).

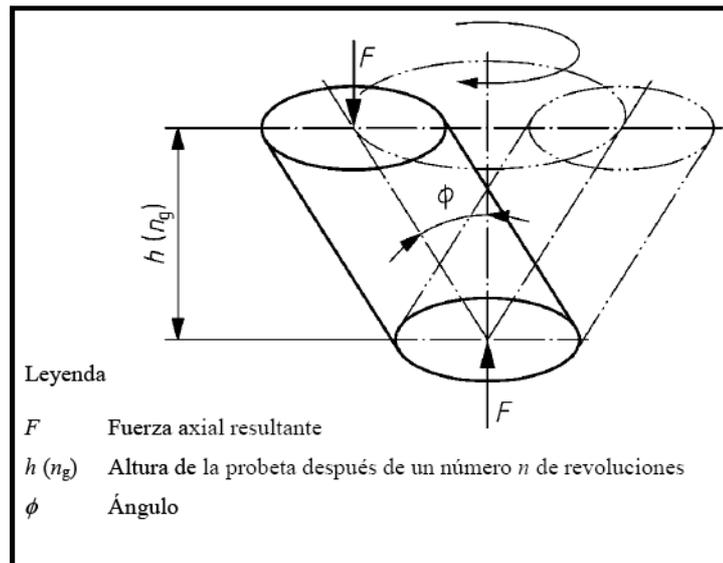


Figura 18: Diagrama del movimiento de la probeta en el compactador giratorio.

- Equipo de compactación

Dispositivo de ensayo: El dispositivo es capaz de compactar la probeta mediante el principio descrito anteriormente, con un ángulo ϕ ajustable entre $0,5^\circ$ y $2,0^\circ$ (ajustado en 1°) y una presión de consolidación de 200 a 1.000 kPa (ajustada en 600 kPa). Puede mantener, al menos, un punto en la proximidad del plano central, situado a una distancia comprendida entre 30 mm y 45 mm del eje del molde, así como la temperatura de ensayo prescrita durante el ensayo con una tolerancia de $\pm 10^\circ\text{C}$. La velocidad de rotación durante el ensayo es de $30 \pm 0,5$ r.p.m.

Moldes metálicos: Los moldes deben tener una dureza superficial superior a 48 HRC de acuerdo con la Norma ISO 6508-1, además de contar con una rugosidad Ra inferior a $1\ \mu\text{m}$ (ISO 4287) o bien una rugosidad inicial inferior a $0,8\ \mu\text{m}$ (ISO 4287), y no pueden presentar defectos, grietas o señales perceptibles a simple vista. En la zona de contacto con el material durante la

compactación tienen un diámetro de $150 \pm 0,1$ mm, la altura debe ser compatible con el volumen de material de las probetas y el espesor mayor de 7,5 mm.

Placas de suplemento metálicas redondas: Estas placas deben contar con una superficie activa uniforme (la superficie que vaya a estar en contacto con el material) con una tolerancia de $\pm 0,1$ mm y de una dureza igual o superior a 55 HRC, asimismo una rugosidad Ra inferior a $0,8 \mu\text{m}$ o bien una rugosidad inicial inferior a $0,8 \mu\text{m}$ (ISO 4287), y no pueden presentar defectos, grietas o señales perceptibles a simple vista. Deben tener una forma adecuada a las cinéticas del movimiento, y un diámetro tal que el juego entre la placa de suplemento y el molde esté comprendido entre 0,1 mm y 0,6 mm.

Dispositivo para medir la distancia entre las placas de suplemento.

Dispositivo para contar el número de rotaciones durante una revolución.



Figura 19: Compactador giratorio y gato para desmolde.

- Método de compactación

La determinación del número de giros de compactación de la mezcla se realiza mediante una mezcla patrón compactada a 120 giros, luego de ello se calcula su densidad mediante el "Método para determinar la densidad real de las mezclas asfálticas compactadas" (Manual de carreteras 8.302.38 y LNV 13). Utilizando las alturas correspondientes a cada giro de compactación y el diámetro interior del molde, se calculan las densidades geométricas para cada giro y se corrigen mediante un factor que se determina a través de una relación entre la densidad real de la mezcla asfáltica y la densidad geométrica a 120 giros. Luego se elige aquel número de giros con el cual se obtiene una densidad del 99% de la densidad Marshall. En este trabajo se determinó que el número de giros necesarios para todas las mezclas es de 50.

Previo a la etapa de compactación se calienta el molde a una temperatura de $\pm 10^{\circ}$ C la temperatura de mezclado, luego los moldes se lubrican con un desmoldante aplicado con una brocha. Se coloca papel filtro en la parte inferior del molde y se vierte la mezcla por medio de un embudo, se acomoda la parte superior de la mezcla con una espátula sin aplicar fuerza vertical y se coloca otro papel filtro en la cara superior de lo que será la probeta.

Luego el molde con la mezcla en su interior se coloca en el compactador giratorio procurando que la temperatura de la mezcla sea superior en 10° C la temperatura de compactación, se programa el equipo con el número de ciclos que se ha determinado previamente y se comienza la compactación. Luego que se enfrían las probetas son desmoldadas para ser cortadas mediante una sierra industrial en los espesores de ensayo, también se les realiza un corte en el borde para poder formar un "8", permitiendo ser colocadas en las máquinas de ensaye.

Los espesores de las probetas varían dependiendo de la máquina en la cual están destinadas a ser ensayadas, así el espesor de las probetas que serán ensayadas en la máquina española tanto en condición seca (aire) como en condición húmeda será de 50 mm., mientras que las probetas destinadas a mostrar su desempeño en la máquina de Hamburgo se dejan con un espesor de 60 mm.

La parte inferior cortada de la probeta se designa con la letra A, mientras que la parte superior con la letra B, estas dos unidades sacadas de una misma probeta fabricada en el compactador giratorio se unen para formar parte del mismo ensayo.

4.3 Máquinas de ensayo.

4.3.1 Máquina de la Rueda de Carga (Wheel Tracking) Laboratorio de asfaltos (IDIEM).

Corresponde a un equipo de fabricación nacional en base a un modelo de La Máquina para el ensayo en Pista de Laboratorio desarrollado por el Centro de Carreteras de España (CEDEX) y consiste en un carro móvil de forma rectangular, soportado en cuatro puntos por ruedas metálicas, capaces de deslizar sobre perfiles de apoyo en forma de "L". El carro va unido a un motor que produce un movimiento alternativo horizontal de vaivén. Por encima de este carro va situada la rueda de ensayo, montada en un brazo sustentador, unido en uno de sus extremos a un soporte rígido y provisto al otro extremo de un dispositivo para colocar los pesos que cargarán la rueda. El carro móvil dispone de los elementos necesarios para la sujeción de la probeta de ensayo y lleva en uno de sus lados una superficie de medida que permite, mediante un micrómetro de esfera, solidario con la rueda de ensayo, realizar la lectura de las deformaciones verticales que se producen en la probeta durante el ensayo. La rueda de ensayo es metálica y dotada de una banda de rodadura de goma maciza de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor. El mecanismo de arrastre del carro móvil está diseñado para permitir una frecuencia del movimiento de vaivén de 42 ± 1 pasadas por minuto, es decir, 84 ± 2 pasadas por punto del espécimen en ensayo en un minuto, y un recorrido en cada sentido de $23 \pm 0,5$ cm.

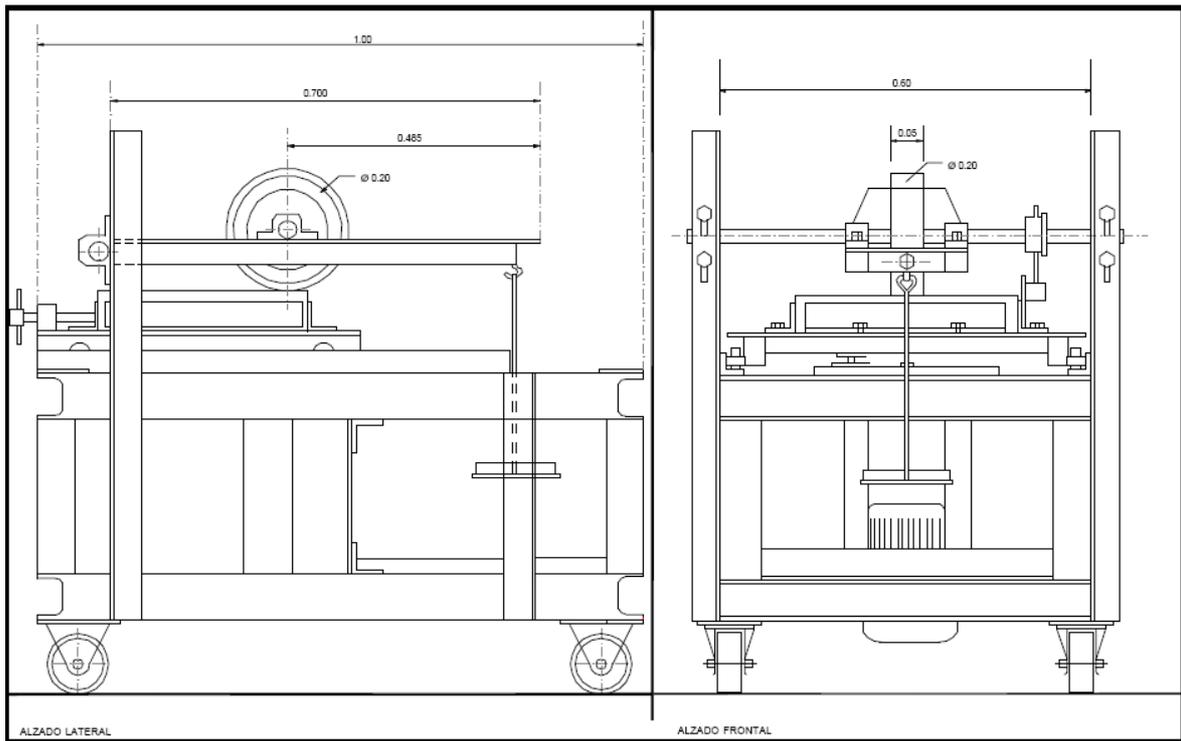


Figura 20: Máquina de ensayo Wheel Tracking.

Para lograr que durante el ensayo la temperatura sea constante, se dispone de una cámara que permite alojar la máquina y mantener esta temperatura durante todo el ensayo con una variación de $\pm 1^\circ \text{C}$. Los detalles de la cámara se pueden ver en la Figura 21.

Para la adaptación de probetas circulares se confeccionan adaptadores de resina epóxica similares a los de la máquina de Hamburgo (se detalla en el apartado 4.3.2.) pero sólo con un espesor de 5 mm, estos adaptadores se complementan con maderos usados de forma paralela al paso de la rueda para disminuir el espacio vacío.

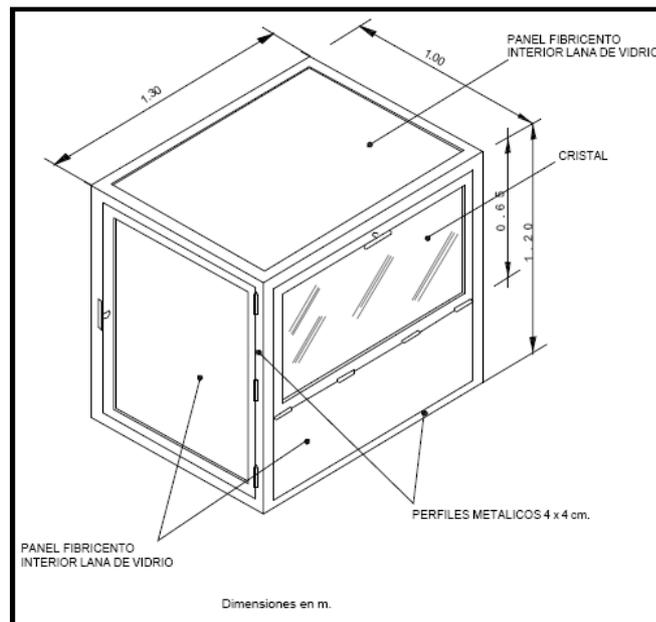


Figura 21: Cámara termostática.

4.3.2 Máquina de ensayo Hamburg Wheel Tracking Device (HWTB) Laboratorio CDI Bitumix.

La Máquina: debe poseer un dispositivo eléctrico capaz de mover una rueda de acero con un diámetro de 203,6 mm (8 pulgadas) y un ancho de 47 mm (1,85 pulgadas) sobre una muestra de prueba. La carga aplicada por la rueda es de 705 ± 22 N (158 ± 5 lbs.). La rueda debe estar sobre la probeta, y su posición debe variar en forma sinusoidal en el tiempo. La rueda debe ser capaz de hacer 50 ± 2 pasadas por minuto. La velocidad máxima de la rueda debe ser de aproximadamente 1,1 ft/s. (0,305 m/s) y se llega a la mitad de la losa.

Sistema de control de temperatura: capaz de mantener la temperatura del baño de agua a la temperatura de ensayo ± 2 °C en un rango de 25 a 70 °C. Este baño debe poseer un sistema mecánico que permita la circulación del agua para estabilizar la temperatura dentro del tanque de la muestra.

Sistema de medición de de la profundidad de la huella: Un transductor diferencial variable lineal (LVDT), dispositivo capaz de medir la profundidad del surco dejado por la rueda de acero con una precisión de 0,01 mm, en un rango mínimo de 20 mm. El sistema debe estar montado para medir la profundidad de la huella en la mitad del camino de la rueda en la losa. Las medidas de rutina de la profundidad se realizarán por lo menos cada 400 pasadas de la rueda

(el equipo con que se cuenta permite medir cada 2 pasadas). Este sistema debe ser capaz de medir la profundidad del surco dejado sin parar la rueda y hacer referencia a qué número de pasadas corresponde. La obtención de los datos es totalmente automatizada y se realiza a través de computador.

Contador de pasadas de la rueda: un solenoide sin contacto, que cuenta cada pasada de la rueda por encima de la muestra. La información de este contador se debe acoplar a la medida de la profundidad de la rodadura, permitiendo expresar la profundidad del surco dejado en función de las pasadas de la rueda.

Sistema de fijación de las muestras: Una bandeja de acero inoxidable que mantenga estable a la máquina en el baño de agua. Este sistema debe restringir el desplazamiento de la muestra durante la prueba y a su vez suspenderla, permitiendo un mínimo de 20 mm de agua libre circulando por todos los lados de la muestra.

Adaptadores para probetas circulares: adaptadores de resina epóxica que permitan la fijación de las muestras a la bandeja de acero inoxidable, se describen sus medida en la Figura 22.

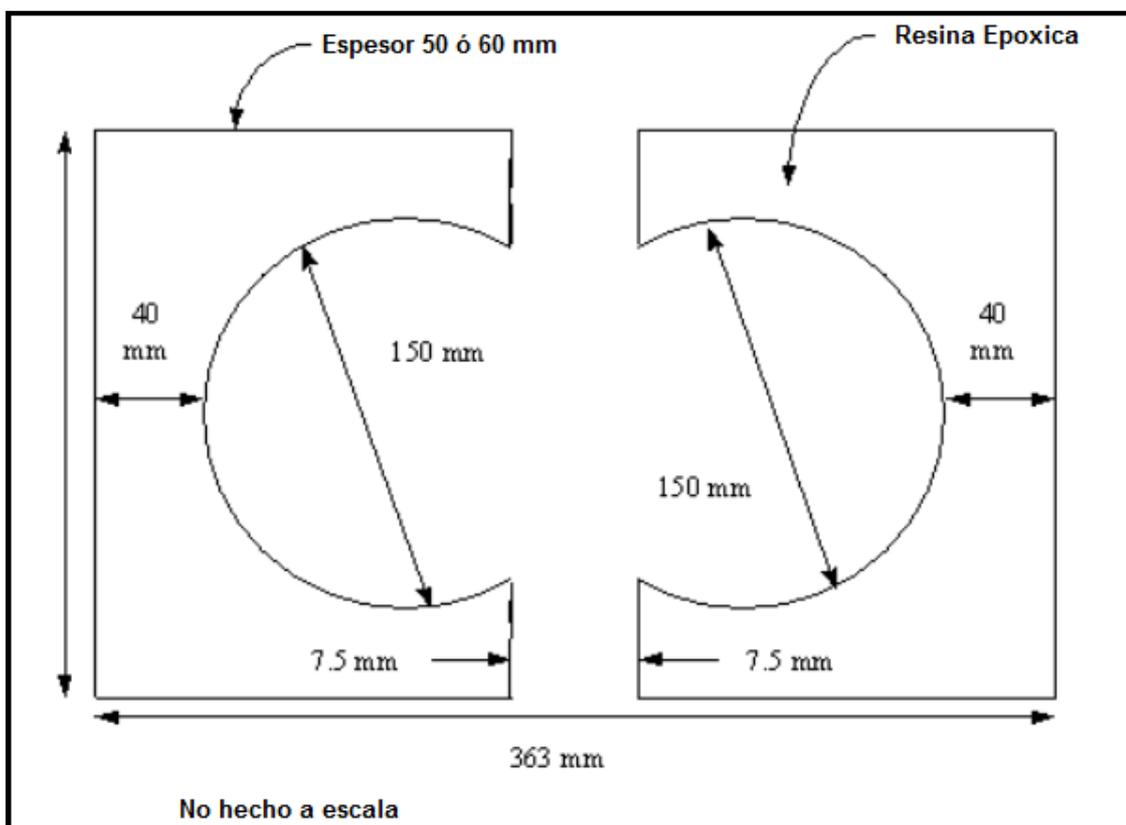


Figura 22: Adaptador para probeta circular Máquina de Hamburgo.

4.4 Ensayo de las probetas.

Existen tres posibilidades de ensayo para las probetas, pero al ser todos estos ensayos de naturaleza destructiva, cada probeta sólo puede ser sometida a uno de ellos.

4.4.1 Ensayo en Aire (ensayo en pista de laboratorio o ensayo de rueda de carga)

El ensayo en aire corresponde al ensayo que establece la Norma Española NLT-173/84 homologado en el manual de carreteras en la especificación 8.302.42 del Volumen 8. Para realizar este ensayo uno de los factores más importantes que debe ser controlado es la temperatura de ensayo, la cual en todo momento deberá ser de 60 ± 1 °C para todo tipo de mezclas y zonas climáticas.

La presión de contacto ejercida por la rueda cargada sobre la superficie de la probeta durante todo el ensayo será de $9 \pm 0,25$ kgf/cm² para todo tipo de mezclas y zonas climáticas, el cumplimiento de este punto se verifica según calibración realizada con el procedimiento que aparece en el Anexo A, determinando un peso de la rueda de 93,6 kgf y un área de apoyo de esta misma de 10,5 cm², resultando una presión de contacto de 8,91 kgf/cm².

Luego que las probetas se encuentran frías son colocadas en uno de los moldes que se utilizan para la compactación por vibrado, con los adaptadores si es necesario (probetas circulares), a continuación se introduce la probeta en un horno regulado a una temperatura de 60 ± 2 °C durante al menos 4 horas antes de ejecutar el ensayo.

La cámara termostaticada debe ser encendida a la temperatura de ensayo 2 horas antes del inicio de éste. Posteriormente se saca la primera probeta del horno y se introduce dentro de la cámara. Se fija el molde a los anclajes sin que la probeta toque en ningún momento la rueda. La cámara se cierra por unos 30 minutos para lograr una homogeneización de la temperatura.

Luego se apoya la rueda sobre la superficie de la probeta, poniendo en marcha el carro durante 3 pasadas completas con el fin de que la rueda se asiente en la probeta. Seguido de esto se detiene el carro, se ubica en el punto de medida del micrómetro colocándolo en cero. Se cierra la puerta lateral y se espera cinco minutos.

El ensayo se inicia al movilizar el carro por un periodo de 120 minutos seguidos. Se registran lecturas en los minutos 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 75, 90, 105, y 120. Posteriormente se levanta la rueda, se extrae la probeta y se coloca la siguiente repitiendo el mismo procedimiento.



Figura 23: Probeta confeccionada por vibrado ensayada en Aire.

4.4.2 Ensayo Húmedo

Para realizar este procedimiento se debe incluir a la máquina de ensayo un embudo conectado a una manguera, sistema que debe permitir introducir agua a la probeta desde el exterior de la cámara termostática.

Uno de los factores más importantes que debe ser controlado es la temperatura de ensayo, la cual en todo momento deberá ser de 60 ± 1 °C para todo tipo de mezclas y zonas climáticas.

La presión de contacto ejercida por la rueda cargada sobre la superficie de la probeta durante todo el ensayo será de $9 \pm 0,25$ kgf/cm² para todo tipo de mezclas y zonas climáticas, el cumplimiento de este punto se verifica según calibración realizada con el procedimiento que aparece en el Anexo A, determinando un peso de la rueda de 93,6 kgf y un área de apoyo de esta misma de 10,5 cm², resultando una presión de contacto de 8,91 kgf/cm².

Luego que las probetas están frías, se introduce la probeta en un baño de agua a una temperatura de 60 ± 2 °C durante al menos 2 horas antes de ejecutar el ensayo.

La cámara termostaticada debe ser encendida a la temperatura de ensayo 2 horas antes del inicio de éste. Posteriormente se saca la primera probeta del baño de agua y se pone en el

interior de una bolsa plástica, dentro de la bolsa y sobre la probeta se coloca un paño esponja absorbente elaborado de celulosa, la posición del paño esponja debe asegurar que siempre la rueda pasará sobre él. La absorción de agua del paño esponja debe ser mínimo 10 veces su peso y las dimensiones mínimas del paño esponja deben ser de 7 cm x 25 cm.

Luego se cierra la bolsa dejando espacio para conectar la manguera con la cual se incorporará agua a la probeta, posteriormente se coloca la bolsa con la probeta y el paño esponja en su interior, en uno de los moldes que se utilizan para la compactación por vibrado, con los adaptadores si es necesario (probetas circulares), luego este conjunto se introduce en la cámara.

Se fija el molde a los anclajes sin que la probeta toque en ningún momento la rueda, se conecta la manguera siendo totalmente sellada con cinta de embalaje. Utilizando el embudo que se conecta ahora a la probeta mediante la manguera, se incorpora agua a 60 ± 2 °C, siendo esta agua la necesaria para saturar el paño esponja (aproximadamente 200 cc). La cámara se cierra por unos 30 minutos para lograr una homogeneización de la temperatura.

Luego se apoya la rueda sobre la superficie del conjunto bolsa, paño y probeta, poniendo en marcha el carro durante 3 pasadas completas con el fin de que la rueda se asiente. Seguido de esto se detiene el carro, se ubica en el punto de medida del micrómetro colocándolo en cero. Se cierra la puerta lateral y se espera cinco minutos.

El ensayo se inicia al movilizar el carro por un periodo de 360 minutos seguidos. Se registran lecturas en los minutos 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, y luego cada 15 minutos hasta completar el ensayo. Luego de iniciado el ensayo se debe procurar incorporar aproximadamente 100 cm^3 de agua a 60 ± 2 °C cada 10 minutos durante la primera hora y cada 5 minutos posteriormente hasta concluir el ensayo. A continuación se levanta la rueda, se extrae la probeta y se desmonta del molde.



Figura 24: Ensayo Húmedo

4.4.3 Ensayo en la máquina de Hamburgo (HWTD)

Se utilizan dos duplas de muestras cilíndricas, para formar dos “8” debido a que la máquina permite realizar dos ensayos en forma simultánea, estas muestras deben estar moldeadas de acuerdo al procedimiento por vibrado para ensayar en máquina de Hamburgo o con el compactador giratorio. Luego se deben colocar los adaptadores para probeta circular en las bandejas de montaje, se ajustan las muestras en cada una de ellas y se aseguran. Se fijan las bandejas de montaje con el baño de agua vacío.

Luego se debe iniciar el software suministrado con la máquina e ingresar la información requerida para la prueba. La temperatura de ensayo es de 50 ± 1 °C para todas las mezclas asfálticas en caliente. Posteriormente se programa la máquina para llenar el baño con agua y para calentar el agua hasta la temperatura de ensayo, manteniendo la temperatura hasta que la prueba llegue a su fin. El ensayo se inicia dos horas después de comenzar a llenar el baño con agua (asegura al menos una hora con las probetas sumergidas en agua a temperatura de ensayo).

La máquina de prueba se detiene automáticamente cuando cumple las 20.000 pasadas o cuando se alcanza la profundidad máxima permitida.

El software permite obtener la información cada dos pasadas de rueda por punto de la probeta, midiendo la huella en cinco puntos distintos y entregando un promedio de las profundidades,

para efectos de este trabajo solo se usarán las profundidades promedio instantáneas en los mismos minutos que en el ensayo Húmedo, transformando de pasadas a tiempo con la fórmula:

$$t = \frac{P}{53} [\text{minutos}]$$

Donde P es el número de pasadas de la rueda y t el tiempo en minutos.



Figura 25: Probetas luego de ser ensayadas en Máquina Hamburgo.

4.4.4 Ensayo con probeta Superficialmente Seca.

Ensayo realizado con las especificaciones del ensayo en Aire (4.4.1), pero se modifica el acondicionamiento de la probeta en horno por un acondicionamiento de 4 horas dentro de un baño de agua a 60 °C.

4.4.5 Ensayo con Esponja Seca.

Ensayo realizado con las especificaciones del ensayo en Aire (4.4.1), pero en la zona de contacto entre la rueda y la probeta se coloca una esponja que cumple las especificaciones para una esponja en el ensayo Húmedo (4.4.2).

4.5 Cálculo de parámetros y tasas comparativas.

4.5.1 Ensayo en pista de laboratorio.

- A partir de las deformaciones obtenidas se calcula la Velocidad de Deformación mediante:

$$VD_{t_1-t_2} = \frac{Def_{t_2} - Def_{t_1}}{t_2 - t_1} * 1000$$

Donde:

$VD_{t_1-t_2}$: Velocidad de Deformación en el intervalo de tiempo t_1-t_2 expresado en [$\mu\text{m}/\text{min}$].

Def_{t_1} : Deformación registrada en el tiempo t_1 expresada en [mm].

Def_{t_2} : Deformación registrada en el tiempo t_2 expresada en [mm].

- A partir de la Velocidad de Deformación se calcula la Estabilidad Dinámica (sólo aplicable al uso de Wheel Tracking), parámetro que indica el número de pasadas en vaivén de la rueda necesarias para deformar en 1 mm la probeta. Se calcula mediante:

$$ED_{t_1-t_2} = \frac{42}{VD_{t_1-t_2}} * 1000$$

Donde:

$ED_{t_1-t_2}$: Estabilidad Dinámica en el intervalo de tiempo t_1-t_2 expresado en [pasadas/mm].

42 : Número de pasadas de vaivén del carro móvil por minuto expresado en [pasadas/min].

$VD_{t_1-t_2}$: Velocidad de Deformación en el intervalo de tiempo t_1-t_2 expresado en [$\mu\text{m}/\text{min}$].

4.5.2 Ensayo en la Máquina de Hamburgo.

La máquina de Hamburgo muestra un comportamiento típico el que se presenta en la Figura 26.

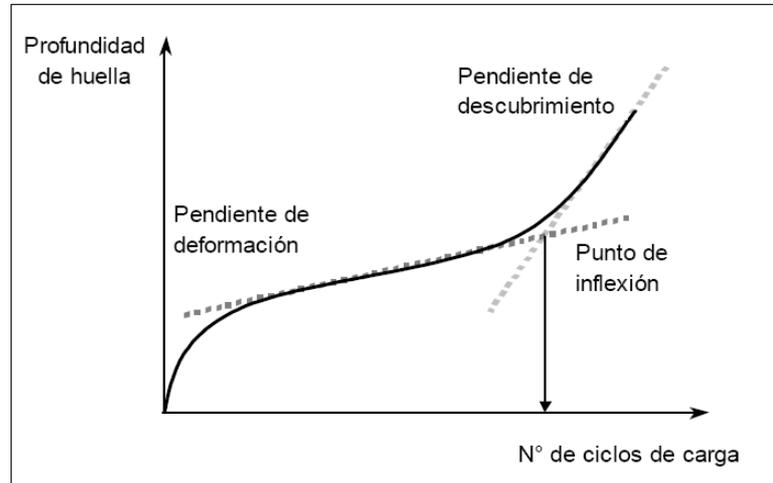


Figura 26: Curva deformación vs N° de ciclos – Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTM).

En el ensayo de Hamburgo se puede calcular el “punto de stripping” (stripping point o punto de inflexión), que es el número de pasadas en que se produce el cambio en la curvatura, se aproxima como el punto de intersección entre las rectas dadas por la pendiente de deformación (pendiente luego de la consolidación dada por la deformación plástica de la mezcla asfáltica) y la pendiente de descubrimiento (pendiente típica de deformación del material granular sin aporte del ligante).

En este trabajo se utilizará el tiempo en que ocurre el punto de stripping y no el número de pasadas, usando la transformación dada en 4.4.3 para las probetas ensayadas en la máquina de Hamburgo, así además de poder calcular el punto de stripping a las probetas que se ensayen en la HWTM, también se les podrá calcular a las probetas ensayadas en el ensayo Húmedo.

Capítulo 5

Resultados.

En este capítulo se muestra cada una de las gráficas de los ensayos realizados, las tablas con los correspondientes valores de los parámetros de deformación registrados se presentan en el Anexo B.

El procedimiento de ensaye corresponde a los descritos en 4.4 y la rotulación de las probetas especifica las siguientes variables:

Tipo de asfalto - Tipo de compactación – Tipo de ensayo - Nº de probeta (si es necesario)

Tipo de asfalto:

CA24: Cemento asfáltico convencional.

CA24K: Cemento asfáltico convencional con un 0,3% de aditivo promotor de adherencia.

CAMD: Cemento asfáltico modificado con polímeros.

CAMDK: Cemento asfáltico modificado con polímeros con 0,3% de aditivo promotor de adherencia.

Tipo de compactación:

V: Compactación realizada con placa vibratoria.

G: Compactación realizada con compactador giratorio.

Tipo de ensayo:

A: Ensayo realizado en aire (4.4.1).

Hu: Ensayo realizado en medio Húmedo (4.4.2).

Ha: Ensayo realizado en máquina de Hamburgo (4.4.3).

SSS: Ensayo realizado con probeta Superficialmente Seca (4.4.4).

ES: Ensayo realizado con una Esponja Seca (4.4.5).

5.1 Resultados ensayo en Aire.

5.1.1 Cemento asfáltico CA24.

5.1.1.1 Probetas compactadas por vibrado.

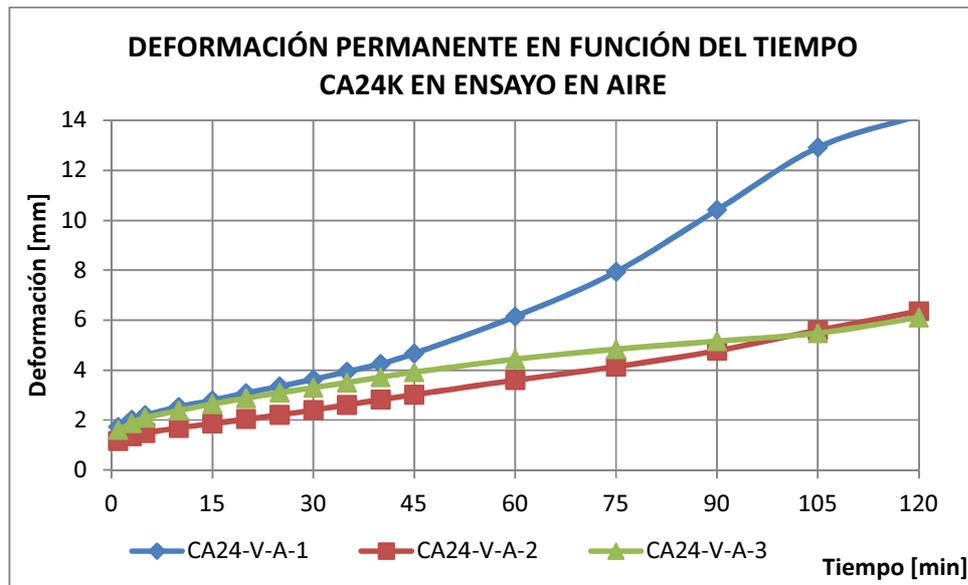


Figura 27: Probetas de CA24-V-A.

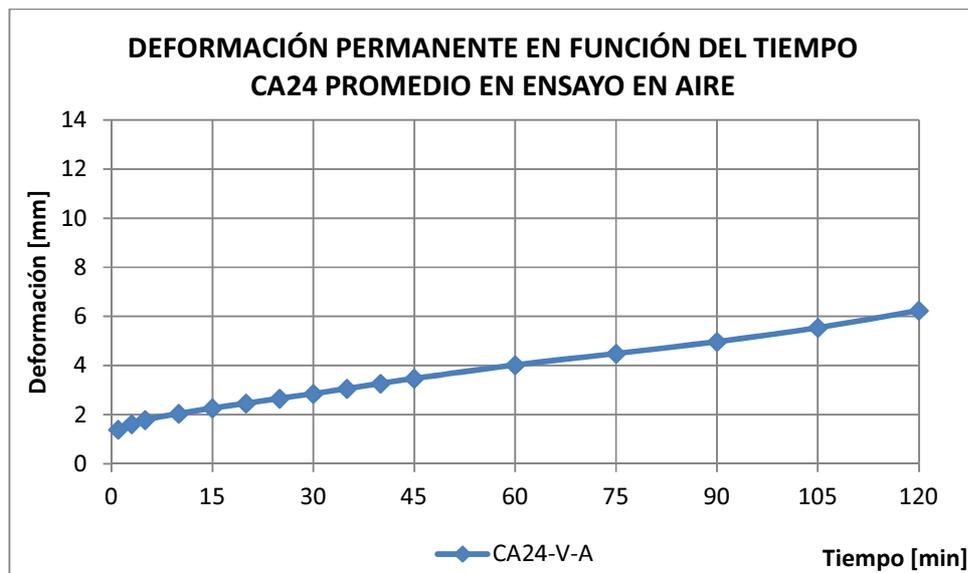


Figura 28: Promedio CA24-V-A.

La probeta CA24-V-A-1 no fue considerada en el promedio por poseer deformaciones muy por sobre las que se generan en las otras dos probetas.

5.1.1.2 Probetas compactadas con compactador giratorio.

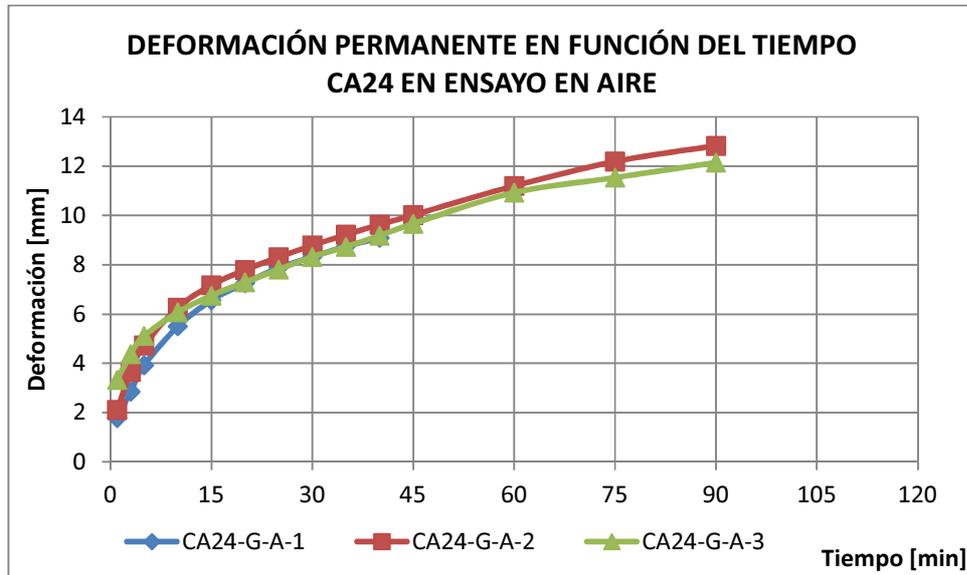


Figura 29: Probetas de CA24-G-A.

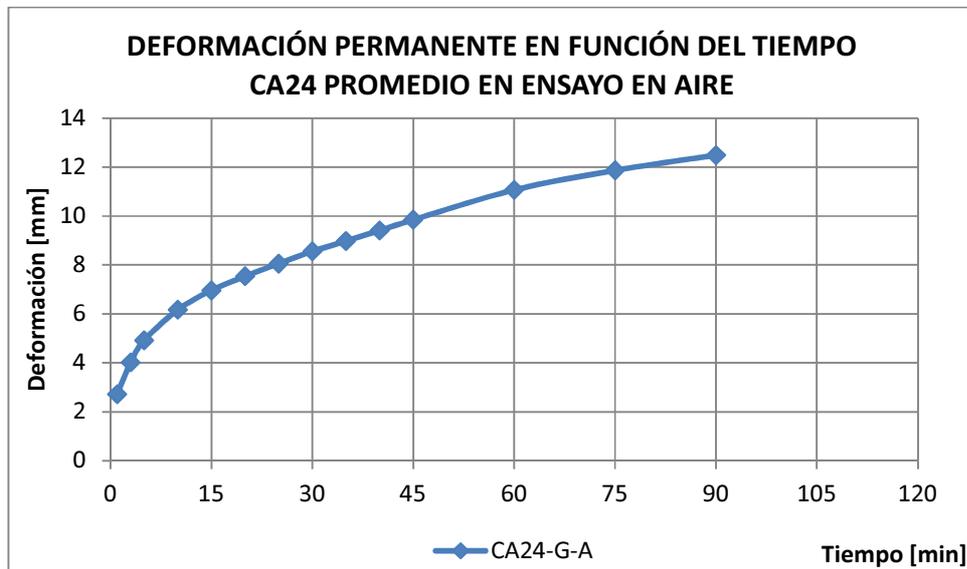


Figura 30: Promedio CA24-G-A.

La probeta CA24-G-A-1 no fue considerada en el promedio debido a que sólo se realizó el ensayo hasta el minuto 40, esto ya que el micrómetro fue incapaz de continuar midiendo.

5.1.2 Cemento Asfáltico CA24 con aditivo promotor de adherencia.

5.1.2.1 Probetas compactadas por vibrado.

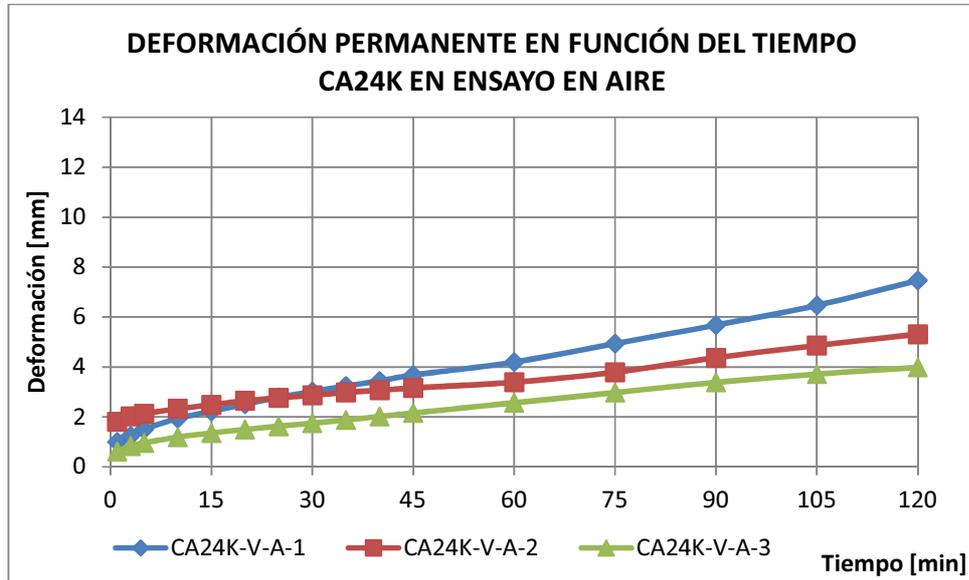


Figura 31: Probetas de CA24K-V-A.

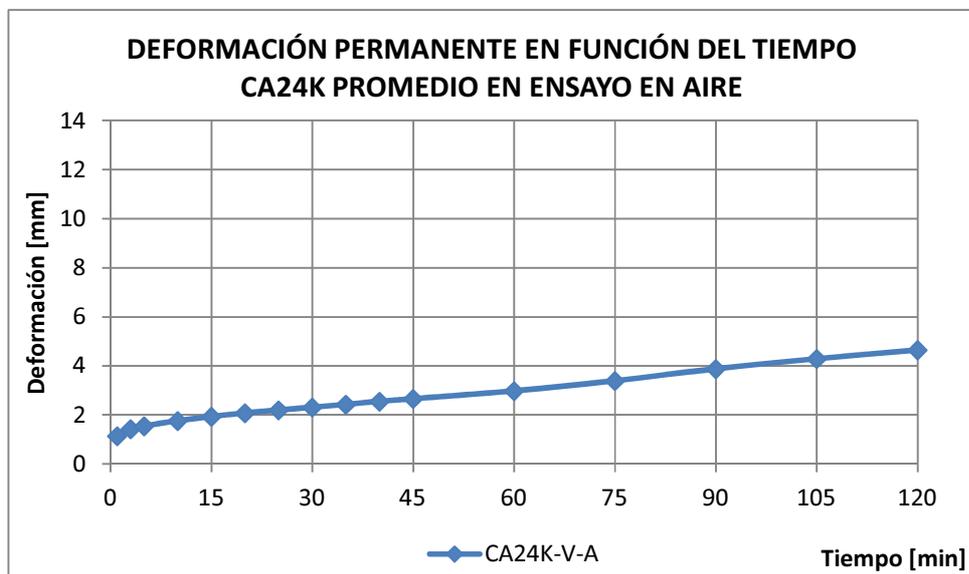


Figura 32: Promedio CA24K-V-A.

La probeta CA24K-V-A-1 no fue considerada en el promedio por poseer deformaciones muy por sobre las que se generan en las otras dos probetas.

5.1.2.2 Probetas compactadas con compactador giratorio.

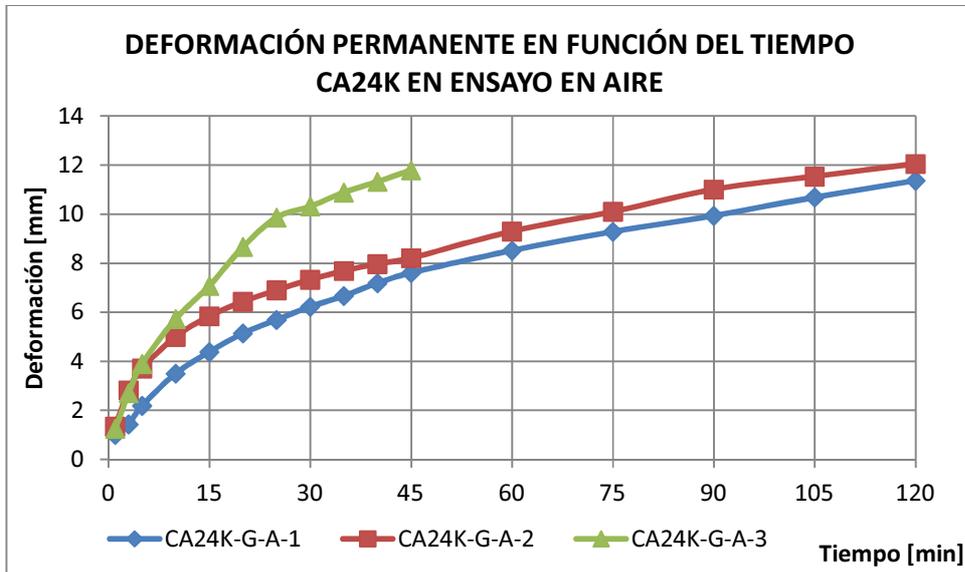


Figura 33: Probetas de CA24K-G-A.

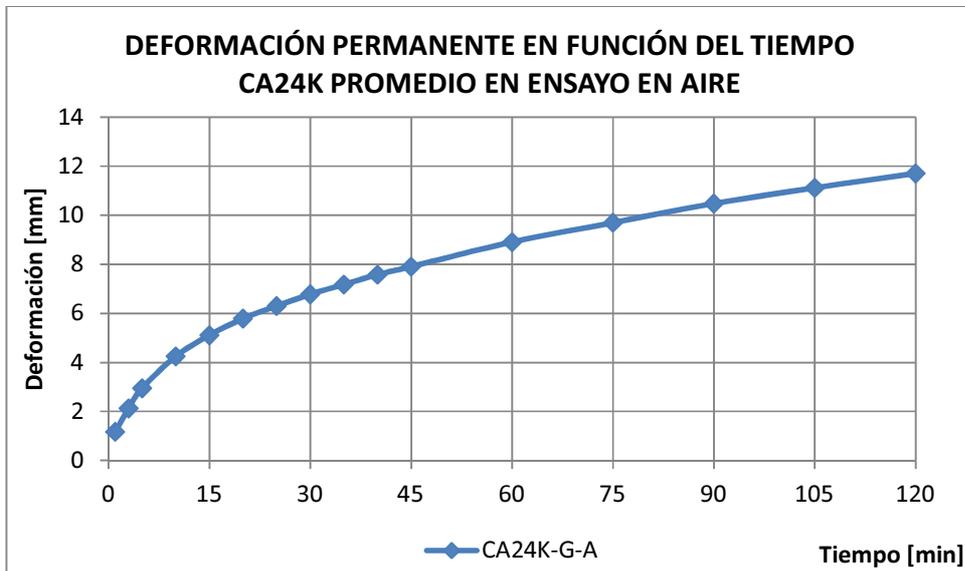


Figura 34: Promedio CA24K-G-A.

La probeta CA24K-G-A-3 no fue considerada en el promedio por poseer deformaciones muy por sobre las que se generan en las otras dos probetas.

5.1.3 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.

5.1.3.1 Probetas compactadas por vibrado.

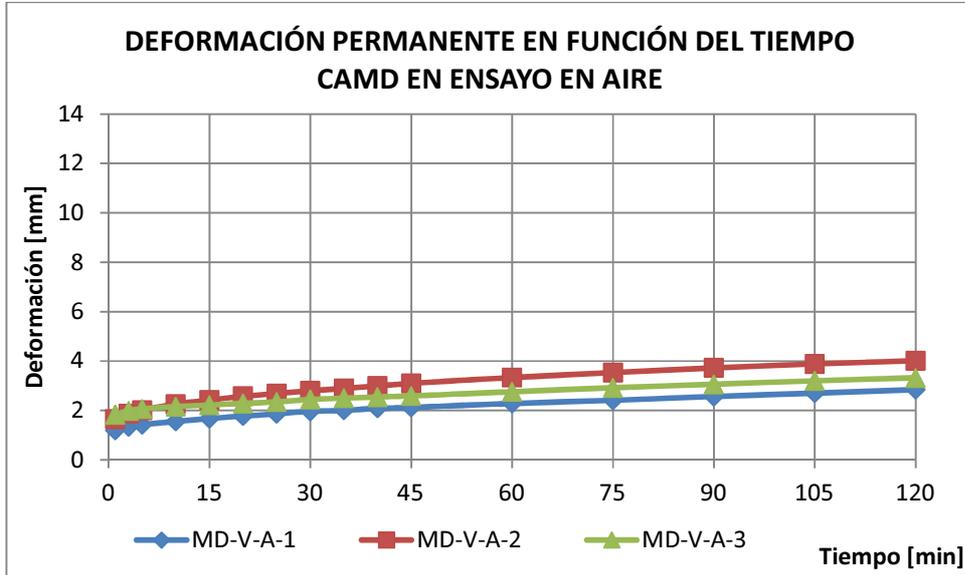


Figura 35: Probetas de CAMD-V-A.

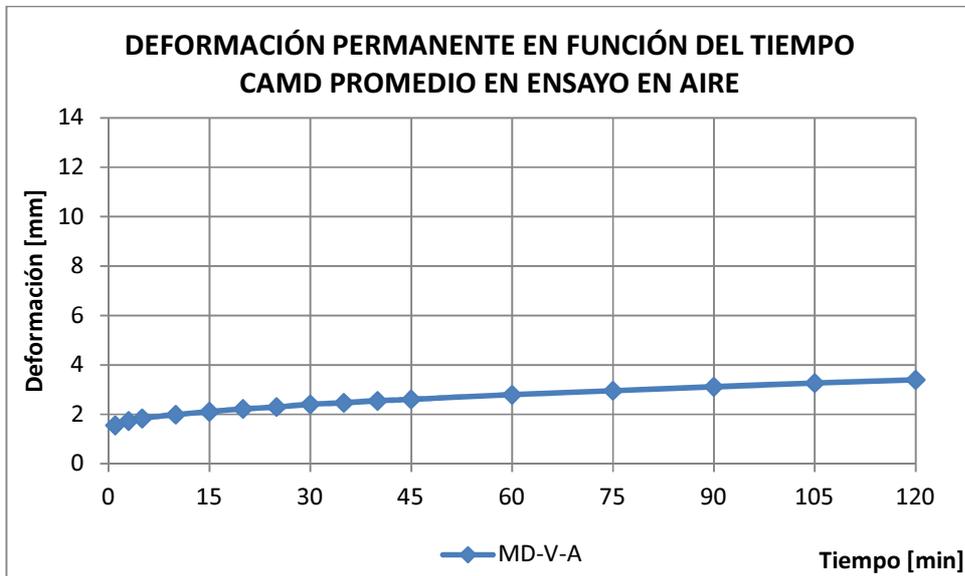


Figura 36: Promedio CAMD-V-A.

5.1.3.2 Probetas compactadas con compactador giratorio.

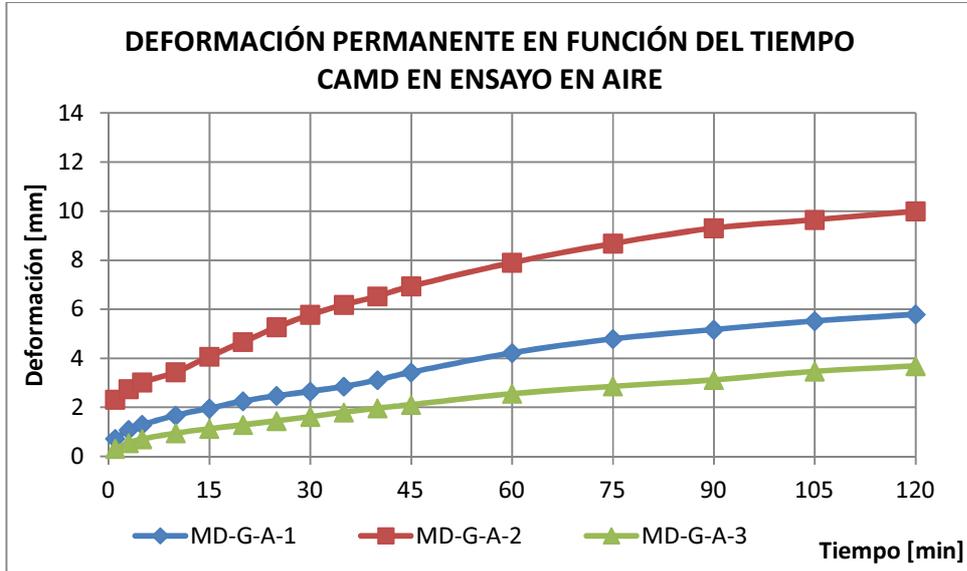


Figura 37: Probetas de CAMD-G-A.

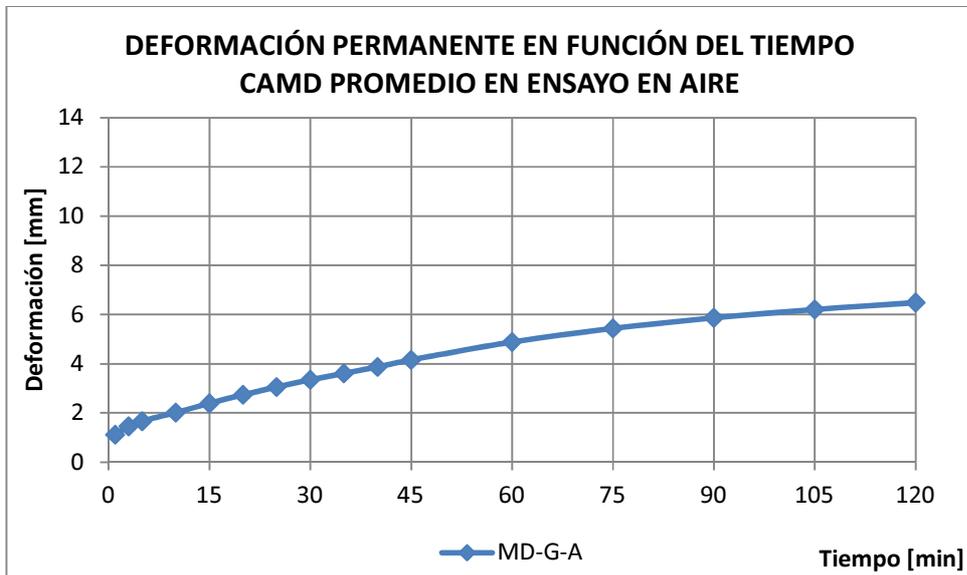


Figura 38: Promedio CAMD-G-A.

5.1.4 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros con aditivo promotor de adherencia.

5.1.4.1 Probetas compactadas por vibrado.

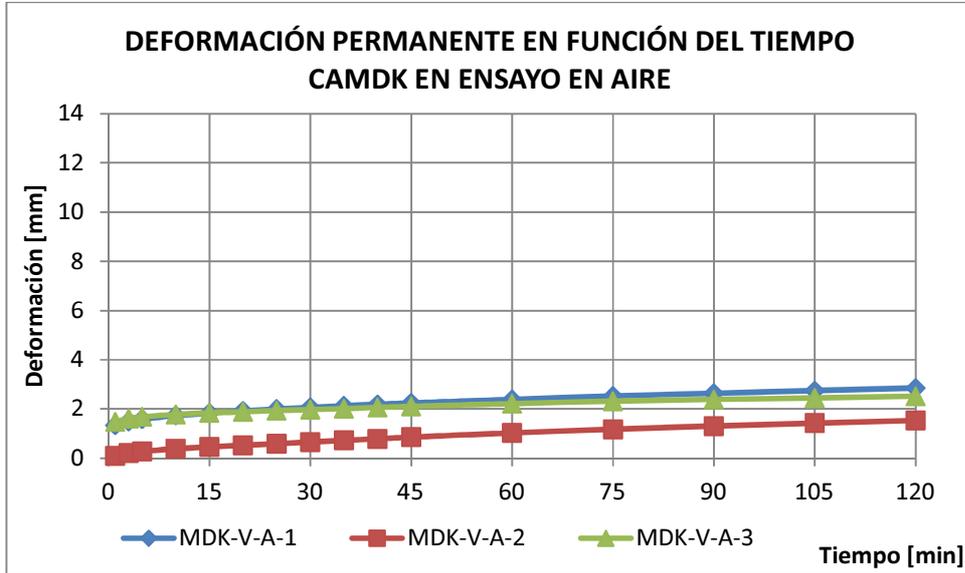


Figura 39: Probetas de CAMDK-V-A.

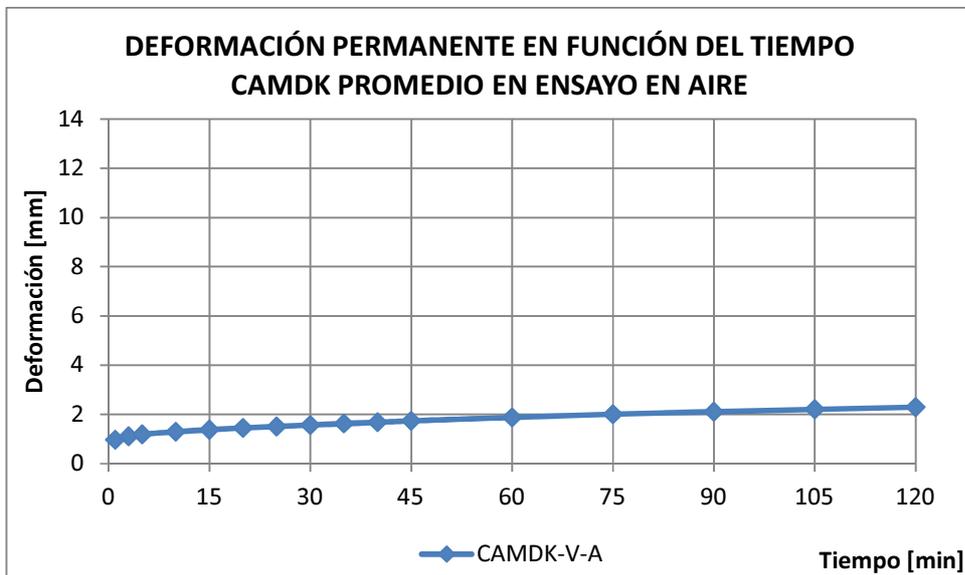


Figura 40: Promedio CAMDK-V-A.

5.1.4.2 Probetas compactadas con compactador giratorio.

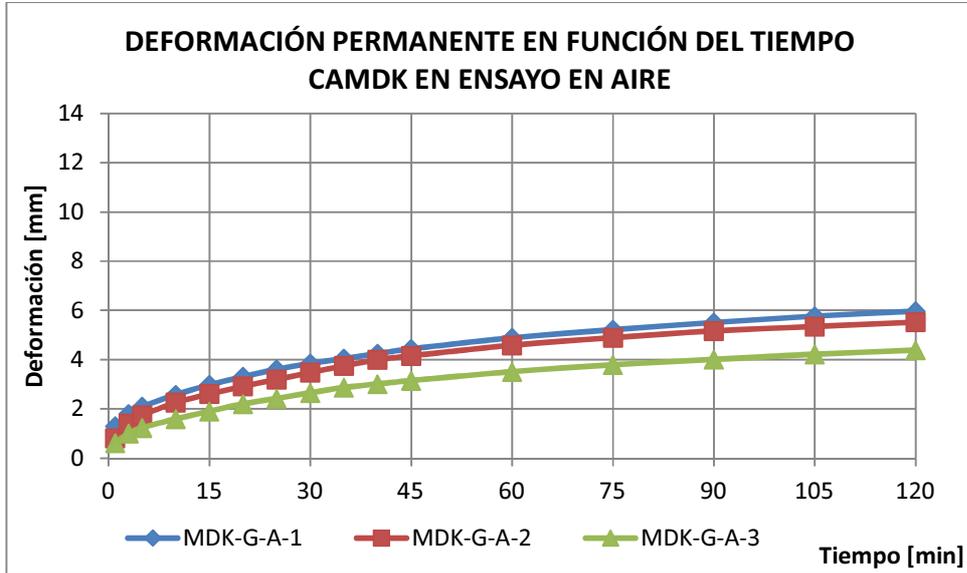


Figura 41: Probetas de CAMDK-G-A.

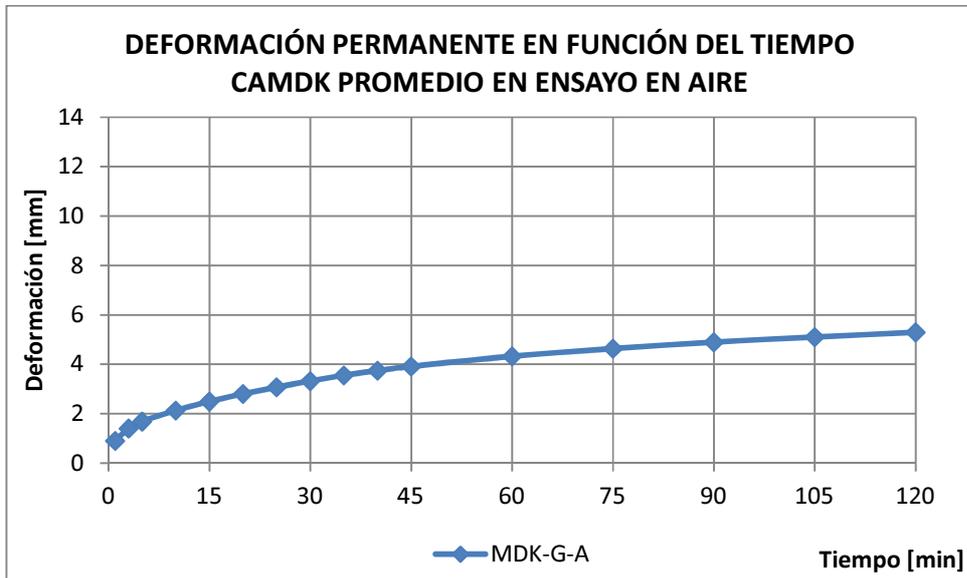


Figura 42: Promedio CAMDK-G-A.

5.2 Resultados ensayo Húmedo.

5.2.1 Cemento asfáltico CA24.

5.2.1.1 Probetas compactadas por vibrado.

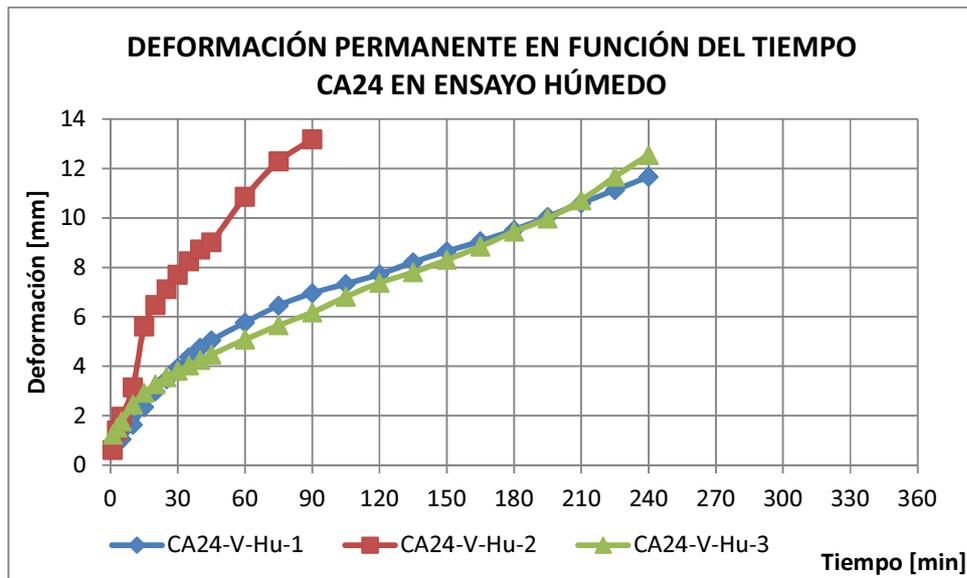


Figura 43: Probetas de CA24-V-Hu.

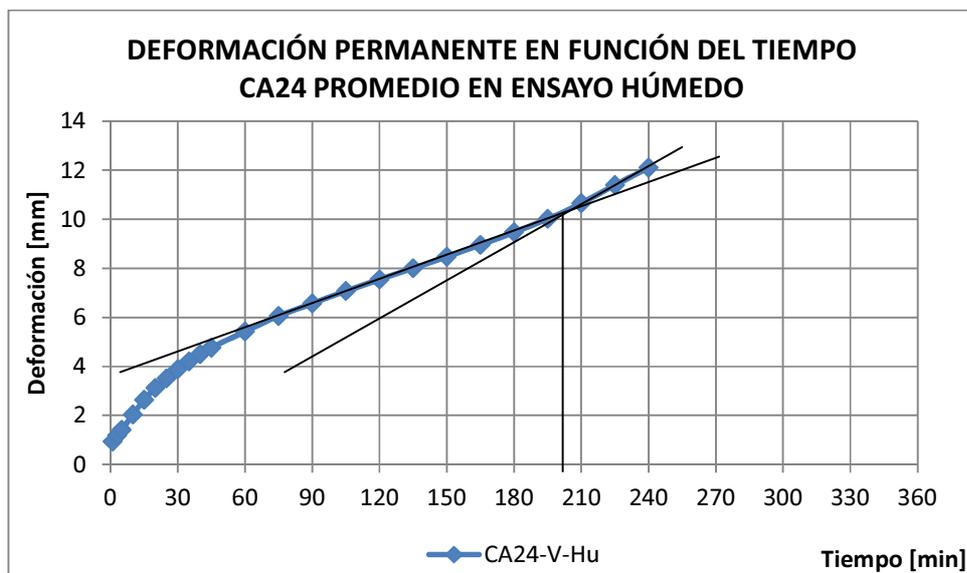


Figura 44: Promedio CA24-V-Hu.

El punto de stripping se encuentra en los 200 minutos aproximadamente.

La probeta CA24-V-Hu-2 no fue considerada en el promedio por poseer deformaciones muy por sobre las que se generan en las otras dos probetas.

5.2.2 Cemento Asfáltico CA24 con aditivo promotor de adherencia.

5.2.2.1 Probetas compactadas por vibrado.

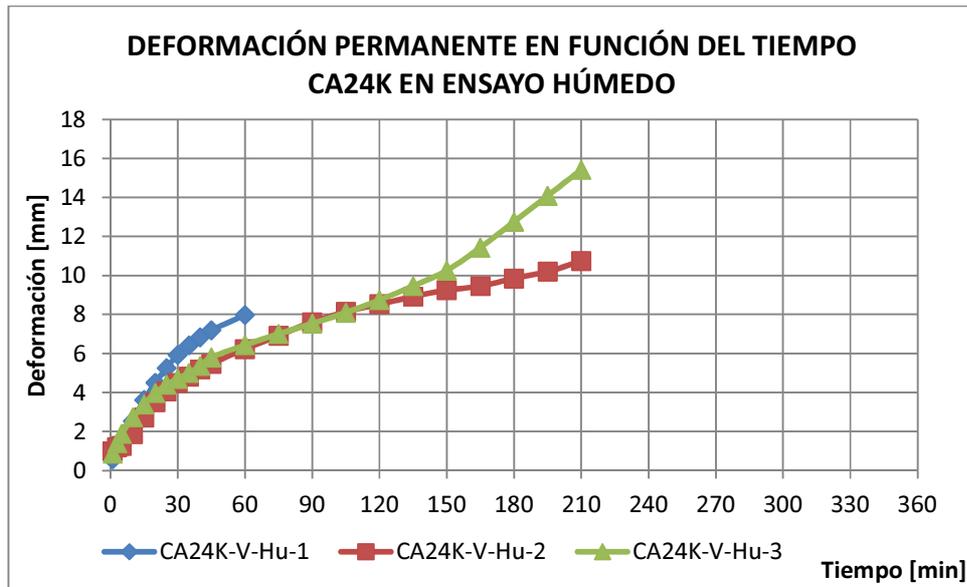


Figura 45: Probetas de CA24K-V-Hu

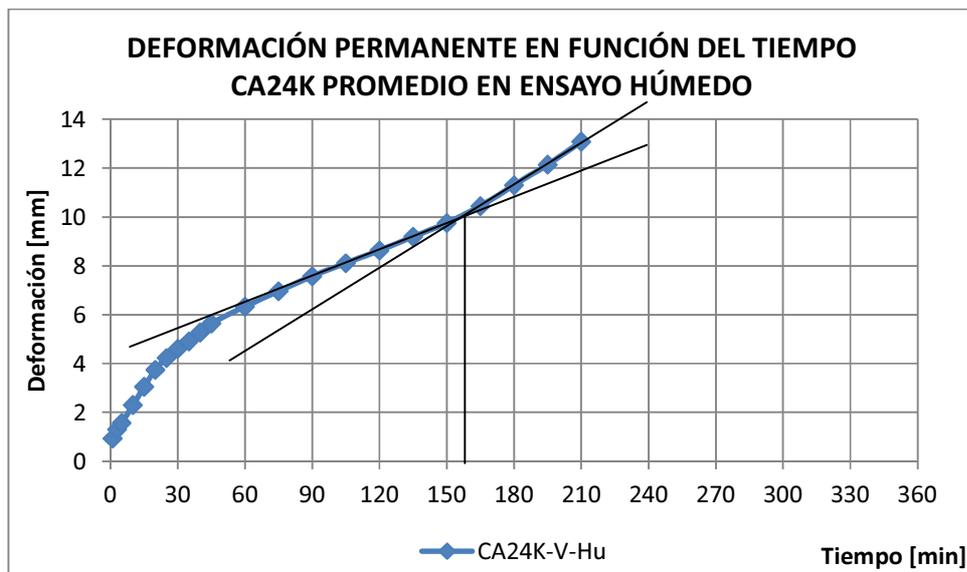


Figura 46: Promedio CA24K-V-Hu.

El punto de stripping se encuentra en los 160 minutos aproximadamente.

La probeta CA24K-V-Hu-1 no fue considerada en el promedio debido a que sólo se realizó el ensayo hasta el minuto 60, esto ya que el micrómetro fue incapaz de continuar midiendo.

5.2.3 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.

5.2.3.1 Probetas compactadas por vibrado.

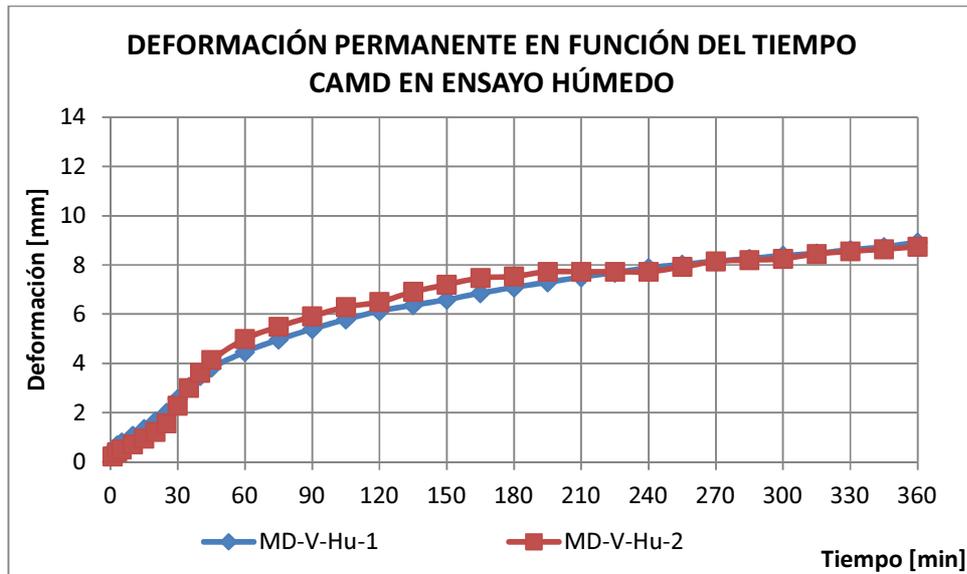


Figura 47: Probetas de CAMD-V-Hu.

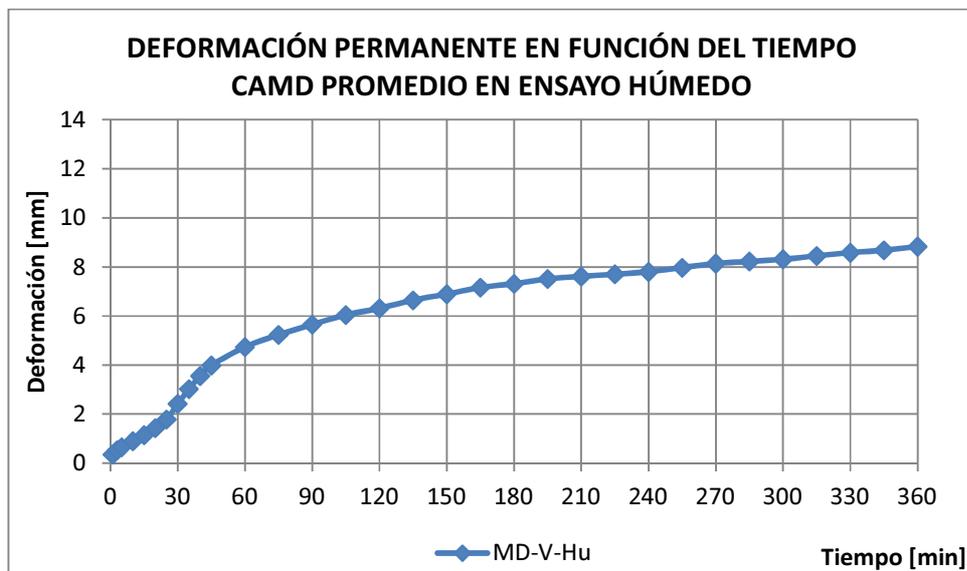


Figura 48: Promedio CAMD-V-Hu.

El ensayo con CAMD no alcanza a llegar al stripping.

5.2.4 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros con aditivo promotor de adherencia.

5.2.4.1 Probetas compactadas por vibrado.

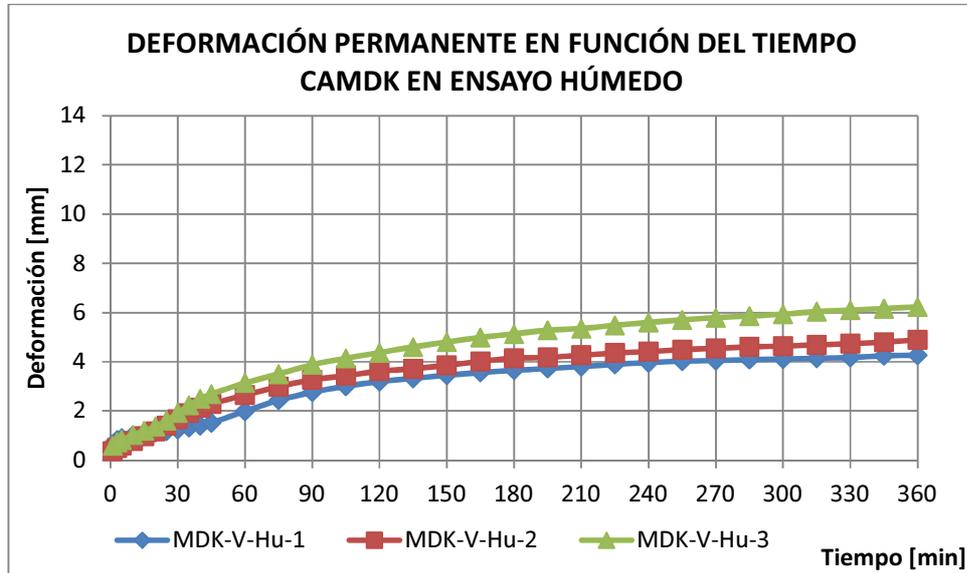


Figura 49: Probetas de CAMDK-V-Hu.

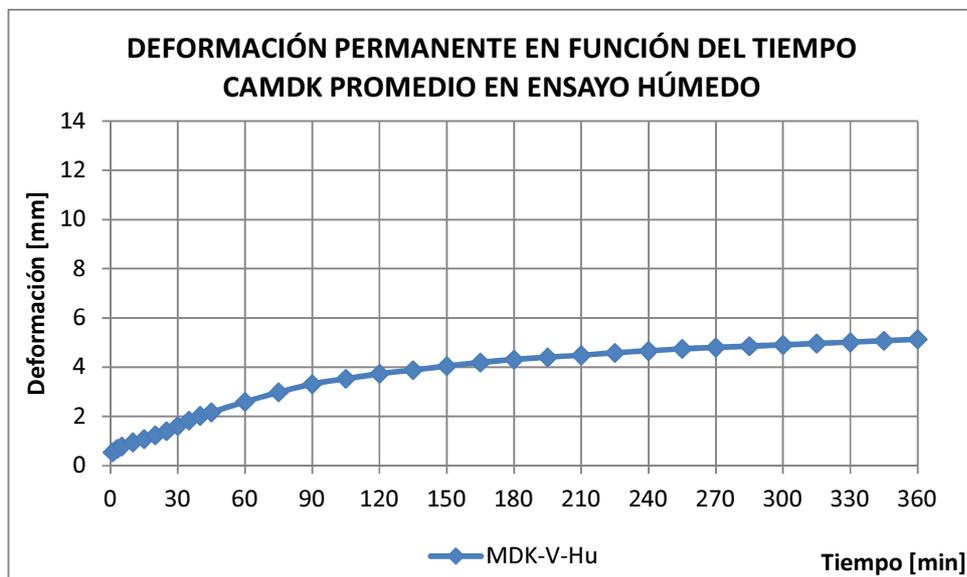


Figura 50: Promedio CAMDK-V-Hu.

El ensayo con CAMDK no alcanza a llegar al stripping.

5.3 Resultados ensayos en la máquina de Hamburgo.

5.3.1 Cemento asfáltico CA24.

5.3.1.1 Probetas compactadas por vibrado.

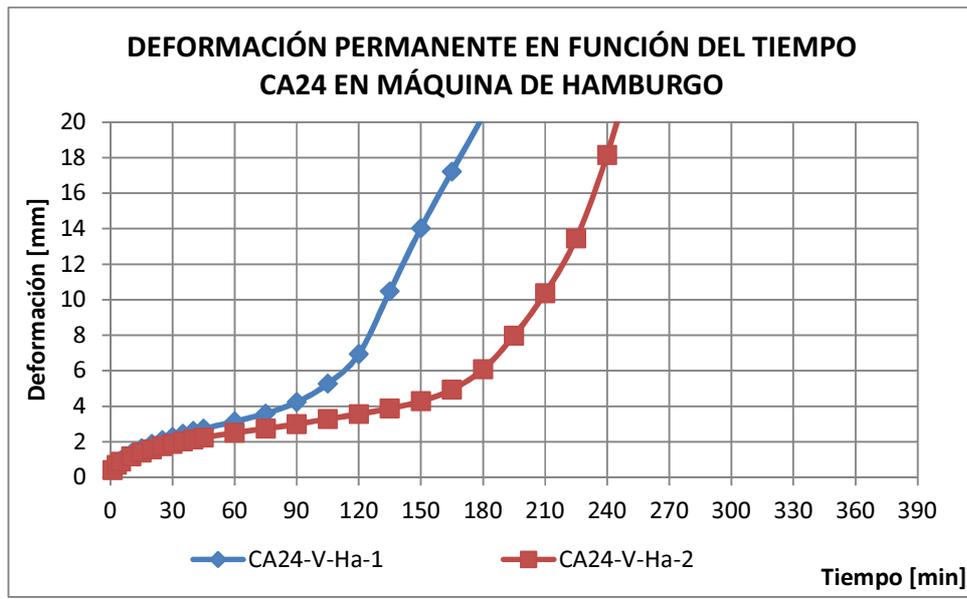


Figura 51: Probetas de CA24-V-Ha.

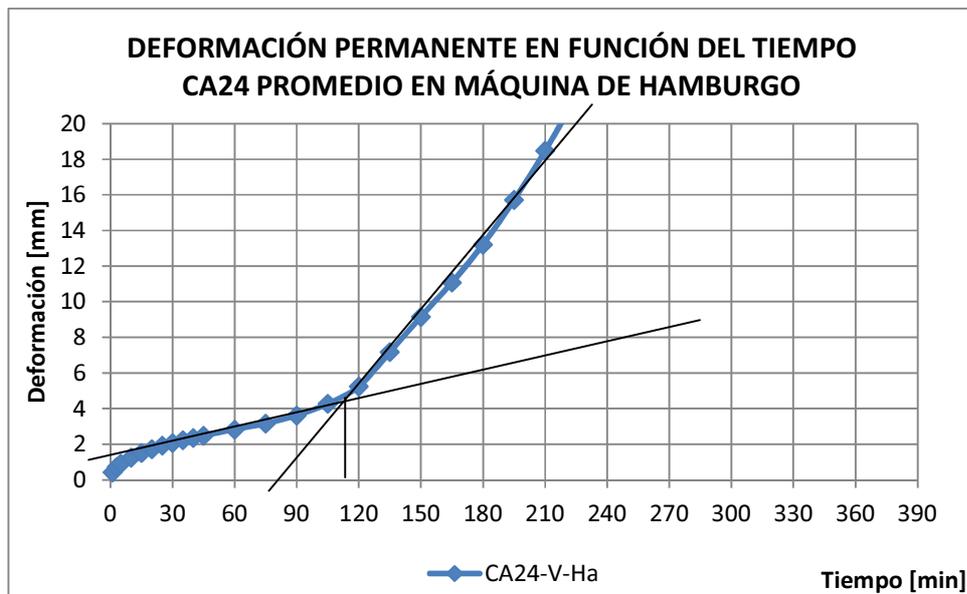


Figura 52: Promedio CA24-V-Ha.

El punto de stripping se encuentra en los 115 minutos aproximadamente.

5.3.1.2 Probetas compactadas con compactador giratorio.

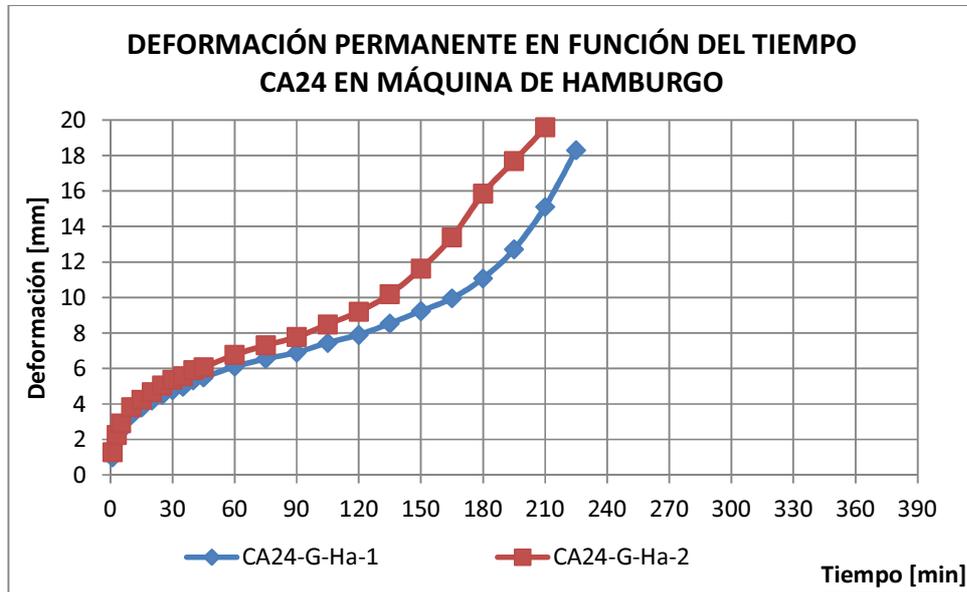


Figura 53: Probetas de CA24-G-Ha.

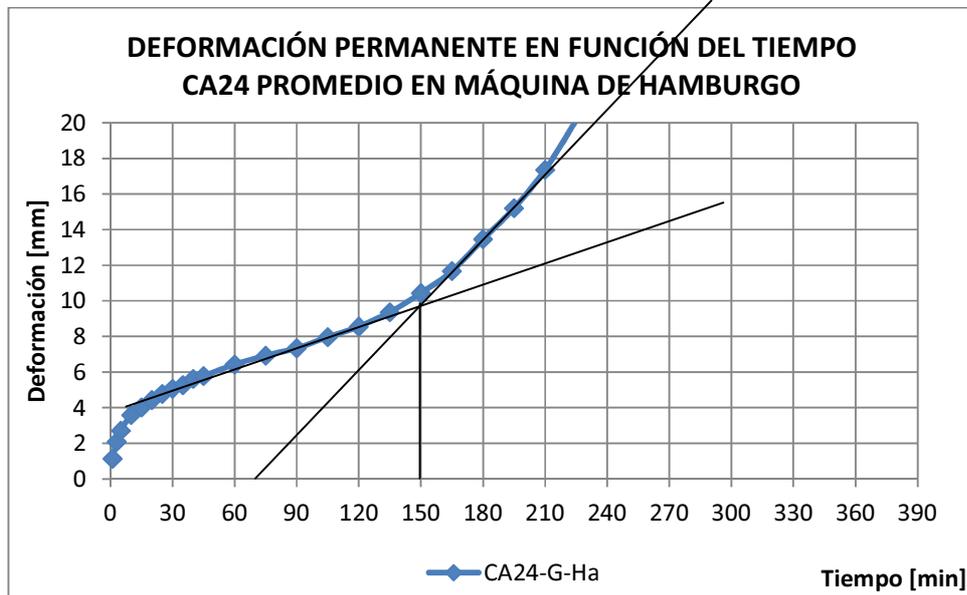


Figura 54: Promedio CA24-G-Ha.

El punto de stripping se encuentra en los 150 minutos aproximadamente.

5.3.2 Cemento asfáltico CA24 con aditivo promotor de adherencia.

5.3.2.1 Probetas compactadas por vibrado.

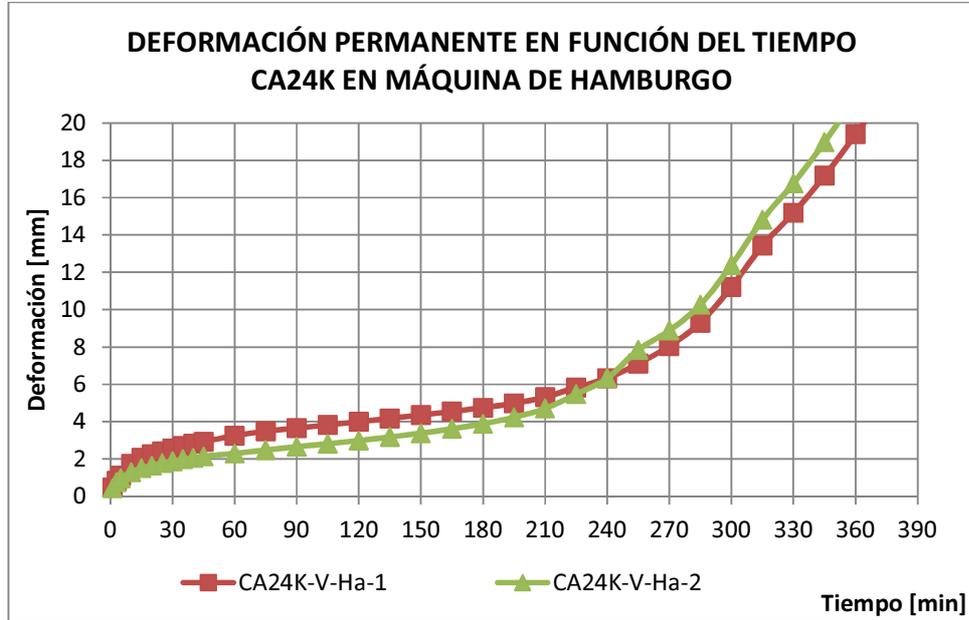


Figura 55: Probetas de CA24K-V-Ha.

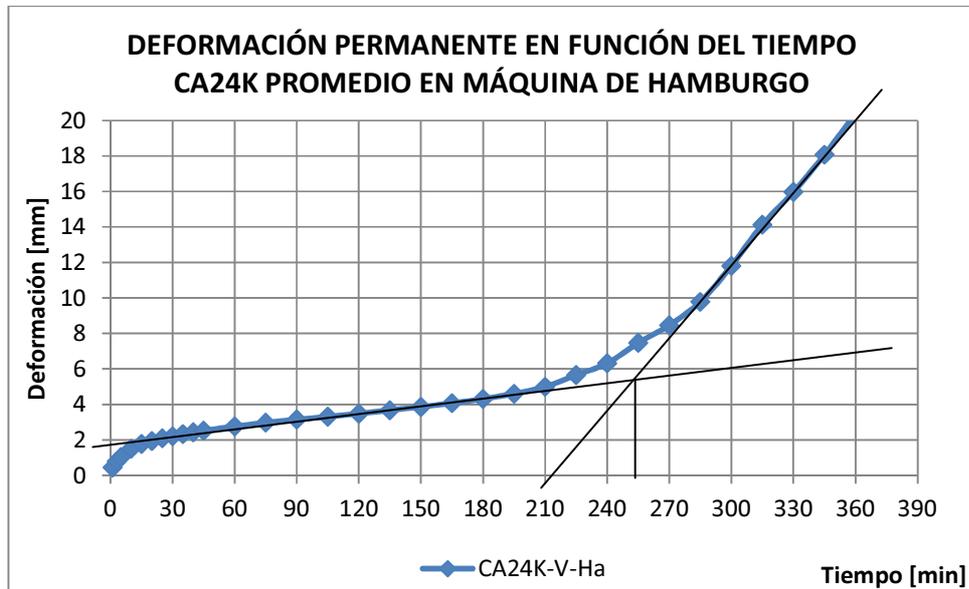


Figura 56: Promedio CA24K-V-Ha.

El punto de stripping se encuentra en los 250 minutos aproximadamente.

5.3.2.2 Probetas compactadas con compactador giratorio.

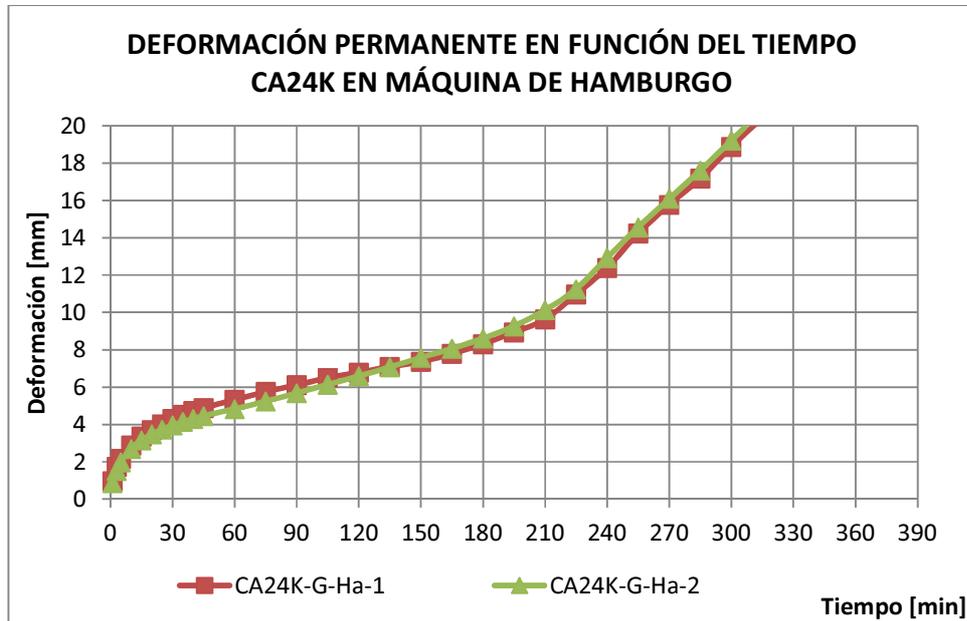


Figura 57: Probetas de CA24K-G-Ha.

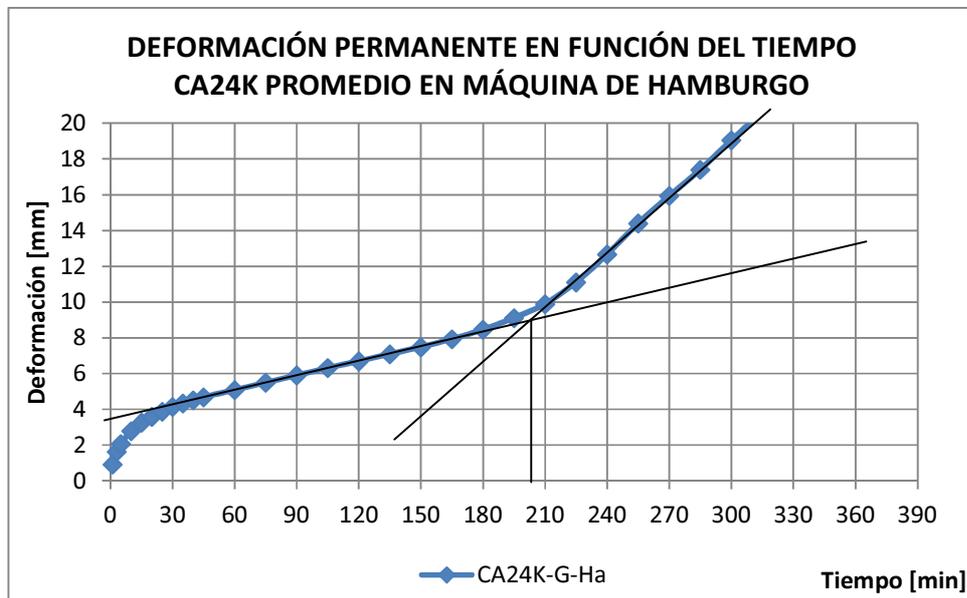


Figura 58: Promedio CA24K-G-Ha.

El punto de stripping se encuentra en los 205 minutos aproximadamente.

5.3.3 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.

5.3.3.1 Probetas compactadas por vibrado.

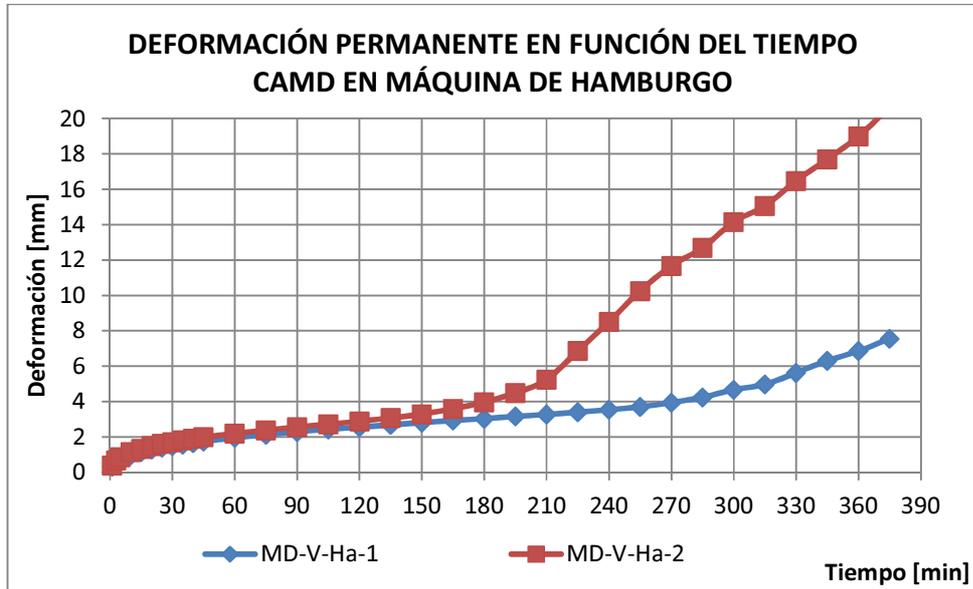


Figura 59: Probetas de CAMD-V-Ha.

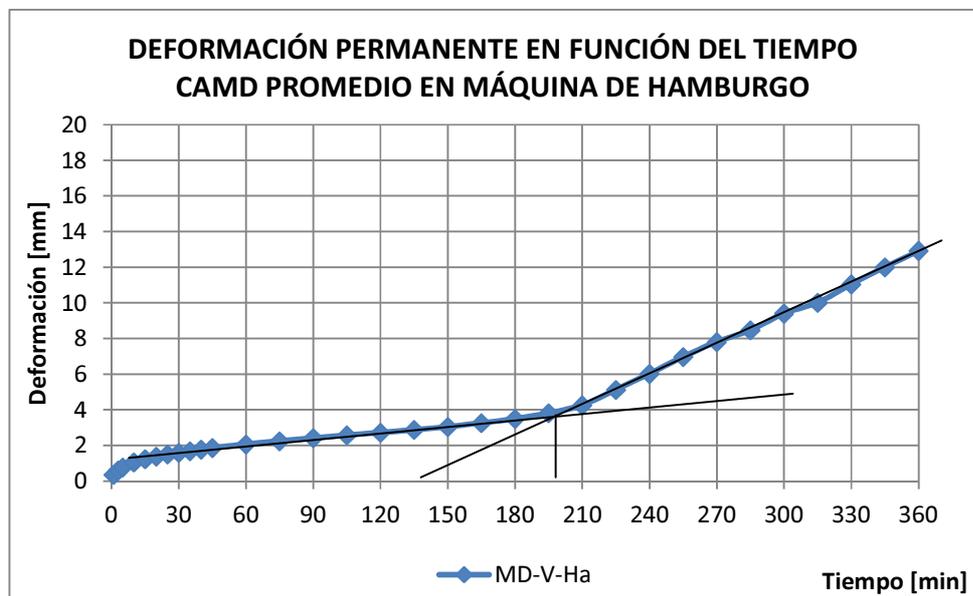


Figura 60: Promedio CAMD-V-Ha.

El punto de stripping se encuentra en los 200 minutos aproximadamente.

5.3.3.2 Probetas compactadas con compactador giratorio.

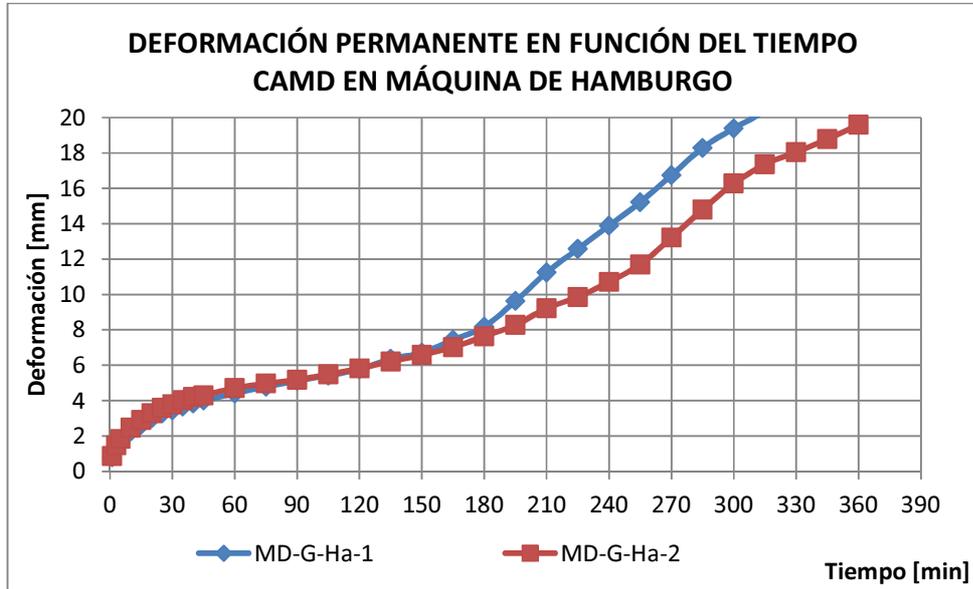


Figura 61: Probetas de CAMD-G-Ha.

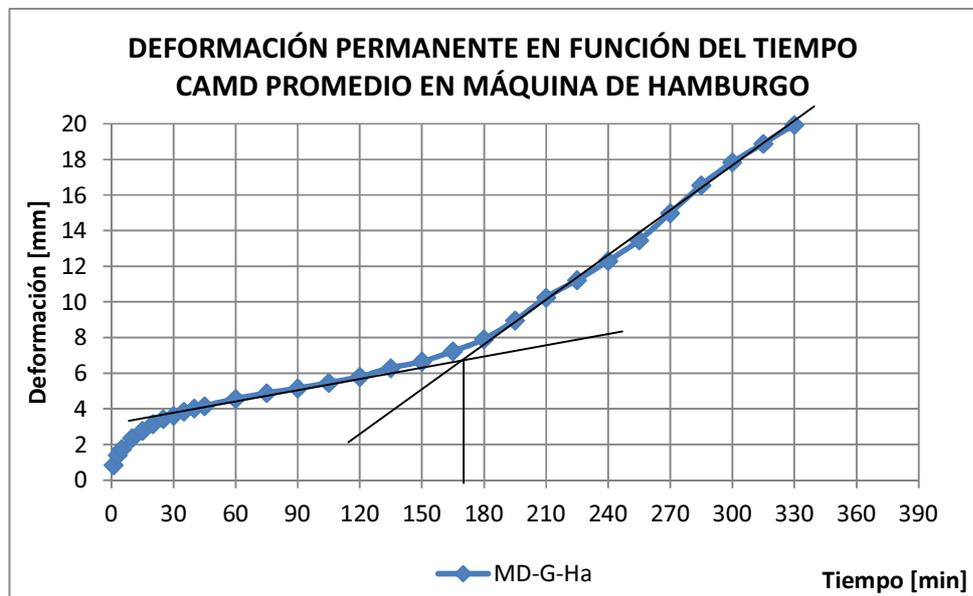


Figura 62: Promedio CAMD-G-Ha.

El punto de stripping se encuentra en los 170 minutos aproximadamente.

5.3.4 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros con aditivo promotor de adherencia.

5.3.4.1 Probetas compactadas por vibrado.

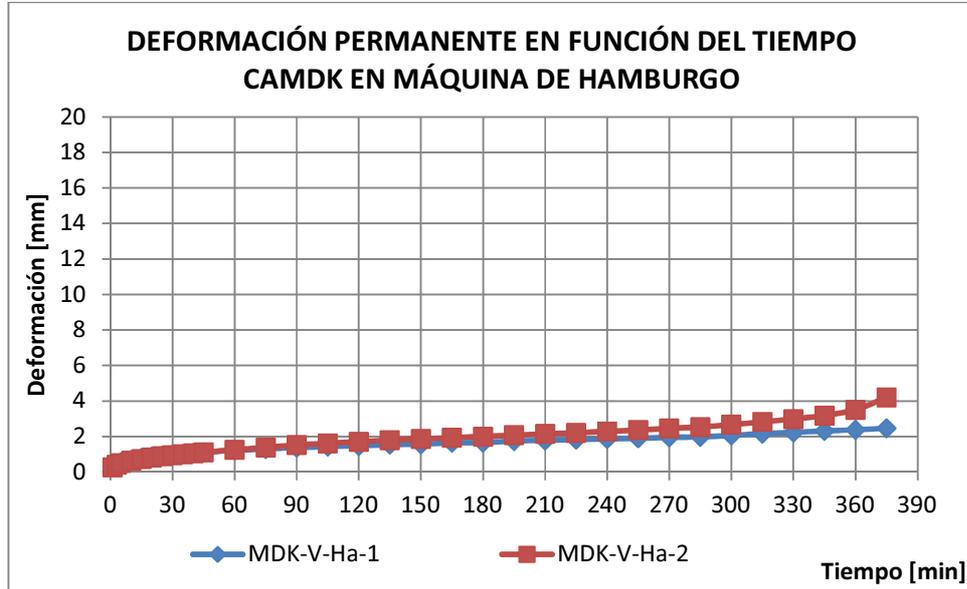


Figura 63: Probetas de CAMDK-V-Ha.

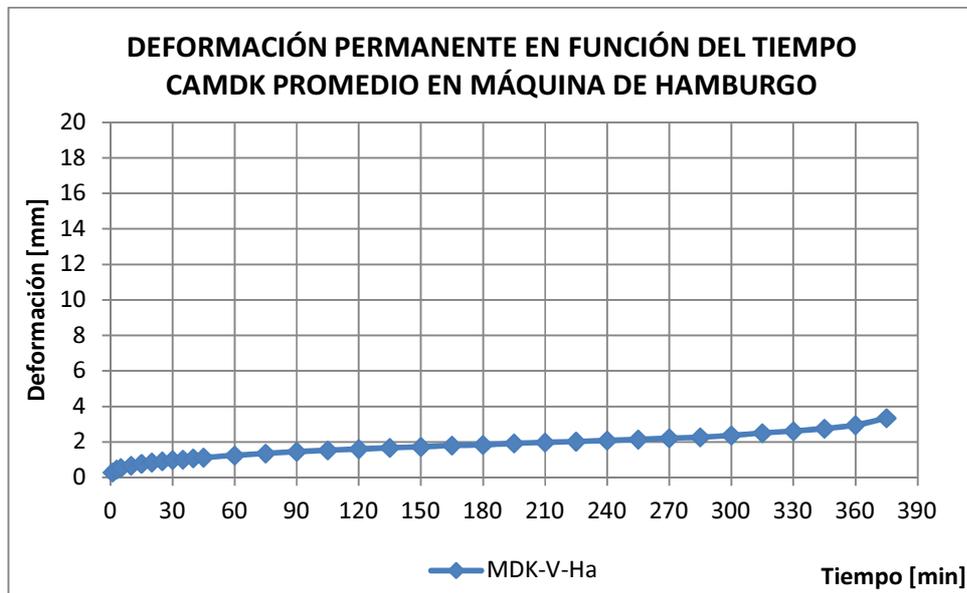


Figura 64: Promedio CAMDK-V-Ha.

El ensayo con MDK vibratorio no alcanza a llegar al stripping.

5.3.4.2 Probetas compactadas con compactador giratorio.

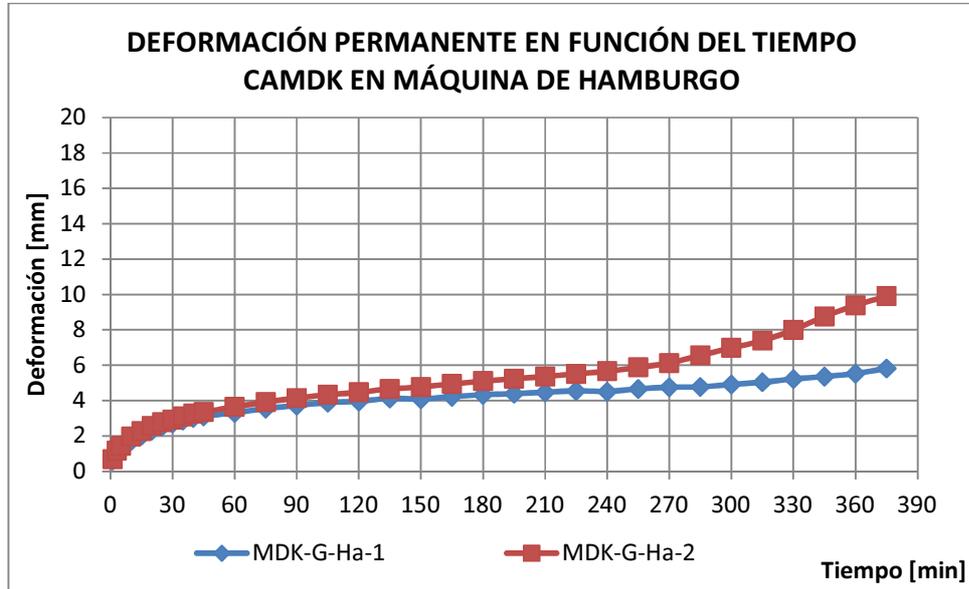


Figura 65: Probetas de CAMDK-G-Ha.

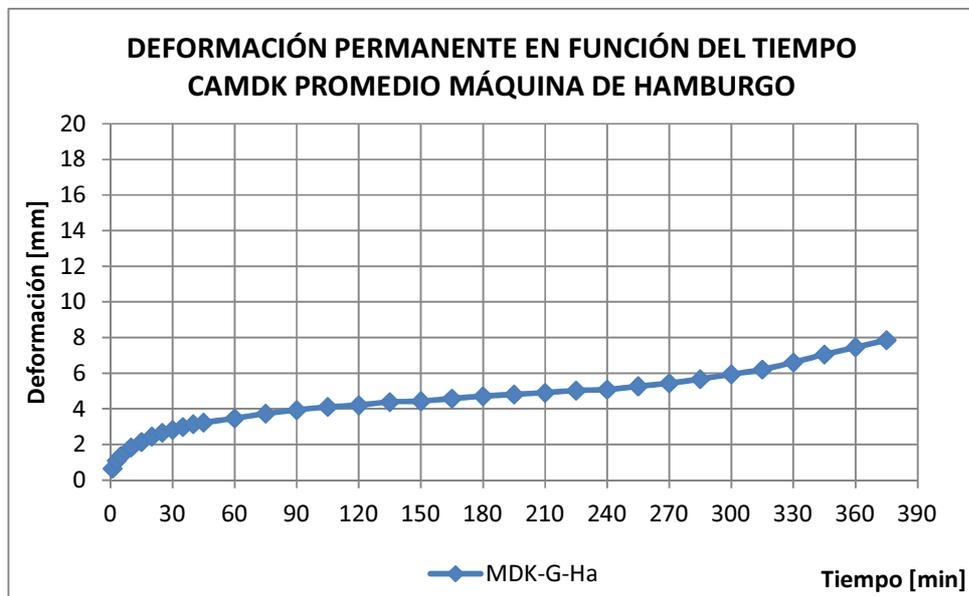


Figura 66: Promedio CAMDK-G-Ha.

El ensayo con MDK vibratorio no alcanza a llegar al stripping.

5.4 Resultados ensayo saturado superficialmente seco.

5.4.1 Cemento asfáltico modificado con polímeros.

5.4.1.1 Probetas compactadas por vibrado.

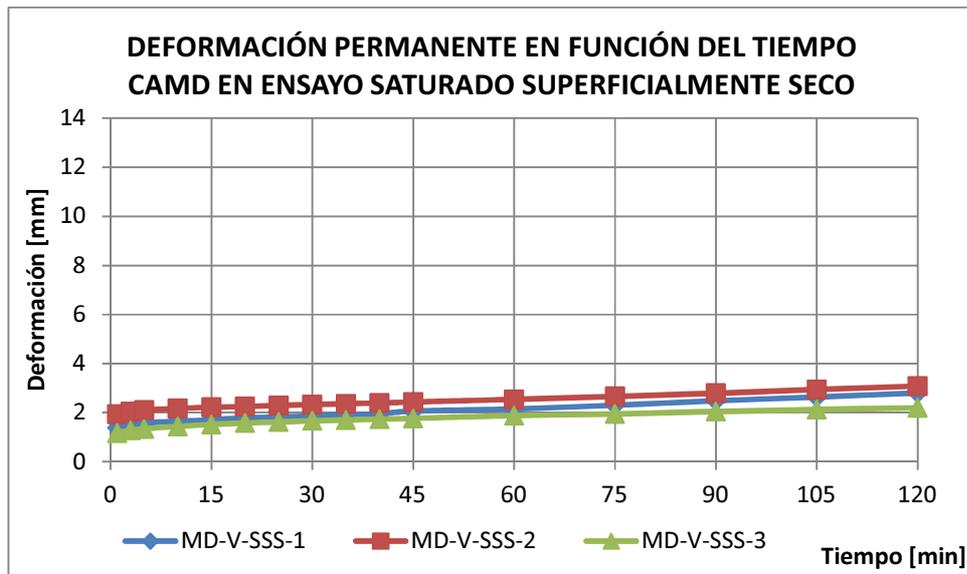


Figura 67: Probetas de CAMD-V-SSS.

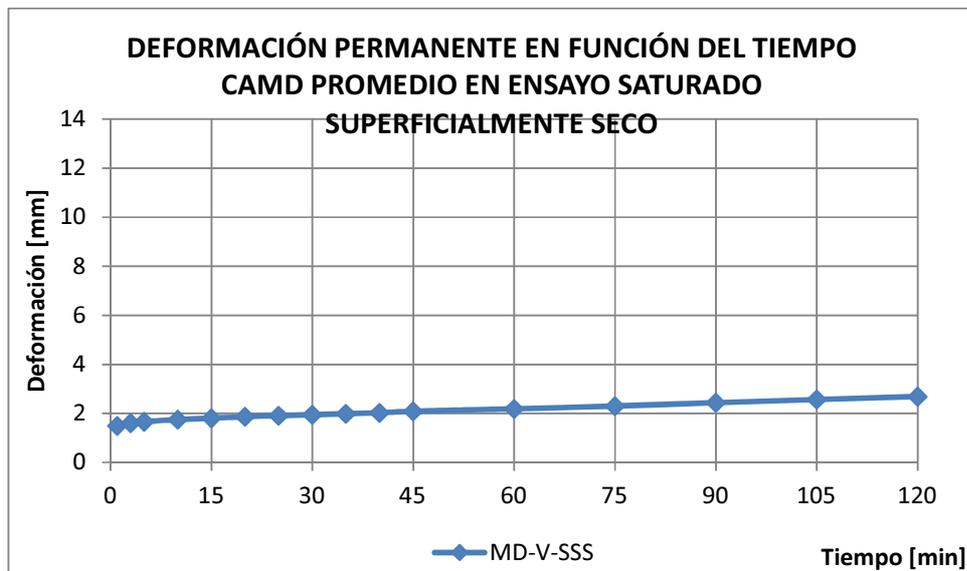


Figura 68: Promedio CAMD-V-SSS.

5.5 Resultados ensayo con esponja seca superficial.

5.5.1 Cemento asfáltico modificado con polímeros.

5.5.1.1 Probetas compactadas por vibrado.

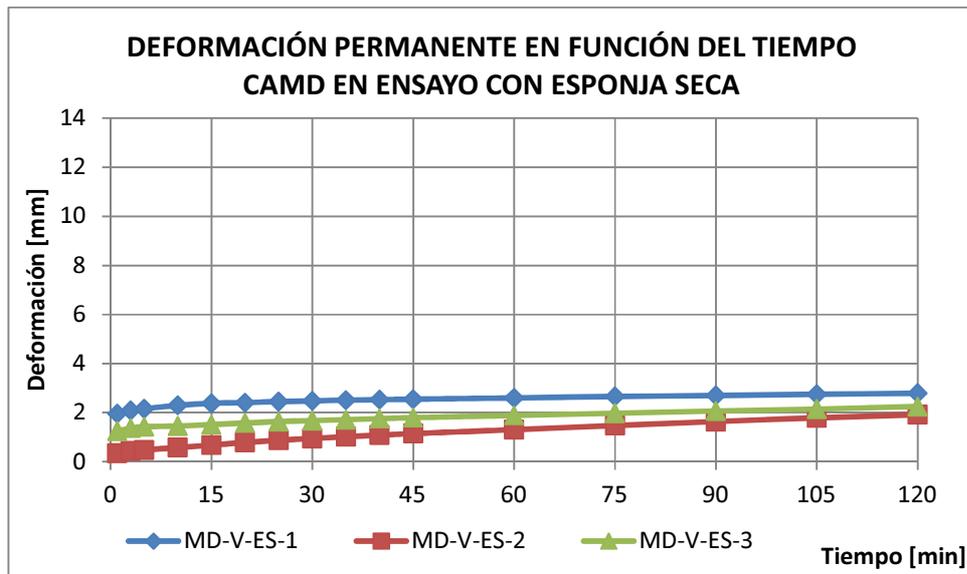


Figura 69: Probetas de CAMD-V-ES.

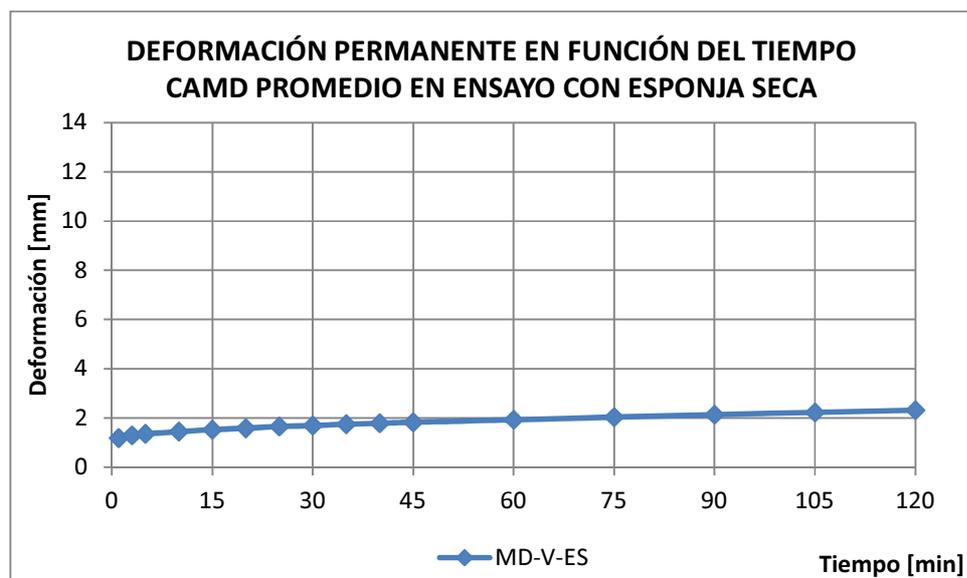


Figura 70: Promedio CAMD-V-ES.

Capítulo 6

Análisis de Resultados

Los análisis realizados en este capítulo se realizarán a las curvas promedios finales. El criterio para la obtención de la curva promedio final en los ensayos realizados en la máquina de rueda de carga, excluye a las probetas de CA24 que no terminen el ensayo debido a problemas de contacto entre el tornillo y el micrómetro, como se muestra en la Figura 71, y aquellas cuya curva de deformación versus tiempo posee la mayor distancia a la curva promedio entre las tres que se ensayan. Las probetas con asfalto modificado con polímeros poseen curvas muy similares, por lo que se consideran todas las probetas ensayadas en el promedio.



Figura 71: Pérdida del contacto entre el tornillo solidario con la rueda y el micrómetro.

6.1 Comparación ensayo en Aire y Saturado Superficialmente Seco.

6.1.1 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.

Una posibilidad de estudiar la contribución a la deformación permanente de la humedad es a través del ensayo en la Wheel Tracking de probetas previamente acondicionadas en agua durante 4 horas. Para estudiar si se produce algún efecto en las probetas debido al agua que queda contenida en los huecos de la mezcla se ensayaron 3 probetas bajo condición saturada superficialmente seca (4.4.4). La curva de deformación versus tiempo que se obtiene del ensayo SSS, comparado con el ensayo tradicional en Aire se muestra en la Figura 72.

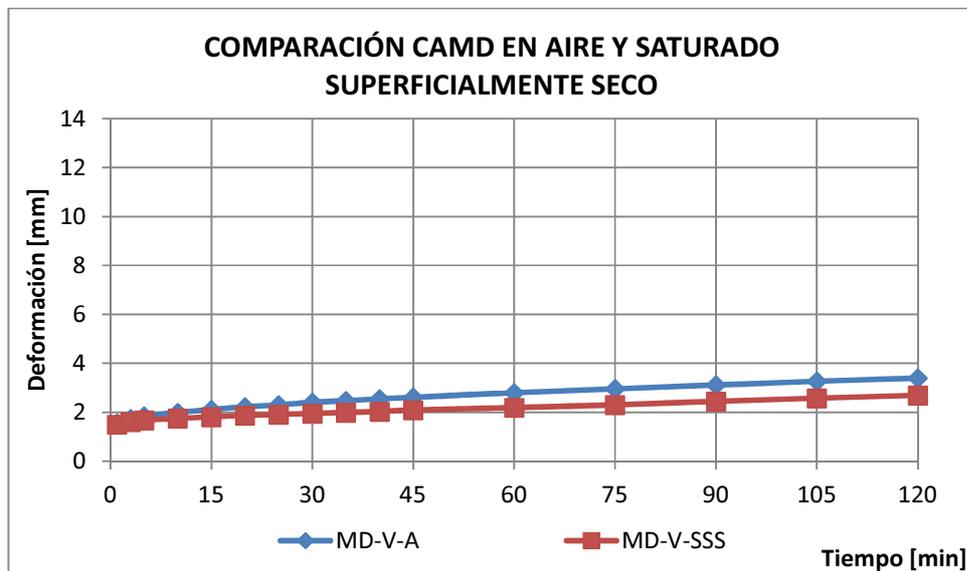


Figura 72: Comparación CAMD en Aire y saturado superficialmente Seco.

De la gráfica de la Figura 72 se observa que las deformaciones experimentadas en el ensayo saturado superficialmente seco son levemente inferiores a las producidas en el ensayo tradicional en aire, la diferencia se puede producir por debilidades propias de la repetibilidad del ensayo, debido al gran número de factores que influyen en los resultados, pero no es causa del acondicionamiento ya que se ha estudiado que al involucrar agua en las mezclas asfálticas se generan condiciones desfavorables para el comportamiento en deformación permanente (2.2).

Tabla 13: Comparación vel. de deformación ensayo en Aire y Sat. Superficialmente Seco.

VEL. DEFORMACION [$\mu\text{m}/\text{min}$]	CAMD - Vibratorio	
	Aire	Sat. S. Seco
Velocidad Deformación 30 - 45	13,3	9,3
Velocidad Deformación 75 - 90	10,7	9,3
Velocidad Deformación 105 - 120	8,7	8,0

En la Tabla 13 se encuentran las velocidades de deformación para ensayo seco y saturado superficialmente seco, en este cuadro se puede ver que las velocidades de deformación para la prueba SSS son inferiores en $3 \mu\text{m}/\text{min}$ en el intervalo 30-45, $1,4 \mu\text{m}/\text{min}$ en el intervalo 75-90 y $0,7 \mu\text{m}/\text{min}$ en el intervalo 105-120, diferencias que pueden ser atribuibles al la confección de las probetas o al ensayo propiamente, de ningún modo al acondicionamiento debido a la poca diferencia y a que se espera teóricamente se presente el efecto contrario.

En el transcurso del ensayo se puede notar que la temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ produce la evaporación del agua almacenada en los huecos de la mezcla, lo que implica que a medida que transcurre el ensayo saturado se obtienen condiciones semejantes a las del ensayo tradicional de Wheel Tracking.

6.2 Efecto de la incorporación de una esponja.

6.2.1 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.

Para estudiar el efecto de la humedad en el ensayo de la rueda de carga, se piensa en la posibilidad de colocar una esponja que retenga agua y la libere en la probeta con el paso de la rueda, reincorporando el agua que se pierde por evaporación o por salpicar. Para ello se realiza el estudio del efecto que produce la esponja colocada en la superficie de contacto entre la rueda y la probeta, para ello se ensayan tres probetas con una esponja seca (4.4.5).

Las deformaciones producidas en el ensayo con la Esponja Seca son comparadas con las que se producen en el ensayo tradicional en Aire en la Figura 73, de donde se aprecia una disminución de las deformaciones producidas en el ensayo con esponja. La reducción en las deformaciones que se produce por la esponja se debe a la rigidez que presenta cuando está totalmente seca dado que la temperatura de ensayo es a los $60 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que se espera una reducción de este efecto al utilizar la esponja en el ensayo Húmedo.

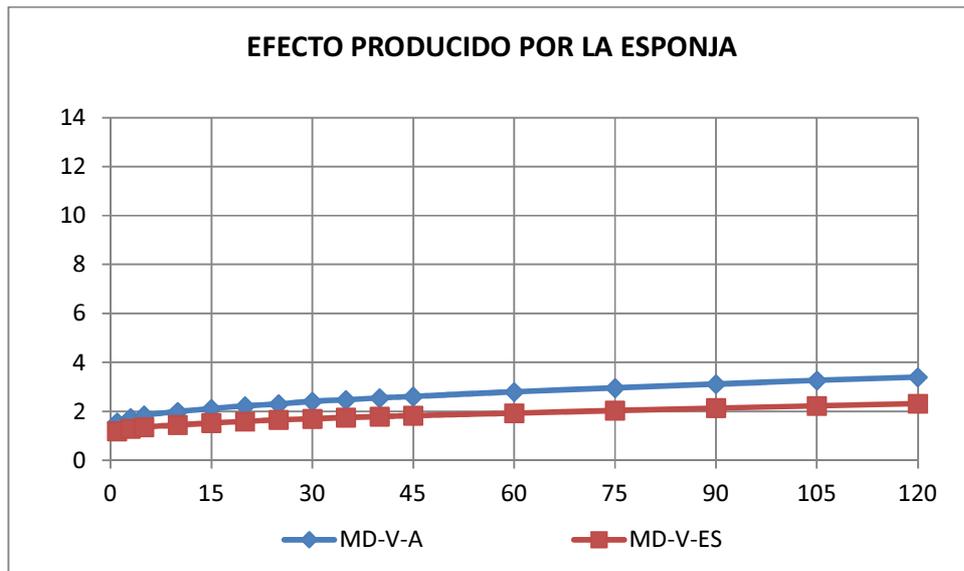


Figura 73: Efecto producido por la esponja.

Tabla 14: Comparación vel. de deformación ensayo en Aire y con esponja seca.

VEL. DEFORMACION [$\mu\text{m}/\text{min}$]	CAMD - Vibratorio	
	Aire	Esp. Seca
Velocidad Deformación 30 - 45	13,3	8,7
Velocidad Deformación 75 - 90	10,7	6,7
Velocidad Deformación 105 - 120	8,7	6,0

Las velocidades de deformación (Tabla 14) expresan una disminución en las velocidades de deformación para las probetas ensayadas con la esponja, estas bajas deformaciones se deben a que el promedio consideró las tres probetas y la probeta 1 arrojó velocidades muy bajas (ver anexo B), si sólo se consideran la probeta 2 y la tres las velocidades de deformación serían las dadas en la tabla 15.

Tabla 15: Comparación vel. de deformación con esponja seca sin probeta 1.

VEL. DEFORMACION [$\mu\text{m}/\text{min}$]	CAMD - Vibratorio	
	Aire	Esp. Seca
Velocidad Deformación 30 - 45	13,3	10,7
Velocidad Deformación 75 - 90	10,7	8,3
Velocidad Deformación 105 - 120	8,7	7,7

Se puede concluir que aunque el uso de la esponja disminuye la velocidad de deformación esta disminución es leve.

6.3 Comparación ensayo en aire y ensayo Húmedo.

6.3.1 Probetas compactadas por vibrado.

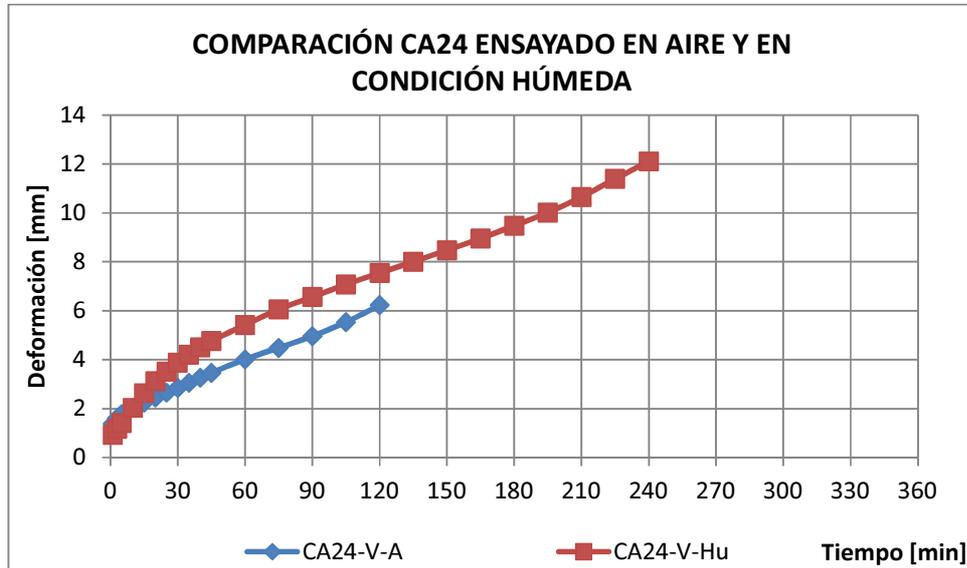


Figura 74: Comparación CA24 en Aire y en condición Húmeda.

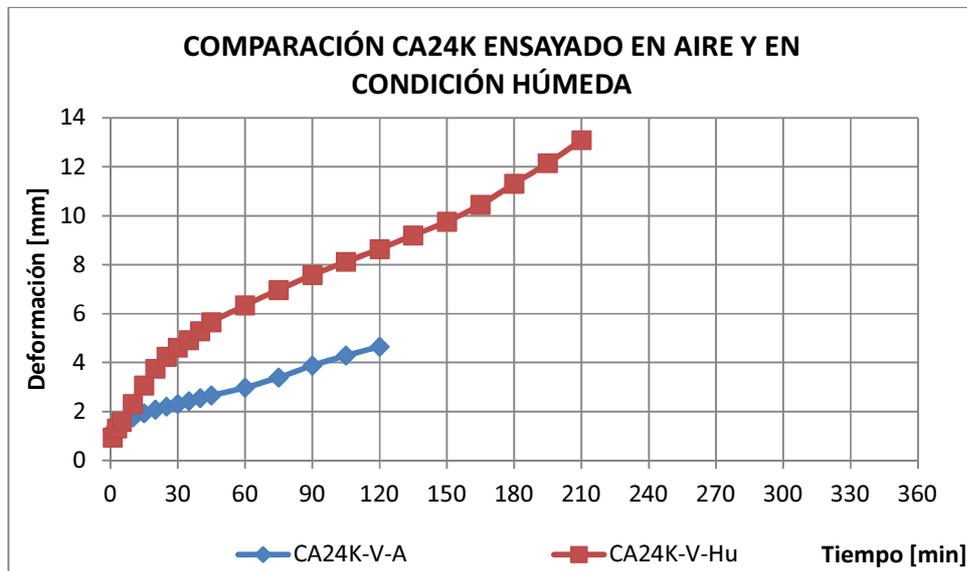


Figura 75: Comparación CA24K en Aire y en condición Húmeda.

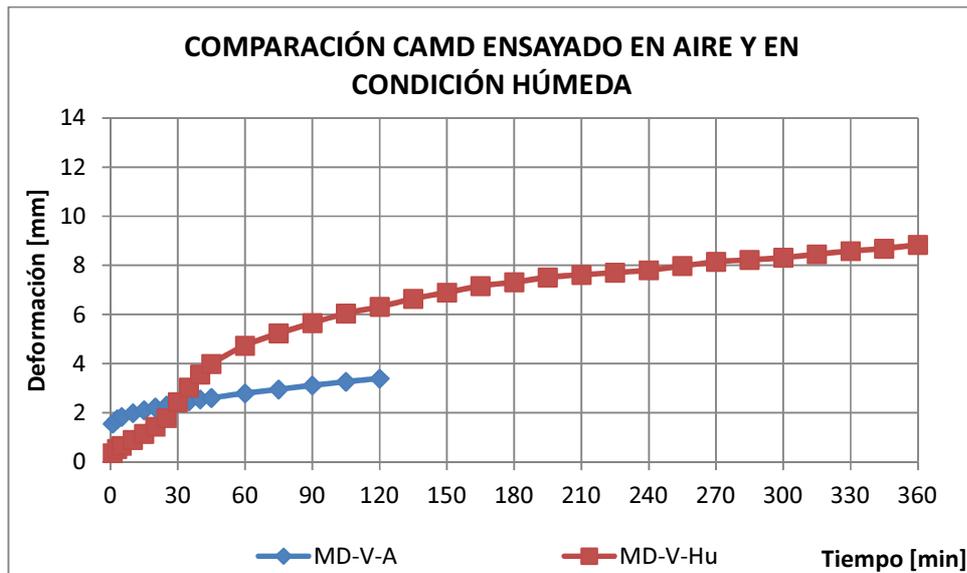


Figura 76: Comparación CAMD en Aire y en condición Húmeda.

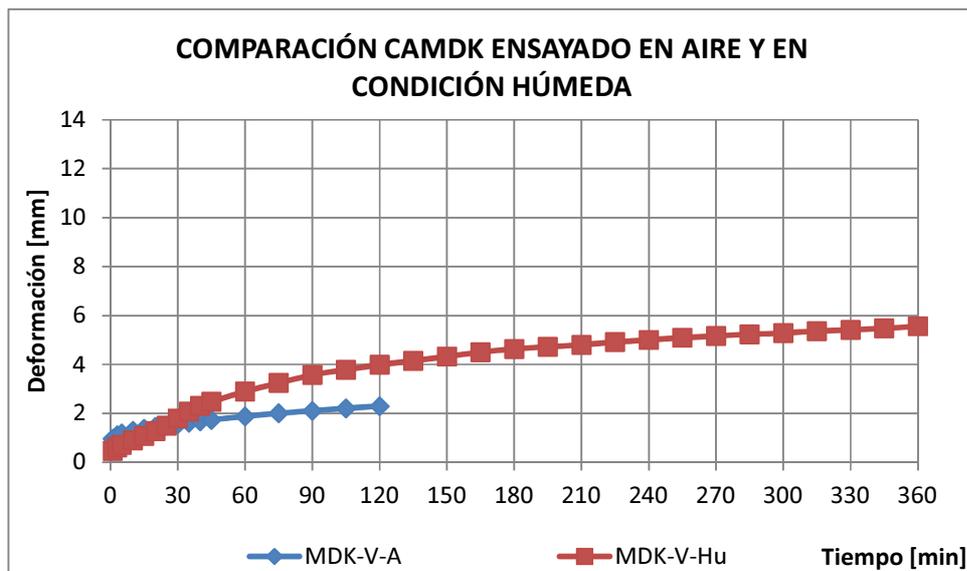


Figura 77: Comparación CAMDK en Aire y en condición Húmeda.

El comportamiento en condición húmeda presenta deformaciones mayores que las que se originan en el ensayo en aire, lo que demuestra que la incorporación de humedad en las probetas genera un factor desfavorable para el comportamiento en deformación permanente (Fig. 74, 75, 76, 77). Esto se debe a que la afinidad del agua con el árido es mayor que la del ligante con el árido.

En la mayoría de los casos la deformación a los 120 minutos en medio Húmedo es casi el doble de la que se genera en aire, a excepción del CA24 que produce una diferencia menor.

Tabla 16: Comparación vel. de deformación ensayo Aire y Húmedo.

VEL. DEFORMACION [$\mu\text{m}/\text{min}$]	CA24		CA24K	
	Aire	Húmedo	Aire	Húmedo
Velocidad Deformación 30 - 45	41,3	58,7	23,3	69,3
Velocidad Deformación 75 - 90	32,0	34,0	32,7	40,7
Velocidad Deformación 105 - 120	46,7	31,3	24,0	34,7
VEL. DEFORMACION [$\mu\text{m}/\text{min}$]	CAMD		CAMDK	
	Aire	Húmedo	Aire	Húmedo
Velocidad Deformación 30 - 45	13,3	104,0	11,3	46,0
Velocidad Deformación 75 - 90	10,7	28,0	6,7	22,0
Velocidad Deformación 105 - 120	8,7	18,0	6,0	14,0

A partir de la Tabla 16 se reconoce que las velocidades de deformación para las probetas ensayadas en medio Húmedo son mayores que las que se generan en el ensayo en aire, a excepción del CA24 sin aditivo promotor de adherencia que en el último intervalo presenta una velocidad menor en medio Húmedo.

Para el CA24K se produce un incremento de la velocidad en el intervalo 105-120 de un 44,6% en medio Húmedo, mientras que para el CAMD es de un 106,9% y para el CAMDK 103,3% en el mismo intervalo. El CA24 disminuye su velocidad en este intervalo en un 33,0% ensayando en medio Húmedo.

6.4 Comparación de cementos asfálticos.

6.4.1 Ensayo en Aire.

6.4.1.1 Probetas compactadas por vibrado.

En la Figura 78 se presenta el comportamiento de las cuatro mezclas al ensayo en pista de laboratorio.

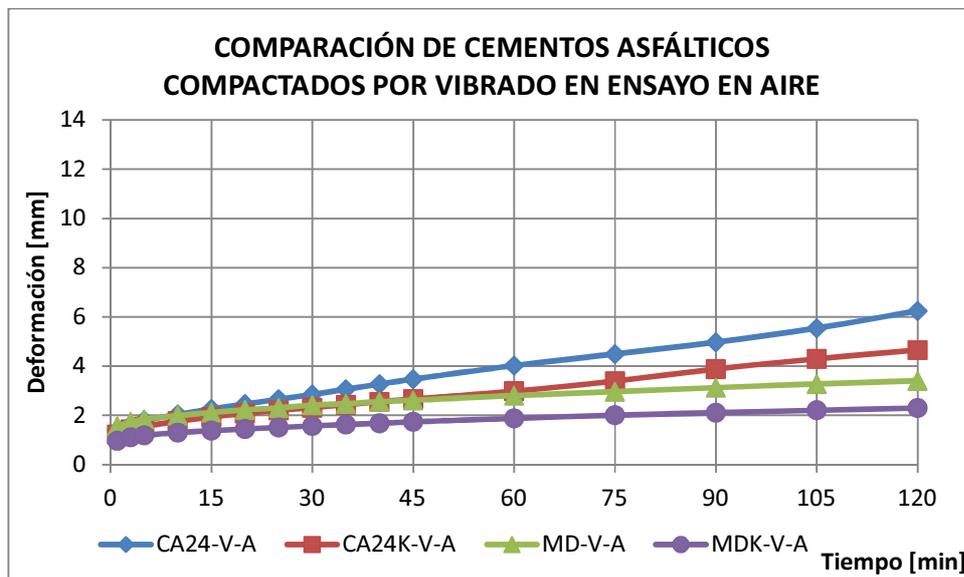


Figura 78: Comparación de cementos asfálticos vibrados en ensayo en Aire.

Al comparar las curvas producidas por los cementos asfálticos se reconoce mayor deformación producida en las mezclas de CA24, es decir, las mezclas asfálticas que se ensayan en la rueda de carga al aire y son modificados con polímero presentan una mejoría superior a la que puede generar el aditivo promotor de adherencia. Aunque cabe señalar que el comportamiento de los cementos asfálticos con el aditivo promotor de adherencia es mejor para ambos tipos de cemento asfáltico.

En cuanto a las velocidades de deformación se tienen tres periodos críticos en los cuales debe evaluarse, estos son los periodos 30 - 45 minutos, 70 - 90 minutos y 105 - 120 minutos, en la Tabla 17 se presenta el resumen de las velocidades de deformación para todas las mezclas ensayadas.

Tabla 17: Vel. de deformación cementos asfálticos vibrados en ensayo en Aire.

VEL. DEFORMACION [µm/min]	En Aire			
	CA24-V-A	CA24K-V-A	MD-V-A	MDK-V-A
Velocidad Deformación 30 - 45	41,3	23,3	13,3	11,3
Velocidad Deformación 75 - 90	32,0	32,7	10,7	6,7
Velocidad Deformación 105 - 120	46,7	24,0	8,7	6,0

En este punto es tan evidente como en la gráfica el mejor desempeño de las mezclas asfálticas con ligante modificado con polímeros, así para mezclas con igual base asfáltica, pero modificada con polímeros y sin promotor de adherencia, la velocidad de deformación en el intervalo 105 - 120 disminuye en casi un 81,4% con respecto al CA24, si esta comparación se realiza entre los cementos asfálticos con Kaoamin 12 este porcentaje disminuye, aunque no deja de ser importante correspondiendo a un 75,0%.

Si estudiamos la variación que produce el solo hecho de agregar el aditivo de adherencia, nos encontramos que disminuye la velocidad de deformación durante el periodo 105-120 en un 48,6% si se trata de CA24 y en un 31,0% tratándose de cemento modificado con polímeros.

En forma general, la incorporación del polímero y del aditivo para la adherencia optimiza el comportamiento en deformación permanente para el ensayo de rueda de carga, reduciendo la velocidad de deformación en un 87,2% en el periodo 105-120, que es el periodo para el cual se especifica un máximo en las obras del Serviu, siendo este máximo de 15 µm/min. Considerando la especificación de Serviu, sólo se podrían considerar, para las faenas que solicitan rueda de carga, las mezclas con cemento asfáltico con polímero, ya que la incorporación del aditivo al CA24 no mejora lo suficiente la mezcla para cumplir.

En los intervalos 30-45 y 75-90 se puede observar la tendencia que poseen los asfaltos con polímero a mejoran su comportamiento frente al ahuellamiento en comparación al CA24. Se observa también el mejor desempeño de las mezclas con Kaoamin 12, aunque existe una excepción en el intervalo 75-90 para el CA24, ya que el cemento con aditivo presenta una mayor velocidad de deformación que el CA24 sin aditivo, aunque prácticamente poseen el mismo valor.

En el ensayo de rueda de carga es usual que a medida que avanza el tiempo que las velocidades de deformación disminuyan, esto se produce debido a un mejor acomodo de las partículas de árido a medida que pasa la rueda, densificando la mezcla en la zona de contacto, para los cementos asfálticos como el CA24 no necesariamente ocurre, debido a mayores

deformaciones en algunas zonas produciendo saltos de la rueda, lo que a su vez produce un aumento de la carga.

6.4.1.2 Probetas compactadas con compactador giratorio.

La Figura 79 muestra las curvas de los distintos cementos asfálticos compactados con el compactador giratorio en el ensayo en pista de laboratorio.

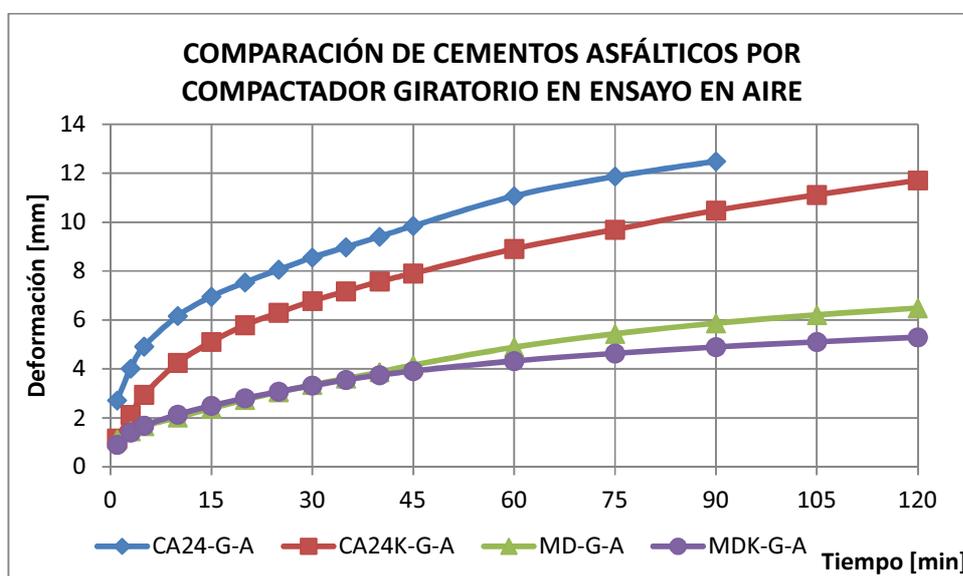


Figura 79: Comparación de cementos asfálticos por compactador giratorio en ensayo en Aire.

El ensayo realizado en mezclas compactadas con el compactador giratorio presenta una mayor deformación en las probetas confeccionadas con cemento asfáltico CA24, incluso no fue posible concluir el ensayo de las muestras sin aditivo promotor de adherencia, ya que la deformación supera el límite de lectura dado por el contacto entre el micrómetro y el tornillo solidario con la rueda. En ambos cementos asfálticos la inclusión de Kaoamin 12 mejora el desempeño de las mezclas ante la deformación permanente

En la Tabla 18 se presentan las velocidades de deformación en los intervalos críticos

Tabla 18: Vel. de deformación cementos asfálticos por compactador giratorio en ensayo en Aire.

VEL. DEFORMACION [µm/min]	En Aire			
	CA24-G-A	CA24K-G-A	MD-G-A	MDK-G-A
Velocidad Deformación 30 - 45	86,0	75,3	54,0	39,3
Velocidad Deformación 75 - 90	41,3	52,0	28,7	17,3
Velocidad Deformación 105 - 120		39,3	18,7	12,7

Las velocidades de deformación verifican el mejor comportamiento que posee el cemento asfáltico modificado con polímeros, el CA24 no aditivado fue incapaz de finalizar el ensayo debido a las grandes deformaciones que posee, por lo que no se puede conocer la velocidad de deformación que tiene en el periodo 105-120. El cemento asfáltico CA24 con promotor de adherencia finaliza el ensayo pero con velocidades de deformación muy por sobre la normativa, obteniéndose 39,3 µm/min, cuando el máximo establecido por el Serviú es de 15 µm/min.

Podemos concluir de la Tabla 18 que el cemento asfáltico modificado sin Kaoamin 12 a pesar de tener bajas deformaciones en comparación al CA24 con y sin aditivo, supera la velocidad máxima de deformación en 3,7 µm/min, por lo que al ser compactado a través del compactador giratorio no cumple con el límite impuesto por las especificaciones del Serviú. El único cemento que optimiza el comportamiento de la mezcla asfáltica y permite que se encuentre dentro de los límites establecidos, es el cemento asfáltico modificado con polímeros y aditivado con el promotor de adherencia.

El aditivo promotor de adherencia reduce en un 32,1% la velocidad de deformación para las mezclas con cementos asfálticos modificados con polímero, muy similar al 31,0% que se reduce en las mezclas compactadas con el método vibratorio.

Se puede también observar la disminución de las velocidades de deformación de los cementos asfálticos con el paso del tiempo. A medida que se avanza a la derecha de la Tabla el comportamiento de los cementos asfálticos mejora en todos los intervalos en que se estudia la velocidad de deformación, a excepción del intervalo 75-90 donde la velocidad de deformación es mayor en el CA24 con aditivo que en el sin aditivo.

6.4.2 Ensayo Húmedo.

6.4.2.1 Probetas compactadas por vibrado.

La Figura 80 muestra las curvas de los distintos cementos asfálticos compactados por el método vibratorio en el ensayo Húmedo.

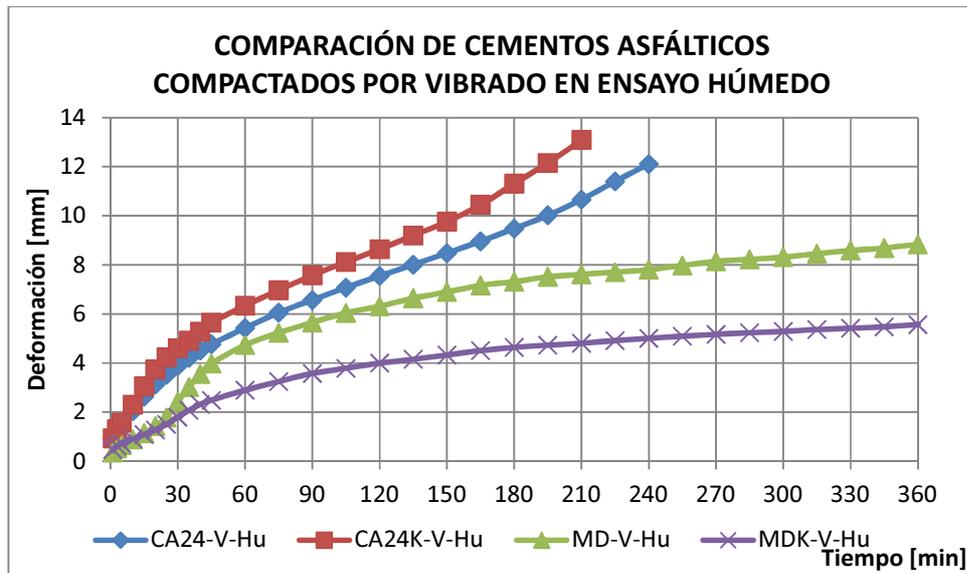


Figura 80: Comparación de cementos asfálticos vibrados en ensayo Húmedo.

De las curvas obtenidas para el ensayo en medio Húmedo se puede apreciar un vuelco a lo que se espera en cuanto al comportamiento de un cemento asfáltico con aditivo promotor de adherencia, ya que las deformaciones que experimenta el CA24 aditivado están por sobre las que se producen para el CA24 normal, los productos fabricados para promover la adherencia de las mezclas asfálticas están pensados en brindarles un mejor comportamiento cuando estas sean sometidas a pruebas que involucran agua, ya que el agua afecta la adherencia.

En cuanto al cemento asfáltico modificado, las mezclas que lo contienen presentan un mejor comportamiento a la deformación permanente en medio Húmedo que las mezclas fabricadas con CA24. Además al incorporar el aditivo promotor de adherencia al cemento asfáltico modificado se reduce la deformación que se produce en la mezcla asfáltica dada por el ensayo Húmedo.

Tabla 19: Punto de stripping probetas vibradas en ensayo Húmedo.

Punto de Stripping [min]			
CA24-V-Hu	CA24K-V-Hu	MD-V-Hu	MDK-V-Hu
200	160	---	---

En la Tabla 19 se puede observar que las probetas que mejor resisten el stripping son las que poseen asfalto modificado con polímeros, ya que ninguna de estas llega al stripping en el ensayo Húmedo.

También se puede observar que a pesar de que el cemento con aditivo promotor de adherencia debiera resistir mejor al stripping, esto no ocurre para el CA24 en el ensayo Húmedo, ya que el CA24 sin aditivo resiste un 25% más (200 min) que el que contiene el aditivo (160 min), esta anomalía responde a una mayor densidad del CA24 sin aditivo con 2431 kg/m^3 , mientras que el CA24 aditivado posee una densidad de 2418 kg/m^3 en promedio, atribuible a la dispersión del sistema de compactación.

Tabla 20: Vel. de deformación cementos asfálticos vibrados en Ensayo Húmedo.

VEL. DEFORMACION [$\mu\text{m}/\text{min}$]	Húmedo			
	CA24-V-Hu	CA24K-V-Hu	MD-V-Hu	MDK-V-Hu
Velocidad Deformación 30 - 45	58,7	69,3	104,0	46,0
Velocidad Deformación 75 - 90	34,0	40,7	28,0	22,0
Velocidad Deformación 105 - 120	31,3	34,7	18,0	14,0

En la Tabla 20 se puede apreciar que si se analizan los primeros 120 minutos, recurriendo a los intervalos críticos para la velocidad de deformación, se encuentra un mejor desempeño de las mezclas asfálticas con polímeros, siendo óptimo al igual que en el gráfico de la Figura 80, el cemento modificado con polímeros y con aditivo promotor de adherencia.

Viendo las velocidades de deformación queda en evidencia la misma anomalía que en los criterios previos de análisis, el CA24 sin aditivo tiene un mejor comportamiento en el ensayo Húmedo que el que posee aditivo, aumentando con el promotor de adherencia en un 9,6% la velocidad de deformación del CA24 en el intervalo 105-120.

Al analizar el cemento modificado con polímeros se observa que al agregar aditivo promotor de adherencia se logra una reducción del 22,2% de la velocidad de deformación. Si la especificación para la Wheel Tracking se aplicara al ensayo Húmedo, solamente sería

satisfactorio el ensayo de las probetas con cemento asfáltico modificado con polímeros y con Kaoamin 12.

6.4.3 Ensayo en la Máquina de Hamburgo.

6.4.3.1 Probetas compactadas por vibrado.

La Figura 81 muestra las curvas de los distintos cementos asfálticos compactados por el método vibratorio en el ensayo en la máquina de Hamburgo.

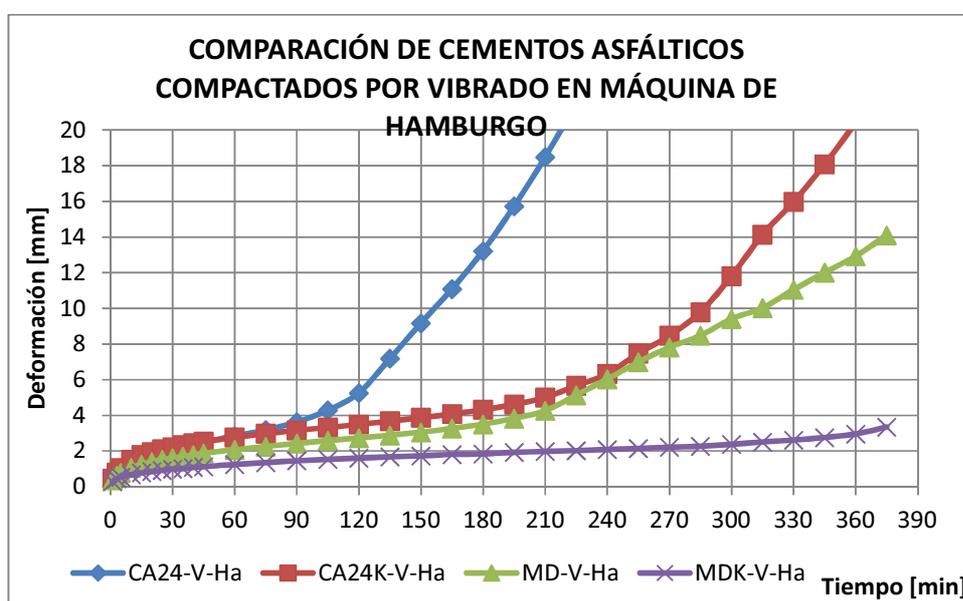


Figura 81: Comparación de cementos asfálticos vibrados ensayados en HWTD.

De las curvas expuestas en la Figura 81 se puede observar que los cementos asfálticos logran mejoras considerables al ser aditivados con Kaoamin 12, asimismo es el cemento asfáltico modificado con polímeros el que resiste mejor la deformación en el ensayo de la máquina de Hamburgo. Las probetas con CA24K y con CAMD muestran un desempeño muy similar hasta los 270 minutos.

El CA24 es incapaz de cumplir con y sin aditivo, el CA24 sin aditivo llega hasta los 220 minutos de ensayo mientras que el CA24K llega a los 360 minutos, 140 minutos más que el CA24 sin aditivo. Por otro lado ambos CAMD concluyen los 375 minutos de ensayo (20.000 pasadas), el CAMD sin aditivo con una deformación de 14,1 mm y el CAMDK con una deformación de 3,34 mm, disminuyendo el aditivo promotor de adherencia en un 76,3% la deformación última. Cabe

señalar que la mejoría que representa la inclusión de Kaoamin 12 es notable en ambos cementos asfálticos.

Tabla 21: Punto de stripping probetas vibradas ensayadas en HWTD.

Punto de Stripping [min]			
CA24-V-Ha	CA24K-V-Ha	MD-V-Ha	MDK-V-Ha
115	250	200	---

De la Tabla 21 se obtiene que las mezclas con CA24 sin aditivo de adherencia son las que muestran una menor resistencia al stripping, ya que llegan más rápidamente al punto de inflexión, mientras que el CA24K tiene una mayor resistencia al stripping que el CAMD, aunque termina el ensayo antes debido a que tiene una mayor pendiente de descubrimiento. El ligante que se debe utilizar para lograr una mejor performance de la mezcla al stripping debe ser modificado con polímeros y contener aditivo promotor de adherencia, este cemento asfáltico permite terminar el ensayo sin llegar al punto de stripping.

Tabla 22: Vel. de deformación cementos asfálticos vibrados ensayados en HWTD.

VEL. DEFORMACION [μm/min]	Hamburgo			
	CA24-V-Ha	CA24K-V-Ha	MD-V-Ha	MDK-V-Ha
Velocidad Deformación 30 - 45	27,3	20,7	18,0	9,3
Velocidad Deformación 75 - 90	30,0	12,0	11,3	6,7
Velocidad Deformación 105 - 120	64,7	11,3	9,3	4,7

De la tabla 22 se puede observar que al detenerse en las velocidades críticas para la Wheel Tracking en el HWTD con probetas vibradas, se obtiene que el mejor desempeño lo tiene el CAMDK, con una velocidad de deformación de 4,7 μm/min en el intervalo 105-120.

Los cementos asfálticos modificados con polímeros tienen menores velocidades de deformación que el CA24 con y sin aditivo, pero se puede notar que las velocidades de deformación para el CA24K y para el CAMD sin aditivo son muy similares. La alta velocidad de deformación del CA24 en el intervalo 105-120 se debe a que ya se encuentra en etapa de stripping.

En el intervalo 105-120 se tiene una disminución en la velocidad de deformación del 85,6% al pasar de CA24 a CAMD, ambos sin aditivo promotor de adherencia. Por otro lado al pasar de CA24K a CAMDK se exhibe una disminución de la velocidad de deformación del 58,4%. La utilización del aditivo promotor de adherencia proporciona una disminución de la velocidad de deformación de un 82,5% para el CA24 y de un 47,4% para el CAMD, además se puede notar

que sólo el CA24 sin aditivo no cumple con las especificaciones del Serviú, con una velocidad de deformación máxima de 15 $\mu\text{m}/\text{min}$.

6.4.3.2 Probetas compactadas por vibrado.

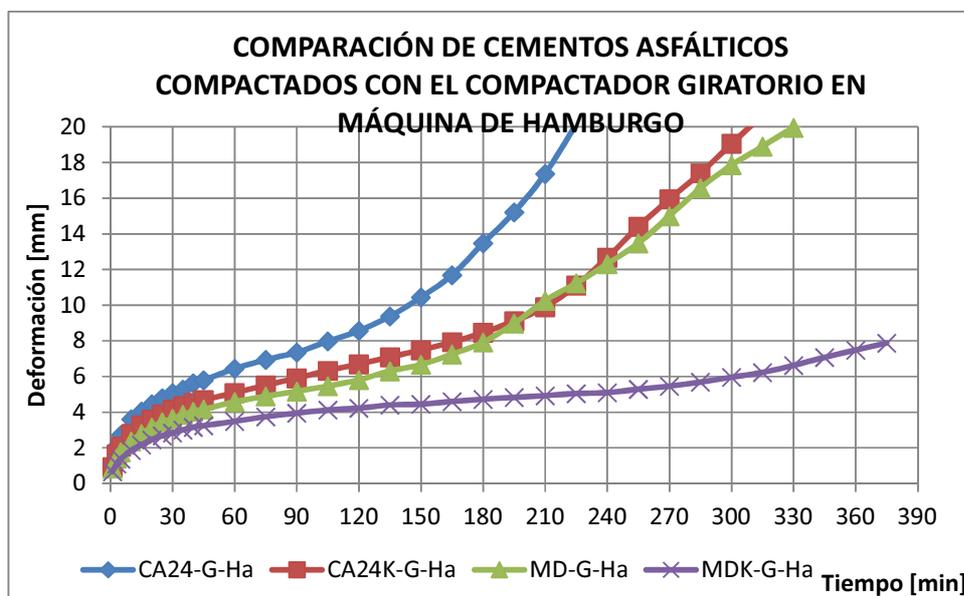


Figura 82: Comparación de cementos asfálticos por compactador giratorio ensayados en HWTB.

Del comportamiento de las probetas compactadas con el compactador giratorio (Fig. 82) se puede reconocer que las fabricadas con CAMD tienen una menor deformación permanente que las fabricadas con CA24. Asimismo se observa que el CA24K muestra una curva de deformación muy similar a la del CAMD.

El CA24 no termina el ensayo, obteniendo una deformación mayor a los 20 mm antes de las 6 horas, independiente de si cuenta con el aditivo promotor de adherencia o no. En lo que compete a los cementos asfálticos modificados con polímeros, sólo el que contiene aditivo resulta terminar el ensayo, sin embargo el CAMD sin aditivo posee una deformación muy por debajo de la que tiene el CA24, y ligeramente inferior a la del CA24K.

Tabla 23: Punto de stripping probetas en el compactador giratorio ensayadas en HWTB

Punto de Stripping [min]			
CA24-G-Ha	CA24K-G-Ha	MD-G-Ha	MDK-G-Ha
150	205	170	---

De la Tabla 23 se obtiene que las mezclas con CA24 que no cuentan con aditivo de adherencia son las que muestran una menor resistencia al stripping, ya que llegan más rápidamente al punto de inflexión, mientras que el CA24K tiene una mayor resistencia al stripping que el CAMD sin aditivo, aunque termina el ensayo antes debido a que tiene una mayor pendiente de descubrimiento. El ligante que se debe utilizar para lograr una mejor performance de la mezcla al stripping debe ser modificado con polímeros y contener aditivo promotor de adherencia, este cemento asfáltico permite terminar el ensayo sin llegar al punto de stripping.

Tabla 24: Vel. de deformación cementos asfálticos en el compactador giratorio ensayados en la Máquina de Hamburgo.

VEL. DEFORMACION [µm/min]	Hamburgo			
	CA24-G-Ha	CA24K-G-Ha	MD-G-Ha	MDK-G-Ha
Velocidad Deformación 30 - 45	47,3	36,0	35,3	27,3
Velocidad Deformación 75 - 90	28,0	26,7	18,0	13,3
Velocidad Deformación 105 - 120	39,3	24,7	23,3	6,7

En la Tabla 24 se utilizan las velocidades de deformación críticas definidas para el ensayo Wheel Tracking en el ensayo de Hamburgo, de donde se obtiene un comportamiento muy favorable para las mezclas con CAMD con y sin aditivo, así en el intervalo 105-120 se tiene una disminución en la velocidad de deformación del 40,7% al pasar de CA24 a CAMD, ambos sin aditivo promotor de adherencia. Por otro lado al pasar de CA24K a CAMDK se exhibe una disminución de la velocidad de deformación del 72,8%. Se puede apreciar un gran aumento en la velocidad de deformación del CA24 en el último intervalo, esto se debe a que la pendiente ya dejó de ser la de deformación y se encuentra en la transición a la pendiente de descubrimiento.

La utilización del aditivo promotor de adherencia proporciona una disminución de la velocidad de deformación de un 37,1% para el CA24 y de un 71,2% para el CAMD, además se puede notar que sólo es CAMDK cumple con las especificaciones del Serviu con una velocidad de deformación máxima de 15 µm/min.

6.5 Comparación Tipos de compactación.

6.5.1 Ensayo en Aire.

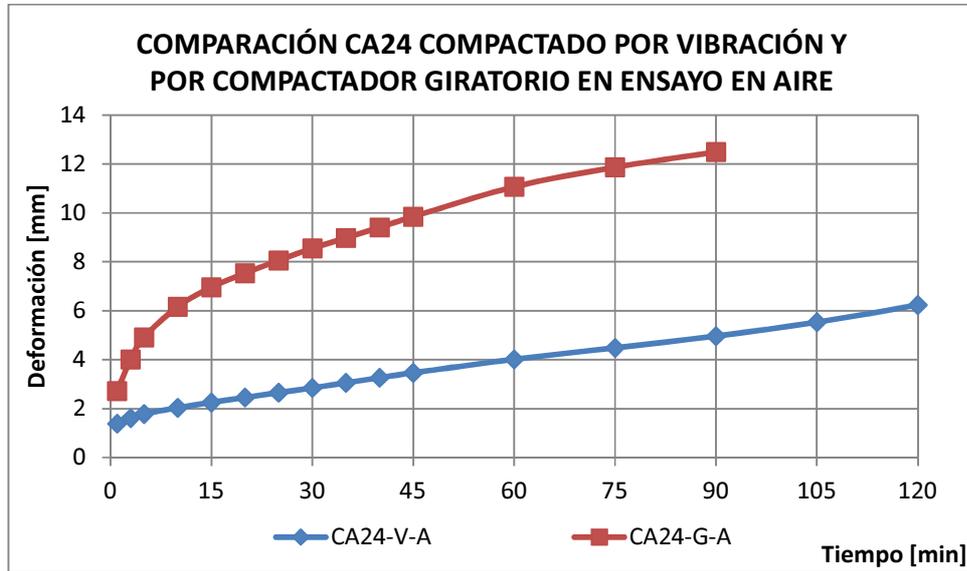


Figura 83: Comparación de compactación CA24 en Aire.

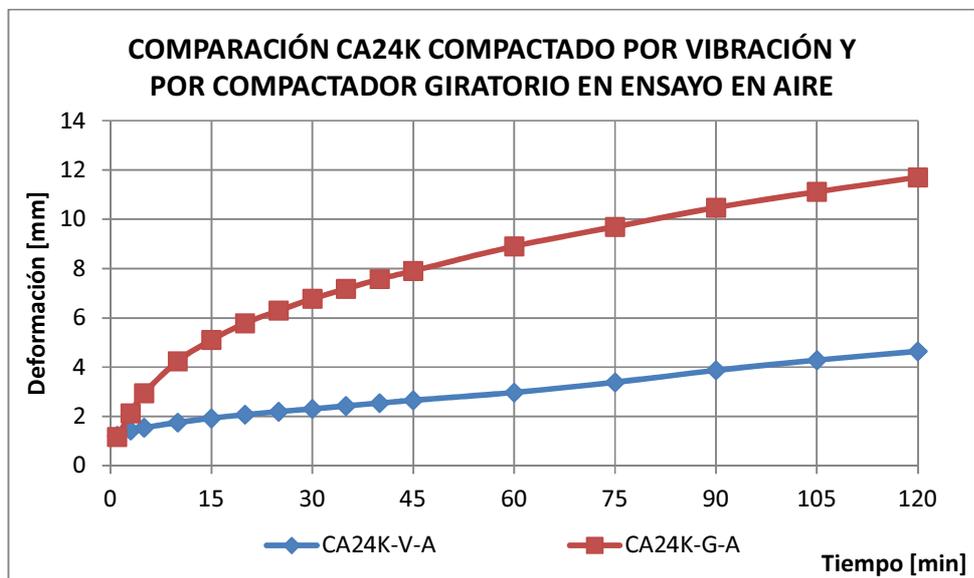


Figura 84: Comparación de compactación CA24K en Aire.

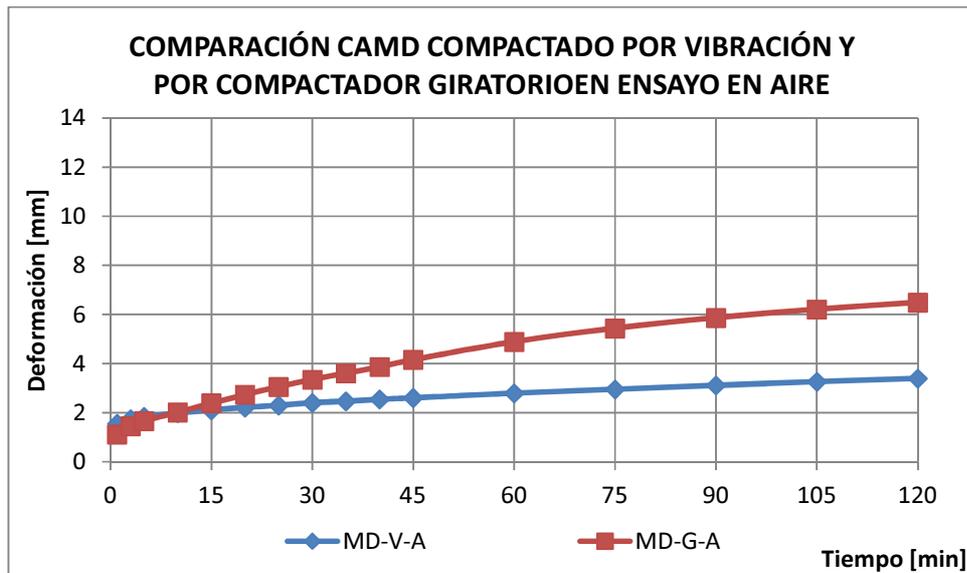


Figura 85: Comparación de compactación CAMD en Aire.

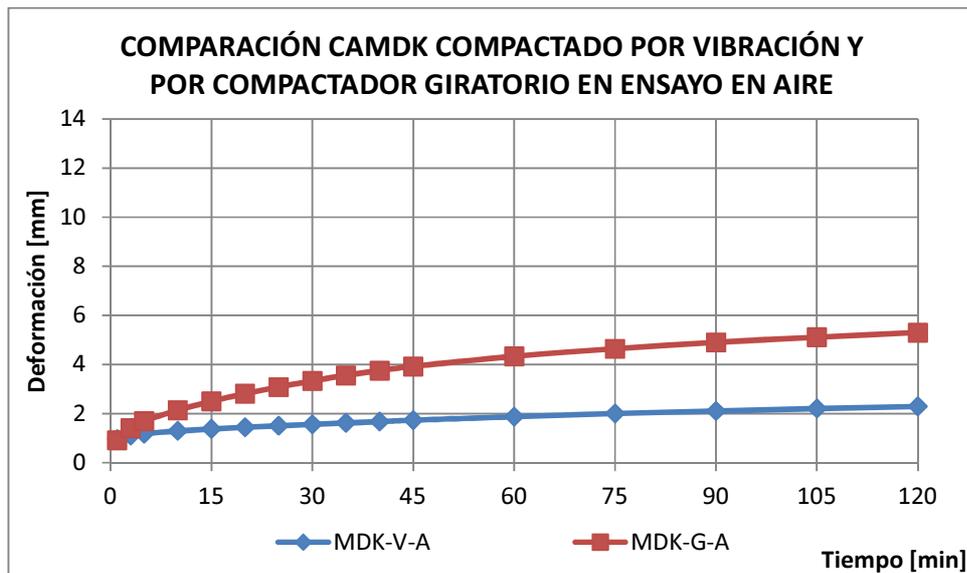


Figura 86: Comparación de compactación CAMDK en Aire.

Los ensayos realizados a probetas compactadas con el método vibratorio tienen menores deformaciones que las que se compactaron a través del compactador giratorio independiente del tipo de cemento asfáltico que se utilice, las diferencias de deformación en el CA24 al cambiar el método de compactación son mayores que en los cementos modificados con

polímeros, incluso las probetas con CA24 sin aditivo no pueden finalizar el ensayo. En todos los casos en que se logra terminar el ensayo, la deformación final para las probetas compactadas con el compactador giratorio es más del doble de la que tienen las probetas compactadas por vibrado. (Fig. 83, 84, 85, 86).

La zona donde se producen los mayores incrementos de deformación para las probetas compactadas en el compactador giratorio, en comparación a las que se compactan por vibrado, es en la zona de consolidación, es decir, aquella zona donde la probeta se acomoda y termina de compactarse, previo a la pendiente de deformación. Que se produzca la mayor diferencia en la consolidación quiere decir que la compactación hecha por el método vibratorio acomoda el árido de mejor forma que el método vibratorio.

Tabla 25: Densidades promedio probetas ensayadas en Aire.

Densidades promedio probetas consideradas [kg/m³]				
Tipo Compactación	CA24	CA24K	CAMD	CAMDK
Vibratorio	2439	2432	2381	2403
Giratorio	2389	2373	2395	2384

La Tabla 25 muestra el promedio de las densidades de las probetas (no rechazadas) en cada tipo de cemento asfáltico y de compactación, se puede notar que las mayores diferencias en cuanto a la densidad vibratoria y la giratoria se encuentran en el CA24. La densidad alcanzada por el CA24 vibratorio supera en 50 kg/m³ la densidad de la que se compactó con compactador giratorio, mientras que en el CA24K ocurre algo similar con una diferencia de 59 kg/m³. En el CAMDK se puede notar que el método vibratorio promedia una densidad 19 kg/m³ mayor que la del método giratorio, pero en lo que respecta al CAMD el método vibratorio tiene una densidad menor en 14 kg/m³ que el método giratorio.

Considerando lo que ocurre con el CAMD, y viendo que de todos modos se cumple que la deformación en las probetas compactadas a través del método giratorio es mayor, se puede deducir que las grandes deformaciones que se producen en la zona de consolidación para las probetas confeccionadas a través del método giratorio son propias del método de compactación.

Tabla 26: Velocidades de deformación probetas ensayadas en Aire.

VEL. DEFORMACION [$\mu\text{m}/\text{min}$]	CA24 - Aire			
	CA24-V-A	CA24-G-A	CA24K-V-A	CA24K-G-A
Velocidad Deformación 30 - 45	41,3	86,0	23,3	75,3
Velocidad Deformación 75 - 90	32,0	41,3	32,7	52,0
Velocidad Deformación 105 - 120	46,7		24,0	39,3
VEL. DEFORMACION [$\mu\text{m}/\text{min}$]	CAMD - Aire			
	MD-V-A	MD-G-A	MDK-V-A	MDK-G-A
Velocidad Deformación 30 - 45	13,3	54,0	11,3	39,3
Velocidad Deformación 75 - 90	10,7	28,7	6,7	17,3
Velocidad Deformación 105 - 120	8,7	18,7	6,0	12,7

De la Tabla 26 se puede observar que las velocidades de deformación para cada uno de los cementos asfálticos utilizados, siempre son mayores para las que se compactan por Compactador giratorio (G), lo cual es afín con las gráficas (Fig. 83, 84, 85, 86).

La velocidad de deformación en el periodo 105-120 para la mezcla de CAMD giratorio aumenta en un 115% con respecto a la vibratoria, similar es el caso de CAMDK, donde en el mismo periodo la velocidad aumenta en un 112%. Para el CA24K la velocidad de deformación en el último intervalo crítico aumenta en un 64%, este índice no se puede calcular para el CA24 sin aditivo ya que en el caso de la compactación giratoria la deformación a los 105 minutos no se puede medir con el micrómetro.

6.5.2 Ensayo en Máquina de Hamburgo.

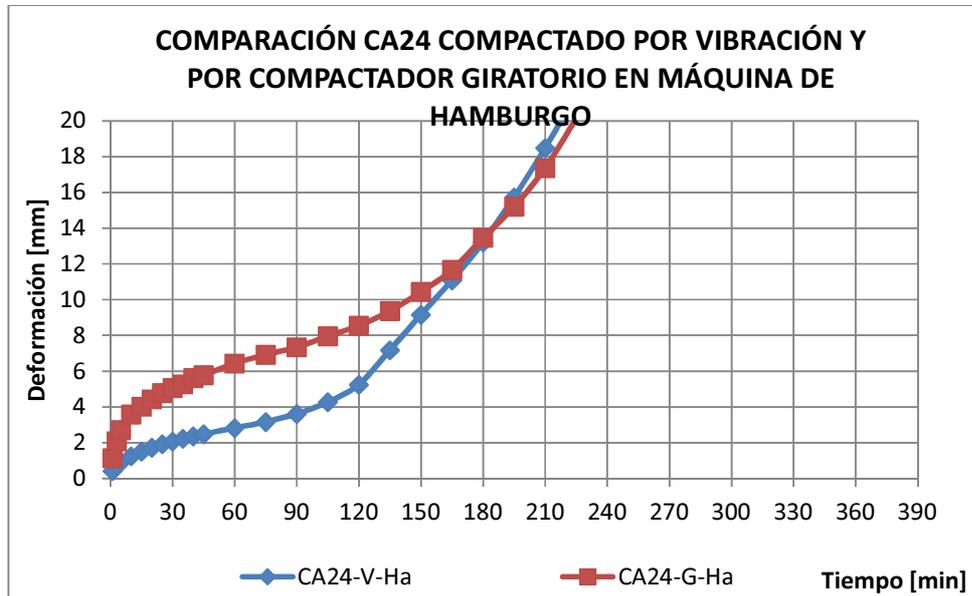


Figura 87: Comparación de compactación CA24 en HWT.D.

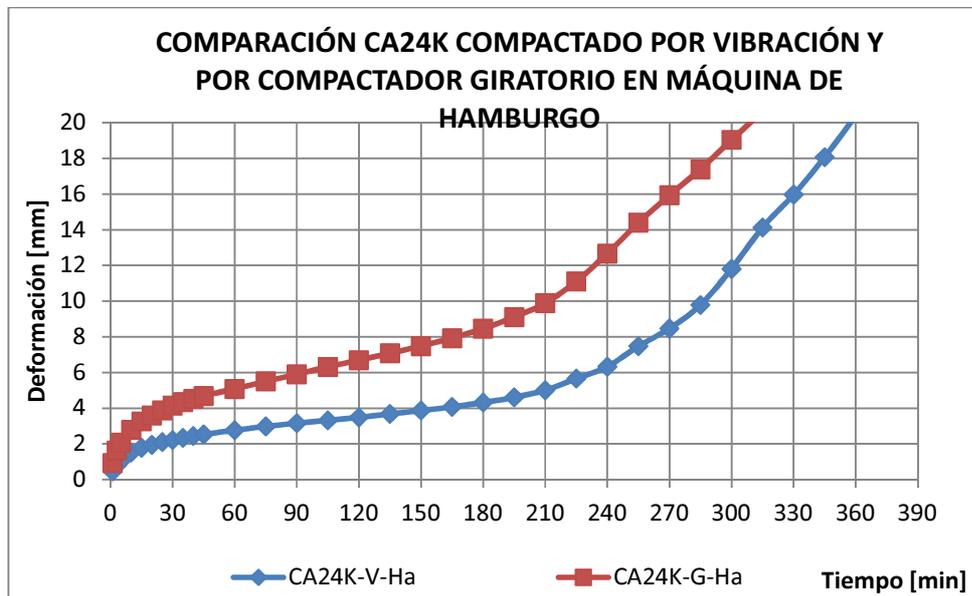


Figura 88: Comparación de compactación CA24K en HWT.D.

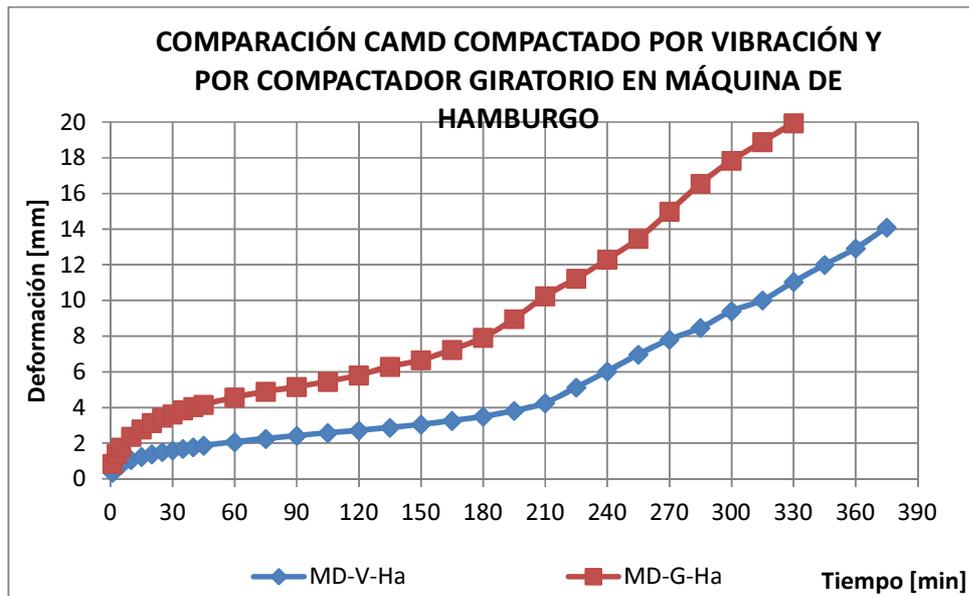


Figura 89: Comparación de compactación CAMD en HWTD.

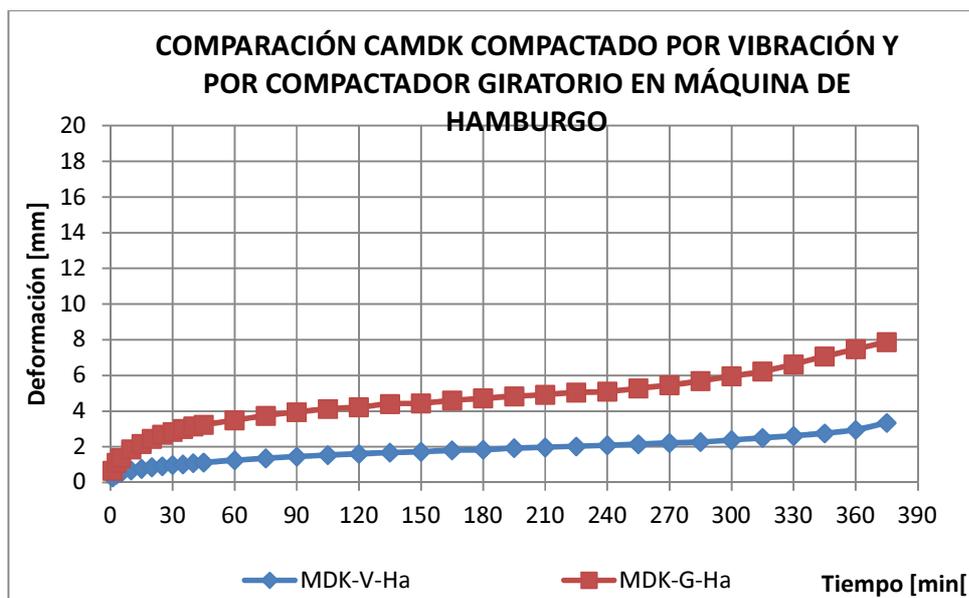


Figura 90: Comparación de compactación CAMDK en HWTD.

De comparar las probetas ensayadas en la Máquina de Hamburgo según el tipo de compactación, se puede observar que el método vibratorio permite la obtención de menores deformaciones, en el CA24 el método vibratorio tiene mayores deformaciones solo al llegar al final del ensayo. La mayor diferencia en la acumulación de deformaciones permanentes se

produce en la etapa de consolidación, que es donde las probetas compactadas por el compactador giratorio obtienen las mayores tasas de crecimiento de sus deformaciones (Fig. 87, 88, 89, 90).

Se puede notar en las Figuras 87, 88, 89 y 90 que para ambos métodos de compactación las pendientes de descubrimiento en son muy similares, siendo un comportamiento propio de la mezcla y no del tipo de compactación, por lo cual la compactación afecta sólo en la etapa de consolidación.

La mayor discrepancia en cuanto a los resultados se puede obtener en el CAMD, tomando en cuenta el test de pasa o no pasa, puesto que si es compactado por el método vibratorio cumple con que la deformación es menor que los 20 mm permitidos por el método de Hamburgo, mientras que si se compacta con el compactador giratorio pasa los 20 mm cuando el ensayo tiene 330 minutos.

Tabla 27: Densidades promedio probetas ensayadas en HWTD.

Densidades promedio probetas consideradas [kg/m³]				
Tipo Compactación	CA24	CA24K	CAMD	CAMDK
Vibratorio	2428	2421	2399	2416
Giratorio	2383	2389	2389	2388

En la Tabla 27 se muestran las densidades promedio de las probetas no excluidas, de donde se obtiene que el método vibratorio posee mayor nivel de compactación que la compactación giratoria en todos los cementos asfálticos. Las mayores diferencias de densidad se producen en los CA24, donde el CA24 vibrado supera en 45 kg/m³ al obtenido con el método giratorio, asimismo el CA24K vibrado tiene una densidad 32 kg/m³ superior al giratorio.

En el CAMD las diferencias de densidad disminuyen obteniendo tan solo 10 kg/m³ más en la compactación vibratoria, si se va a la grafica (Fig. 89) las diferencias en cuanto al comportamiento vibratorio versus giratorio son concordantes con las pruebas al CA24, por lo que no es una diferencia debido al nivel de compactación al que se llegue, sino que es una diferencia propia de cada tipo de compactación. El método vibratorio brinda al CAMDK 28 kg/m³ más de densidad que el método giratorio.

La tabla 28 compara los minutos en los cuales se llega al stripping en cada probeta, así se obtiene que es más fácil llegar al stripping para las probetas compactadas por el método giratorio, exceptuando al CA24, que a pesar de llegar después al stripping su nivel de deformación es mayor, igualándose a las del método vibratorio sólo en el final del ensayo.

Tabla 28: Puntos de stripping probetas ensayadas en HWTD.

Punto de Stripping [min]			
CA24-V-Ha	CA24K-V-Ha	MD-V-Ha	MDK-V-Ha
115	250	200	---
CA24-G-Ha	CA24K-G-Ha	MD-G-Ha	MDK-G-Ha
150	205	170	---

Si bien no se reconoce un punto de stripping para el CAMDK giratorio, se visualiza un cambio de pendiente en el final del ensayo, lo que no ocurre con el que se compacta de forma vibratoria.

Tabla 29: Velocidades de deformación probetas ensayadas en HWTD.

VEL. DEFORMACION [µm/min]	CA24 - Hamburgo			
	CA24-Vib.	CA24-Gir.	CA24K-Vib.	CA24K-Gir.
Velocidad Deformación 30 - 45	27,3	47,3	20,7	36,0
Velocidad Deformación 75 - 90	30,0	28,0	12,0	26,7
Velocidad Deformación 105 - 120	64,7	39,3	11,3	24,7
VEL. DEFORMACION [µm/min]	CAMD - Hamburgo			
	MD-Vib.	MD-Gir.	MDK-Vib.	MDK-Gir.
Velocidad Deformación 30 - 45	18,0	35,3	9,3	27,3
Velocidad Deformación 75 - 90	11,3	18,0	6,7	13,3
Velocidad Deformación 105 - 120	9,3	23,3	4,7	6,7

Si se analizan las velocidades de deformación en los periodos críticos definidos para el ensayo Wheel Tracking (Tabla 29), se puede apreciar que siempre estas son mayores para las mezclas compactadas con el compactador giratorio, sólo en el CA24 sin aditivo ocurre que hay velocidades mayores para muestras compactadas por el método vibratorio dado su temprana llegada al stripping.

6.6 Comparación ensayo Húmedo-V y HWTD-G.

En este punto se comparará el ensayo Húmedo definido en este estudio y el ensayo en la máquina de Hamburgo con las probetas compactadas según el equipo que posee cada laboratorio, es por ello que el ensayo Húmedo se realiza con probetas compactadas por vibrado y el HWTD se considera con las probetas compactadas en el compactador giratorio.

Para hacer un análisis se debe considerar las diferencias en la calibración de las máquinas, materiales de los componentes de cada máquina y acondicionamientos para cada uno de los ensayos, estas diferencias se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30: Comparación de factores que afectan el ensayo Húmedo y el ensayo HWTD.

FACTOR	COMPARACIÓN	
	HÚMEDO	HAMBURGO
Carga [N]	917,9 ¹	700
Espesor rueda [mm]	50	47
Material Rueda	Acero cubierto con Caucho	Acero
Frecuencia [pasadas/min]	84	53
Temperatura [°C]	60	50
Acondicionamiento	Esponja Saturada	Sumergida en Agua

¹ La carga es de 93,6 kgf (Anexo A), para transformarla en Newton se utiliza la conversión 1 kgf = 9,81 N.

6.6.1 Cementos Asfáltico CA24.

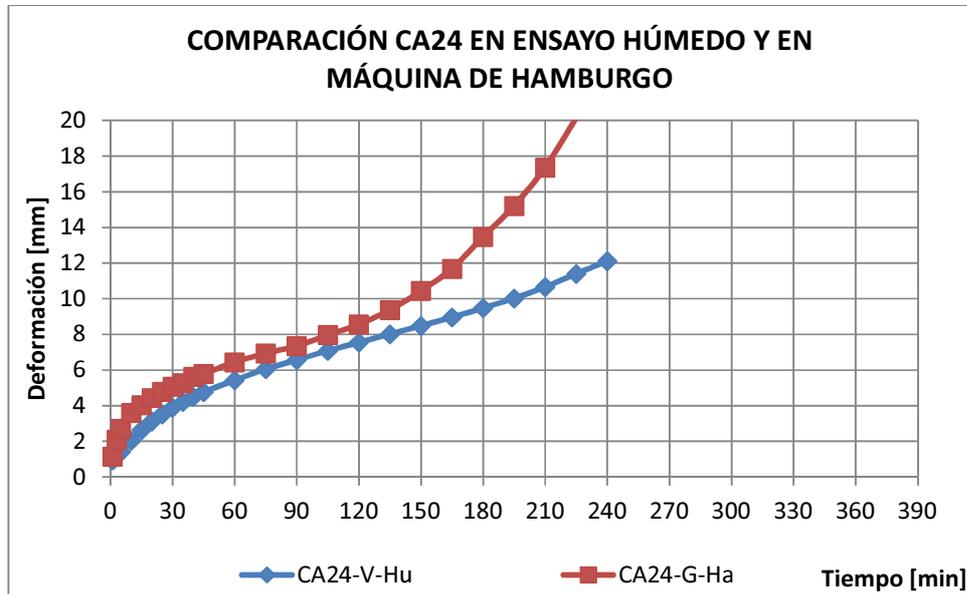


Figura 91: Comparación CA24 en ensayo Húmedo y HWTD.

Las deformaciones producidas en el ensayo de Hamburgo son siempre superiores que las que se producen en el ensayo Húmedo, si bien las condiciones de ensayo de la Wheel Tracking son más desfavorables en cuanto a temperatura y carga, el acondicionamiento con probeta totalmente sumergida en agua que hay en la máquina de Hamburgo resulta aún más desfavorable.

En el comienzo las curvas de deformación son muy similares, pero a partir del minuto 120 las probetas ensayadas en la HWTD elevan bruscamente la pendiente de la deformación, esto se debe a que el stripping ya se hace notar en el ensayo, mientras que el ensayo Húmedo comienza a experimentar un cambio sutil de la pendiente en el minuto 210. También se puede notar que la pendiente de descubrimiento que se alcanza a desarrollar en la HWTD es superior a la que se desarrolla en el ensayo Húmedo.

El punto de stripping en el ensayo de Hamburgo ocurre a los 150 minutos, mientras que en el ensayo Húmedo ocurre 50 minutos después (Tablas 19 y 23), demostrando lo desfavorable de ensayar las probetas totalmente sumergidas en agua comparado con realizar el ensayo con una esponja húmeda.

6.6.2 Cementos Asfáltico CA24 con aditivo promotor de adherencia.

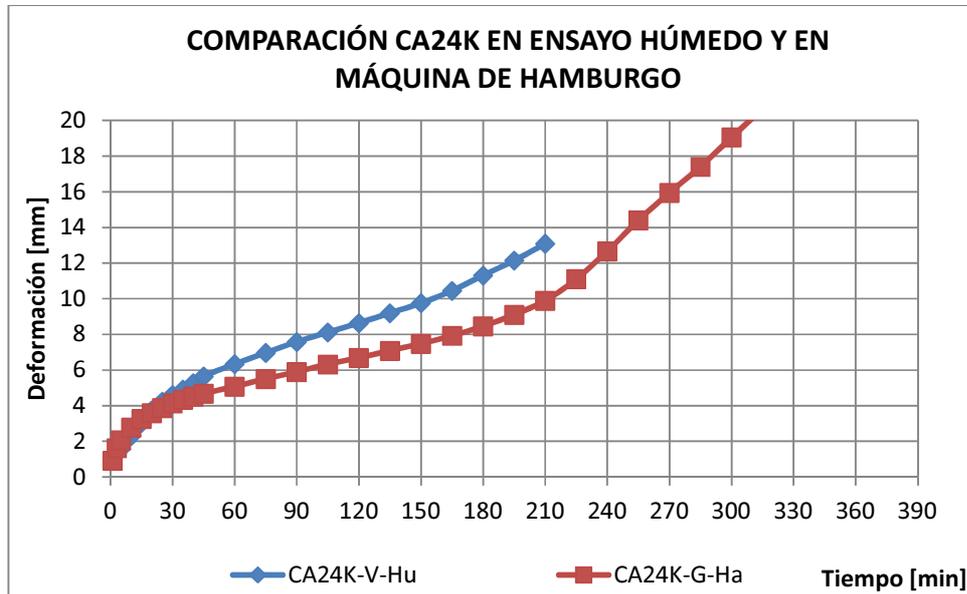


Figura 92: Comparación CA24K en ensayo Húmedo y HWT.

Contrariamente a lo visto en el ensayo de CA24 sin aditivo (5.6.1), en la Figura 92 se observa que hay mayores deformaciones en el ensayo realizado en medio Húmedo, lo que hace pensar que el efecto de aumentar la temperatura y la carga, teniendo una esponja húmeda, es más desfavorable que realizar el ensayo con las probetas sumergidas en agua, lamentablemente la capacidad de medir en la máquina Wheel Tracking sólo es hasta los 13 mm aproximadamente, por lo que no se puede conocer lo que ocurre posteriormente en el ensayo Húmedo.

Pasados los 180 minutos en el ensayo Húmedo se puede notar un cambio en la pendiente de la deformación, viéndose similar a la pendiente de descubrimiento que hay en el ensayo HWT. Si analizamos los puntos de stripping (Tablas 19 y 23), podemos encontrar que ocurre en el ensayo Húmedo transcurridos 160 minutos, mientras que en el ensayo en la máquina de Hamburgo este punto se verifica en los 205 minutos, otra inconsistencia con el CA24 sin aditivo, ya que en este el punto de stripping se obtiene antes en el HWT.

6.6.3 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.

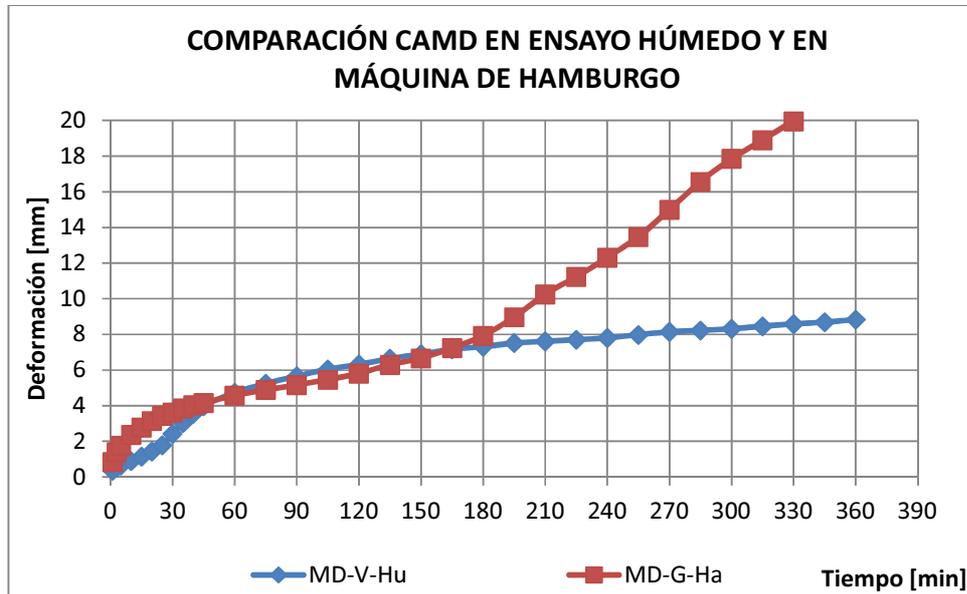


Figura 93: Comparación CAMD en ensayo Húmedo y HWTD.

De comparar probetas de CAMD el ensayo Húmedo con el HWTD (Figura 93) se obtiene que las deformaciones dadas por ambos ensayos son similares hasta los 180 minutos, luego de ello las deformaciones en el ensayo de Hamburgo comienzan a incrementar en tasas mayores a las del ensayo Húmedo, concluyendo que las probetas ensayadas en el HWTD ya alcanzaron el stripping y están desarrollando la pendiente de descubrimiento, pendiente que nunca se genera en el ensayo Húmedo.

El punto de stripping para las probetas ensayadas en la máquina de Hamburgo es de 170 minutos, mientras que este punto no se desarrolla en el ensayo Húmedo, dado la larga jornada que se necesita para ensayar probetas en medio Húmedo, la presencia obligatoria de personal, y el riesgo que corre la máquina es que no se puede extender el ensayo más de 6 horas, por lo tanto es imposible conocer si el stripping se desarrolla después de las 6 horas en el ensayo Húmedo.

6.6.4 Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros con aditivo promotor de adherencia.

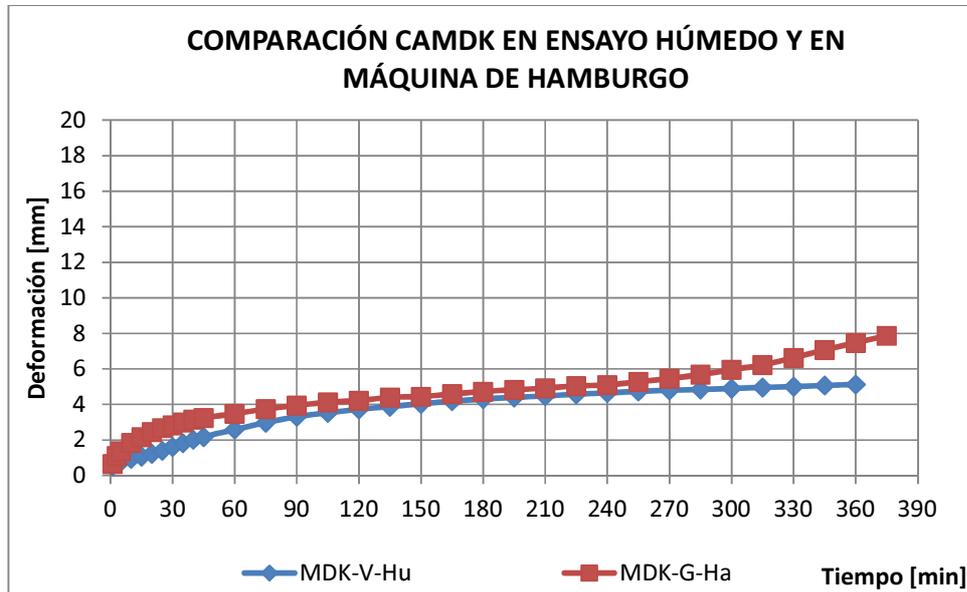


Figura 94: Comparación CAMDK en ensayo Húmedo y HWTD.

Comparando las curvas de deformación del CAMDK ensayado en medio Húmedo y en HWTD (Figura 94), se puede observar que las curvas presentan similitud hasta el minuto 270 aproximadamente, luego de esto la curva del ensayo en la máquina de Hamburgo cambia la pendiente sin desarrollarse por completo el stripping, pero tiene una tasa de aumento de las deformaciones mayor.

Si bien ninguno de los dos ensayos ha desarrollado por completo el stripping y no es posible obtener los puntos de stripping de ambos (Tablas 19 y 23), el ensayo de Hamburgo en el final comienza a mostrar los efectos de la pérdida de afinidad ligante/árido, por las limitaciones del ensayo Húmedo no es posible conocer si se obtendrá o cuando se obtendrá el punto de inflexión.

6.7 Obtención del factor que correlacione el ensayo Húmedo-V y el HWTD-G.

Tratando de relacionar las deformaciones del ensayo realizado en medio Húmedo y las de la HWTD se recurre a las herramientas de Microsoft Excel haciendo una regresión acorde con cada una de las curvas que se registran dependiendo del cemento asfáltico utilizado.

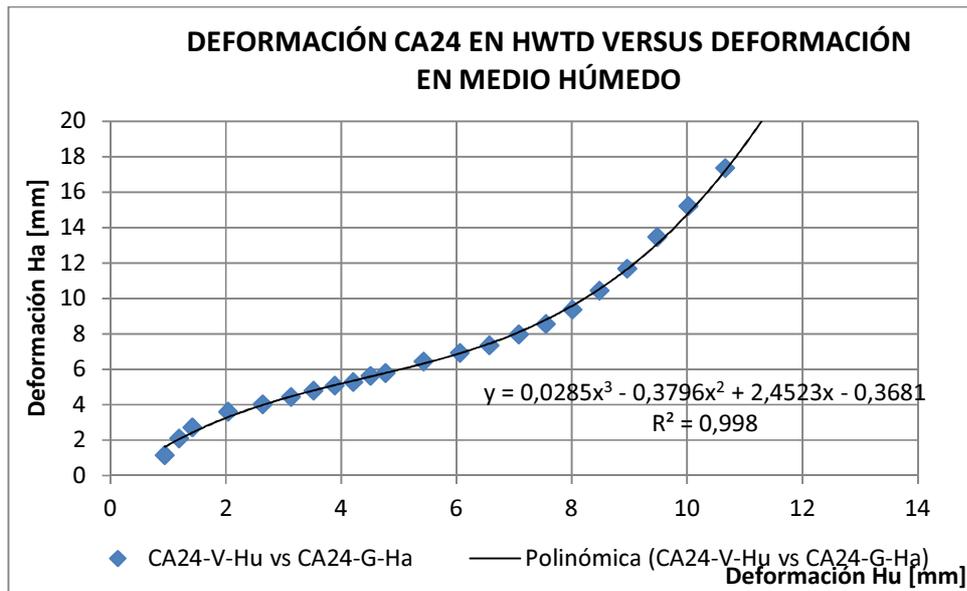


Figura 95: Regresión Polinómica de orden 3 CA24.

La relación que mejor representa las deformaciones de la máquina de Hamburgo, en función de las deformaciones del ensayo Húmedo en un mismo tiempo para el CA24 es una curva polinómica de orden 3 (Figura 95), obteniéndose un factor de determinación (R^2) de 0,998, muy cercano a 1 lo que indica que existe una correlación polinómica de este tipo. En la gráfica se puede observar que prácticamente la regresión pasa por los puntos de la dispersión de datos. La correlación se realiza hasta el minuto 225 que es cuando se toma lectura del último punto en el HWTD.

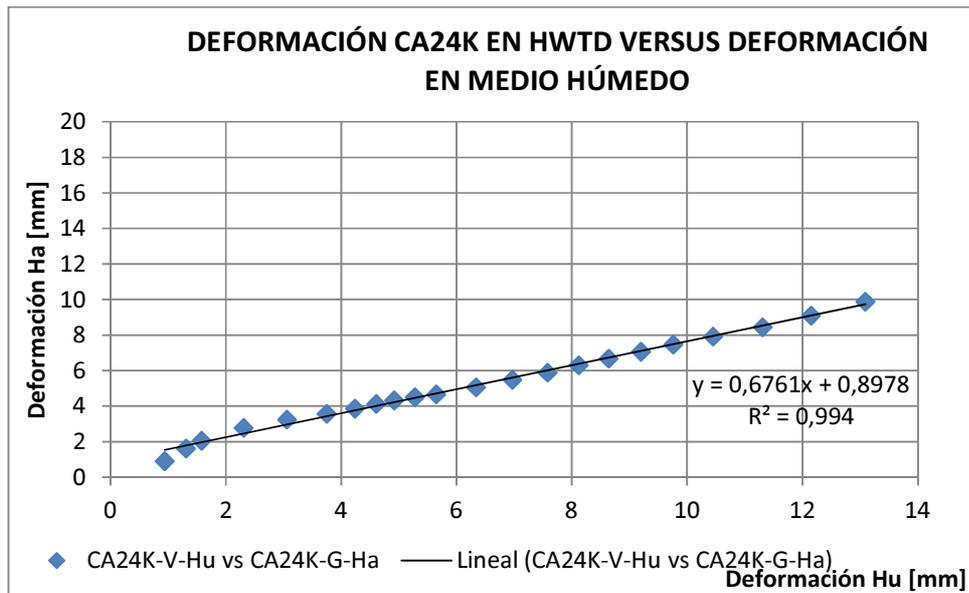


Figura 96: Regresión Lineal CA24K.

De la gráfica de dispersión de los puntos de deformación del ensayo de Hamburgo, en función de las deformaciones que se producen para el ensayo Húmedo en iguales tiempos para el CA24K, se puede deducir que la mejor correlación posible está dada por una regresión lineal, obteniéndose un factor de determinación (R^2) de 0,994, muy cercano a 1 lo que indica la existencia de una correlación lineal. En la gráfica se puede observar que la regresión pasa prácticamente por los puntos de dispersión. La correlación se realiza sólo hasta el minuto 210, que es cuando se puede tomar lectura del último punto en el ensayo Húmedo.

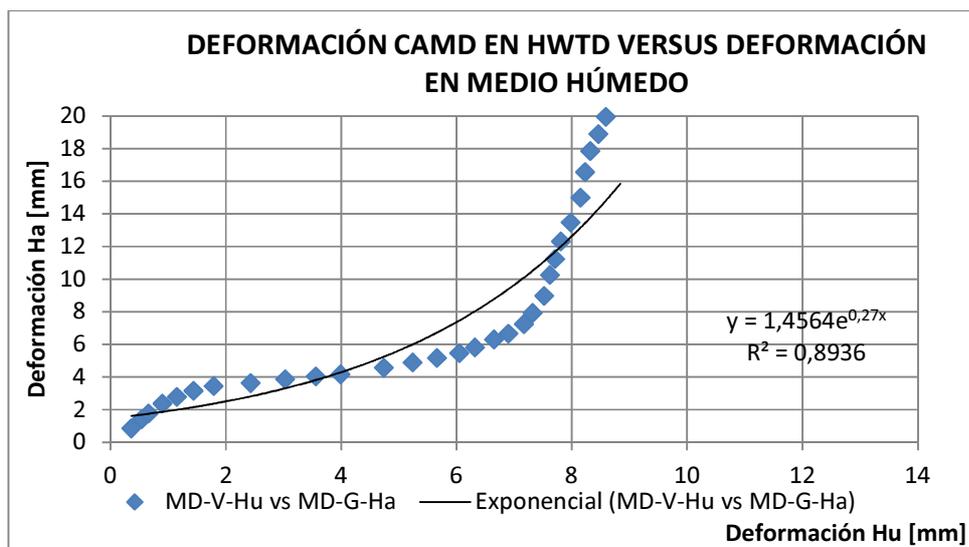


Figura 97: Regresión exponencial CAMD.

En la gráfica que muestra la dispersión de los puntos de las deformaciones del ensayo de Hamburgo en función de las deformaciones del ensayo Húmedo en iguales tiempos para el CAMD (Figura 97), se observa que no hay una tendencia clara para hacer una regresión, por lo cual la relación exponencial se realizó por ser la que mejor correlaciona los puntos, ya que las polinómicas de orden 2 y 3 no son estrictamente crecientes. La regresión exponencial logra un factor de determinación (R^2) de 0,8936, más alejado de 1 que los factores de correlación obtenidos para el CA24 y el CA24K.

En la gráfica podemos visualizar que la curva de la regresión no satisface la dispersión de los datos. La correlación se realiza hasta los 360 minutos, que es cuando ambos ensayos dejan de tomar mediciones.

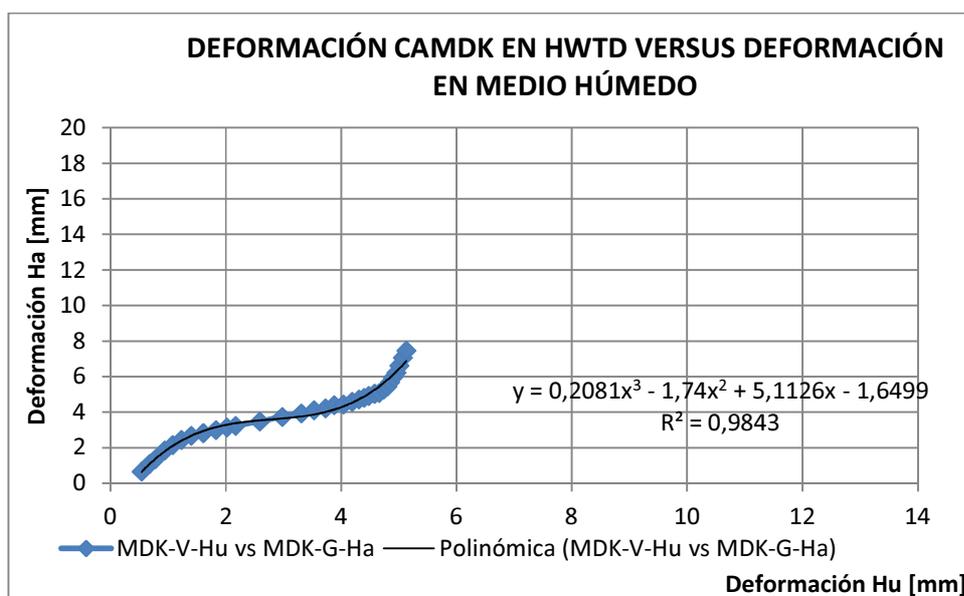


Figura 98: Regresión polinómica de orden 3 CAMDK.

La gráfica de la Figura 98 muestra la dispersión de los puntos de las deformaciones del ensayo de Hamburgo en función de las deformaciones del ensayo Húmedo en iguales tiempos para el CAMDK, pudiendo obtener de ella que la mejor correlación que se puede obtener viene dada por una regresión polinómica de orden 3. La regresión polinómica de orden 3 logra un factor de determinación (R^2) de 0,9843, cercano a 1 lo que indica la existencia de una correlación de este tipo. De la gráfica se puede observar que la curva de regresión prácticamente pasa por los

puntos de la dispersión. La correlación se realiza hasta el minuto 360 que es la última lectura del ensayo Húmedo.

En conclusión se puede notar que las curvas de regresión son muy distintas entre un tipo de ligante y otro, asimismo a pesar de utilizar regresiones polinómicas de orden 3 en el CA24 y en el CAMDK, los factores que se obtienen son muy diferentes, por lo que sería muy difícil encontrar una sola función que correlacione los métodos de ensayo y no sólo a cada ligante en particular, quedando esto reflejado de mejor forma en las gráfica de dispersión que incluye todos los tipos de ligante estudiados (Figura 99).

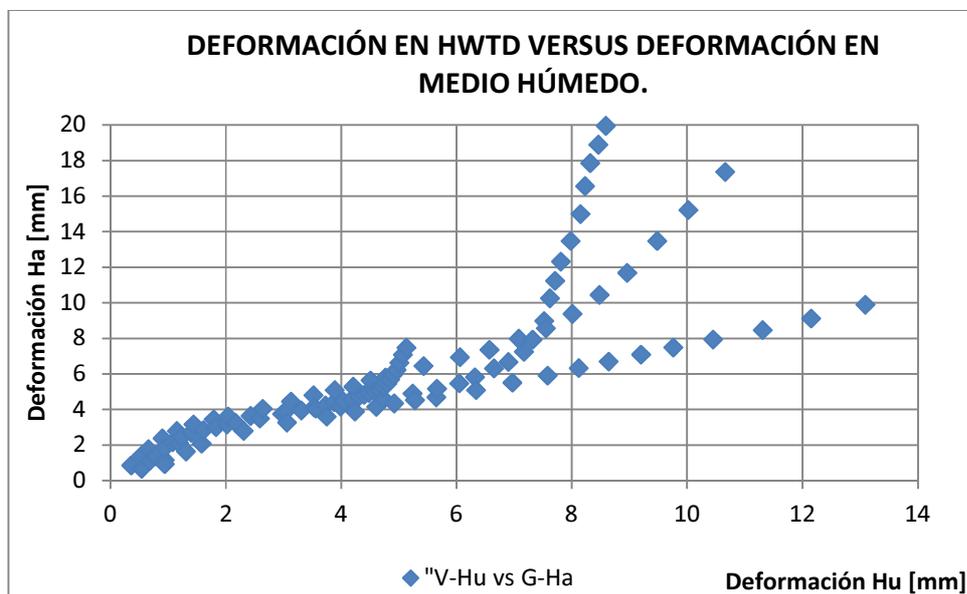


Figura 99: Dispersión de deformación en HWTED vs ensayo Húmedo con todos los ligantes estudiados.

La correlación de los puntos sólo es posible hasta un nivel de deformación en el ensayo Húmedo de 7 mm, pasado esto el comportamiento es muy distinto para cada tipo de ligante.

Capítulo 7

Discusión y conclusiones

7.1 Introducción

Existen diversos métodos para estimar el ahuellamiento potencial de mezclas asfálticas, que aunque tienen cierta similitud, difieren en cuanto a las especificaciones para la confección de las probetas, al acondicionamiento previo al ensayo, existiendo también variables propias a las máquinas de ensayo. Se ha podido apreciar también, a lo largo del presente trabajo la influencia del control del proceso de ensayo por parte de quienes intervienen en su planificación y ejecución, ya que factores como las temperaturas de mezclado y compactación, reproducción de la granulometría de diseño y la deficiente fijación de las muestras a la máquina de ensayo son determinantes en el nivel de dispersión de los ensayos, existiendo aspectos críticos tales como la textura de la superficie en contacto con la rueda y la temperatura de la probeta.

Entre los métodos de ensayo disponibles para conocer el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo cargas que generan ahuellamiento, están el de la norma española NLT-173/84 y el Método con el equipamiento de Hamburgo (AASHTO T324-04).

La Wheel Tracking española implementada con un micrómetro tipo dial mide la deformación en el punto más bajo de la huella, dado la heterogeneidad de la mezcla asfáltica en la superficie se producen deformaciones no uniformes que inducen la medición en el punto más desfavorable o uno de los extremos de la huella. Esto no ocurre en el ensayo de Hamburgo dado que promedia cinco mediciones en puntos establecidos previamente en el perfil longitudinal de la huella.

7.2 Comportamiento de los distintos tipos de cementos asfálticos.

Según el análisis realizado en 6.4 se verifica que las mezclas confeccionadas con cementos asfálticos modificados con polímeros mejoran el comportamiento de la mezcla asfáltica al ahuellamiento independientemente del tipo de ensayo al cual sean sometidas, observándose una disminución en la velocidad de deformación de entre un 75% y un 81% en el intervalo 105-120 al ser ensayada en la Wheel Tracking en condición seca. Además se observa que para este tipo de mezcla las velocidades de deformación en el intervalo 105-120 minutos resultan menores que el valor de 15 $\mu\text{m}/\text{min}$. Por otra parte en el ensayo Húmedo el uso de CAMD permite que las probetas sean capaces de finalizar el ensayo, ya que para las probetas de CA24 las grandes deformaciones y el stripping hacen que el ensayo finalice tempranamente.

Al ensayar las probetas en la HWTD, el uso del ligante modificado con polímeros permite retardar el stripping, además de disminuir de forma considerable las deformaciones. En el caso de probetas compactadas por vibrado no se observa beneficio significativo de la incorporación de aditivo para la adherencia ya que la deformación final es inferior a los 20 mm permitidos, sólo en las probetas compactadas con el compactador giratorio se observa un deterioro mayor, sobrepasando los 20 mm de deformación.

La incorporación de aditivo promotor de adherencia en los cementos asfálticos permite disminuciones de la velocidad de deformación de entre un 31% y un 48% en el intervalo 105-120 en el ensayo en Aire de la Wheel Tracking, no obstante esta mejora no es suficiente para lograr que el CA24 cumpla con los 15 $\mu\text{m}/\text{min}$ como velocidad máxima de deformación.

En el caso del ensayo húmedo se obtiene que las mezclas con CA24 aditivadas con promotor de adherencia no muestran el comportamiento mejorado que si se observó en el ensayo de Hamburgo y también en el ensayo al Aire con la Wheel Tracking. Este comportamiento se debiera retribuir a anomalías del proceso de ensayo (anomalía en la temperatura de ensayo de las probetas).

De los ensayos de ahuellamiento realizados con mezclas asfálticas con cementos asfálticos aditivados se advierten ventajas comparativamente positivas en la incorporación de Kaoamin 12, ya que es un ensayo que pone a prueba la adherencia de los ligantes con el árido, en esta situación la incorporación del aditivo retarda la aparición de stripping y prolonga el estado plástico, no obstante lo que ocurre en el ensayo húmedo.

7.3 Efecto de los tipos de compactación.

Como se estudió en el punto 6.5, independiente del ensayo que se realice, las deformaciones que experimentan las probetas compactadas por el método vibratorio presentan menor deformación que las que se compactan con el compactador giratorio, no obstante no existir diferencias sistemáticas de las mezclas ensayadas.

El aumento de las deformaciones para las probetas confeccionadas en el compactador giratorio se presenta en cada uno de los ensayos en que se estudió su desempeño, y se puede notar en un incremento de la deformación muy elevado en la etapa de consolidación (primeros 30 minutos) a comparación del que se obtiene al ensayar las probetas compactadas por vibrado

Es muy importante hacer diferencias en cuanto al tipo de compactación dado que influye en los resultados, pudiendo aprobar una mezcla al ser compactada por vibrado siendo que si se confecciona en el compactador giratorio no aprobaría.

Se puede notar en el HWTD que para ambos métodos de compactación las pendientes de descubrimiento (pendiente de deformación que se genera tras el “stripping”) son muy similares (Figuras 87, 88, 89, 90), siendo un comportamiento propio de la mezcla y no del tipo de compactación, por lo cual la compactación afecta sólo en la etapa de consolidación. Para un ensayo corto como es la Wheel Tracking, las velocidades de deformación que se obtienen son en una etapa en que no hay total acomodo del agregado en las probetas confeccionadas con el compactador giratorio, por lo que las velocidades de deformación obtenidas son mayores con el método de compactación giratoria que con el método de compactación vibratorio.

7.4 Ensayos en medio Húmedo.

La máquina de Hamburgo permite estudiar de forma confiable el comportamiento de mezclas asfálticas en condiciones húmedas, los principales factores que permiten su eficacia son la disminución de las desviaciones de las lecturas, tomando cinco lecturas a la profundidad de la huella en puntos predeterminados y promediándolas, la realización del ensayo de forma totalmente autónoma luego de la fijación de las probetas (mide, acondiciona e inicia el ensayo en el tiempo programado) y que hay tiempo para hacer desaparecer posibles errores debido a que el ensayo dura más de seis horas.

Por el comportamiento de las probetas y el nivel de vapor de agua presente en la cámara termostática en el ensayo con probetas Saturadas Superficialmente Secas (6.1), se puede deducir que a la temperatura de 60 °C el agua que saturaba los huecos de la mezcla se evapora en una importante fracción a las 2 horas de ensayo, por lo que llevar el ensayo a las 6 horas para asemejar al ensayo de Hamburgo sólo equivaldría a prolongar el ensayo estándar de Wheel Tracking.

El ensayo Húmedo que incorpora una esponja saturada entre la huella y la rueda permite un comportamiento desfavorable para las mezclas (6.3), aunque la presencia de la esponja reduce este efecto (6.2). El ensayo Húmedo descrito en 4.4.2 logra que las probetas de CA24 lleguen a desarrollar el stripping, pero sólo se puede estudiar durante un tiempo muy corto en el que probablemente no se ha desarrollado la pendiente de descubrimiento, ya que técnicamente es imposible medir deformaciones mayores de 13 mm en la Wheel Tracking.

El ensayo en medio Húmedo deja muchas variables en manos del operador, como la incorporación de agua para mantener saturada la esponja y la colocación de la probeta en una bolsa con la esponja, lo que hace que sus resultados sean muy dispersos, obteniendo, contrariamente a lo dispuesto por el ensayo en Aire de la Wheel Tracking y el HWTD, mayor deformación en el ensayo de probetas de CA24 con aditivo de adherencia que en las que carecen de aditivo.

7.5 Correlación del ensayo Húmedo con HWTD.

Al estudiar cada uno de los cementos asfálticos por separado, es posible encontrar regresiones con los resultados de las deformaciones en iguales tiempos de ensayo correspondientes a los métodos Wheel Tracking en ensayo húmedo y de Hamburgo (6.7), con buenas correlaciones para CA24, CA24K y CAMDK, pero no así con el CAMD sin aditivo.

De la Figura 99 se concluye que encontrar una relación general, que permita obtener las deformaciones que experimentaría la probeta en la máquina de Hamburgo a partir de sus deformaciones en el ensayo Húmedo independiente de la mezcla que se ensaye, no resulta posible dada las diferencias en las sollicitaciones de contacto rueda probeta y a diferencias en el método de compactación.

7.6 Comentarios y recomendaciones.

Al confeccionar probetas para ser ensayadas en la Wheel Tracking se debe tener especial cuidado en lograr una superficie regular, evitando saltos de la rueda en la probeta que pueden generar variaciones en los valores de deformación, recordando que las mediciones en la Wheel Tracking son en el punto más bajo de la probeta. Estos saltos se pueden evitar colocando una placa de metal entre la rueda y la probeta, que permita que la rueda no quede vulnerable a la aleatoriedad de áridos en la superficie.

Se sugiere hacer pruebas cambiando el perfil plano de la rueda a una rueda con cierta curvatura, lo que podría solucionar las anomalías dadas por la textura.

Se recomienda implementar un sistema automatizado para la Wheel Tracking, que pueda tomar lectura de deformaciones en las probetas al menos hasta los 20 mm de deformación y en cinco puntos preestablecidos de la huella, disminuyendo el error por singularidades de la mezcla y evitando el uso de personal.

La confección de probetas se debe realizar con personal experimentado, y siempre utilizando el mismo equipo de personas, con el fin de evitar la variabilidad que puede ocurrir en esta etapa del procedimiento.

Referencias

- [1]. AENOR 2008, UNE-EN 12697-22:2008+A1, Mezclas bituminosas, Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 22: ensayo de rodadura.
- [2]. AENOR 2008, UNE-EN 12697-31, Mezclas bituminosas, Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 31: Preparación de la muestra mediante compactador giratorio.
- [3]. ALLEN COOLEY L. JR., PRITHVI S. KANDHAL, M. SHANE BUCHANAN, FRANK FEE, AMY EPPS., Estados Unidos, Julio 2000, Loaded Wheel Testers In The United States: State Of The Practice. Transportation Research E Circular No. E-C016- July 2000.
- [4]. ANGELONE SILVIA, MARTÍNEZ FERNANDO, SANTAMARÍA ENRIQUE, GAVILÁN EMILIANO, CAUHAPÉ CASAUX MARIANA, Deformación Permanente de Mezclas Asfáltica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. [en línea] http://www.fceia.unr.edu.ar/secyt/rt/2006/rtid06_02.pdf
- [5]. AASHTO, Estados Unidos, Designation: T324-04, Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).
- [6]. CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS, España, Normas del Laboratorio de Transportes. NLT-173/84: Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio.
- [7]. GUZMÁN L., PABLO, 2006, Validación del ensayo de rueda de carga como herramienta de diseño de mezclas asfálticas en caliente. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Chile.
- [8]. INSTITUTO CHILENO DEL ASFALTO, Chile. [en línea] <http://www.ichasfalto.cl/>
- [9]. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, Chile, Marzo 2008, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción, Manual de carreteras, Volumen N° 5.
- [10]. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, Chile, Marzo 2008, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Manual de carreteras, Volumen N° 8.
- [11]. MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES, Chile, Estudios Transantiago, [en línea] http://www.mtt.gob.cl/prontus_mtt/estudios/siaut.html/
- [12]. OMADISA INDUSTRIAS DEL LABORATORIO S.A, Ficha Técnica Wheel Tracking, [en línea]

- http://www.omadisa.net/d0wnl01ds/Fichas_t%E9cnicas/34.394.00%20Wheel%20tracking.pdf
- [13]. QUEZADA P., L., 2004. Validación del Método de Ensayo de la Rueda de Carga para Mezclas Asfálticas de la Región Metropolitana, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Chile.
- [14]. RONDÓN Q. H., MORENO A. L., Colombia, 2010, Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante, [en línea]
<http://www.javeriana.edu.co/Facultades/ingenieria/revista/lyUVol14N2/5.HugoRondon.pdf>
- [15]. SILVA D., P., 2006, Mezclas asfálticas en caliente: deformación permanente en función del tipo y contenido de asfalto, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Chile.
- [16]. TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, Estados Unidos, Test Procedure for HAMBURG WHEEL-TRACKING TEST, [en línea]
ftp://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cst/TMS/200-F_series/pdfs/bit242.pdf
- [17]. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2003, Estados Unidos, Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer, [en línea]
http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_508.pdf
- [18]. TROXLER ELECTRONIC LABORATORIES, Compactador Giratorio Superpave™ de Troxler, [en línea]
http://www.troxlerlabs.com/downloads/pdfs/4140/4140_brochure_spanish.pdf
- [19]. U. S. DEPARTAMENT OF TRANSPORTATION, Estados Unidos, Equipment French (Laboratoire Central des Ponts et Chaussees) Pavement Rutting Tester, [en línea]
<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/labs/mixtures/frenchr.cfm>

Anexos.

A. Procedimiento de calibración de la presión generada por la rueda sobre la probeta en la máquina de rueda de carga.

A.1. El proceso de calibración se realiza a temperatura ambiente ($25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$).

A.2. Se debe colocar la balanza bajo la rueda y sobre el carro, dejando la superficie de la balanza a una altura similar a la de las probetas que se ensayarán.

A.3. Fijar una carga inicial para iterar (se recomienda 90 kgf para la primera iteración) y se obtiene en la rueda cambiando las masas que se utilizan como sobrecarga.

A.4. Poner uno de los moldes boca abajo sobre el carro y con papel milimetrado ajustado en su superficie con cinta adhesiva.

A.5. Tomar cuatro medidas de la huella de la rueda apoyada sin rodar (una cada 90°), para ello previamente se debe colocar tinta sobre la rueda, procurando que al menos cubra la zona de contacto con el papel milimetrado.

A.6. El procedimiento para determinar la medida de cada una de las cuatro áreas es el siguiente:

A.6.1. En la sección de la huella transversal al paso de la rueda se toma una medida en el centro, denotada como b .

A.6.2. En la sección de la huella, longitudinal al paso de la rueda se toman seis medidas a los 0, 1, 2, 3, 4 cm desde uno de los bordes y luego en el borde opuesto, denotando cada una de las medidas como a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 y a_6 respectivamente.

A.6.3. Espesor representativo de la huella

Se determinará el espesor representativo de la huella según:

$$a = \frac{a_1 + 2a_2 + 2a_3 + 2a_4 + 2a_5 + a_6}{10}$$

A.6.4. Área Representativa de la huella

Se determinará el área representativa de la huella según:

$$A = a * b$$

A.7. El área representativa de la rueda, a la carga que se realiza la toma de las huellas, es el promedio del área de las cuatro huellas que se deben tomar cada 90° de la rueda.

A.8. Si se cumple que la carga en la rueda (mostrada por la balanza) dividida por el área representativa, tomada con la misma carga, es $9 \pm 0,25 \text{ kgf/cm}^2$, la calibración finaliza.

A.9. Si no se cumple el punto A.8., se debe cambiar la carga de la rueda por la que resulta de multiplicar 9 kgf/cm^2 por el área representativa de la rueda que se determinó para el cálculo en el punto anterior y repetir procedimiento desde el punto A.3.

A continuación se presenta la hoja de calibración donde están las huellas tomadas a la rueda tras la última iteración y las correspondientes mediciones.

18/10/10

Calibración T° ambiente

$$a = \frac{a_1 + 2a_2 + 2a_3 + 2a_4 + 2a_5 + a_6}{10}$$

Nota:

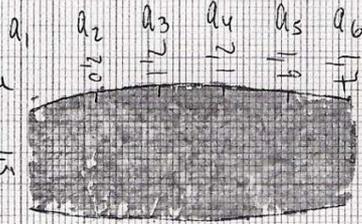
Se Determinó el área de la Rueda a T° de 25°C y con un peso total en la Rueda de 93,6 kgf

Por lo tanto fué presión y rueda.

$$P = \frac{F}{A}$$

$$= \frac{93,6}{10,5 \text{ cm}^2}$$

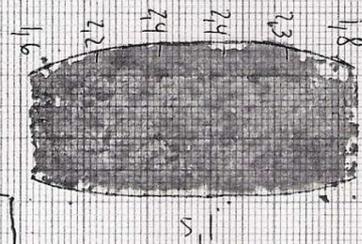
$$P = 8,91 \text{ kgf/cm}^2$$



$$a = 1,94 \text{ cm}$$

$$b = 5,1 \text{ cm}$$

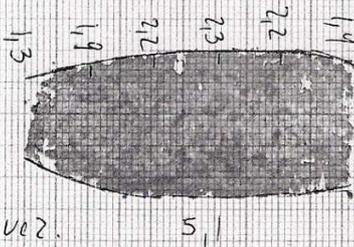
$$A = 9,90 \text{ cm}^2$$



$$a = 2,2 \text{ cm}$$

$$b = 5,1 \text{ cm}$$

$$A = 11,22 \text{ cm}^2$$



$$a = 2,04 \text{ cm}$$

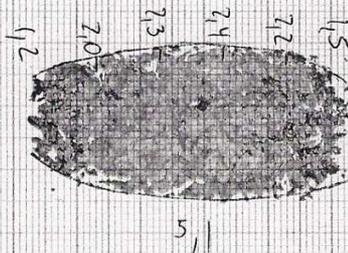
$$b = 5,1 \text{ cm}$$

$$A = 10,40 \text{ cm}^2$$

Nota: Sobre molde al Buzo.

Pesos Sobrecarga. N° 1, 2, 5, 7.

$$\Sigma mu = 20.646,6 \text{ gra.}$$



$$a = 2,05 \text{ cm}$$

$$b = 5,1 \text{ cm}$$

$$A = 10,46 \text{ cm}^2$$

$$A = 10,50 \text{ cm}^2$$

B. Resultados de Ensayos.

(*) Probeta de CA24 o CA24K que no se considera en el promedio por no terminar el ensayo debido a problemas de contacto entre el tornillo y el micrómetro o cuya curva de deformación versus tiempo posee la mayor distancia a la curva promedio entre las tres que se ensayan.

B.1. Ensayos en Aire.

B.1.1. Compactación Vibratoria.

Densidad Marshall Kg/m ³ : 2389	CA24-V-A				CA24K-V-A			
Etiqueta	1 *	2	3	Promedio	1 *	2	3	Promedio
Fecha Ensayo	11-mar	11-mar	11-mar		14-mar	14-mar	14-mar	
% Asfalto	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Densidad	2387	2434	2444	2439	2393	2425	2439	2432
% Densidad Marshall	100	102	102	102	100	102	102	102
Temperatura Ensayo [° C]	60	60	60	60	60	60	60	60
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio
1	1,73	1,16	1,61	1,39	1,00	1,81	0,62	1,22
3	2,02	1,36	1,88	1,62	1,25	2,02	0,84	1,43
5	2,20	1,48	2,10	1,79	1,51	2,13	0,96	1,55
10	2,53	1,69	2,39	2,04	1,94	2,33	1,19	1,76
15	2,79	1,86	2,65	2,26	2,23	2,49	1,36	1,93
20	3,08	2,04	2,88	2,46	2,51	2,65	1,50	2,08
25	3,35	2,21	3,10	2,66	2,78	2,77	1,63	2,20
30	3,63	2,40	3,30	2,85	3,02	2,87	1,75	2,31
35	3,94	2,61	3,50	3,06	3,24	2,98	1,88	2,43
40	4,25	2,82	3,72	3,27	3,45	3,07	2,02	2,55
45	4,67	3,02	3,92	3,47	3,68	3,16	2,16	2,66
60	6,15	3,60	4,44	4,02	4,20	3,39	2,57	2,98
75	7,94	4,14	4,84	4,49	4,94	3,79	2,98	3,39
90	10,42	4,78	5,16	4,97	5,68	4,37	3,39	3,88
105	12,92	5,60	5,48	5,54	6,47	4,86	3,72	4,29
120	14,20	6,36	6,11	6,24	7,47	5,31	3,99	4,65
DEFORMACION [mm]								
Deformación 30 - 45	1,04	0,62	0,62	0,62	0,66	0,29	0,41	0,35
Deformación 75 - 90	2,48	0,64	0,32	0,48	0,74	0,58	0,41	0,49
Deformación 105 - 120	1,28	0,76	0,63	0,70	1,00	0,45	0,27	0,36
VEL. DEFORMACION [µm/min]								
Velocidad Deformación 30 - 45	69,3	41,3	41,3	41,3	44,0	19,3	27,3	23,3
Velocidad Deformación 75 - 90	165,3	42,7	21,3	32,0	49,3	38,7	27,3	32,7
Velocidad Deformación 105 - 120	85,3	50,7	42,0	46,7	66,7	30,0	18,0	24,0
EST. DINAM. [pasadas/mm]								
Estabilidad Dinámica 30 - 45	606	1016	1016	1016	955	2172	1537	1800
Estabilidad Dinámica 75 - 90	254	984	1969	1313	851	1086	1537	1286
Estabilidad Dinámica 105 - 120	492	829	1000	900	630	1400	2333	1750

Densidad Marshall Kg/m ³ : 2389	CAMD-V-A				CAMDK-V-A			
Etiqueta	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
Fecha Ensayo	20-ene	20-ene	20-ene		28-ene	28-ene	31-ene	
% Asfalto	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Densidad	2382	2364	2397	2381	2374	2403	2432	2403
% Densidad Marshall	100	99	100	100	99	101	102	101
Temperatura Ensayo [° C]	60	60	60	60	60	60	60	60
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio
1	1,20	1,65	1,84	1,56	1,34	0,10	1,48	0,97
3	1,35	1,88	1,99	1,74	1,50	0,22	1,62	1,11
5	1,43	2,02	2,07	1,84	1,59	0,28	1,69	1,19
10	1,56	2,26	2,16	1,99	1,74	0,39	1,78	1,30
15	1,68	2,43	2,22	2,11	1,84	0,46	1,85	1,38
20	1,78	2,58	2,29	2,22	1,93	0,53	1,89	1,45
25	1,87	2,69	2,35	2,30	2,00	0,59	1,94	1,51
30	1,97	2,80	2,45	2,41	2,07	0,66	1,98	1,57
35	2,01	2,90	2,50	2,47	2,13	0,73	2,02	1,63
40	2,09	3,00	2,55	2,55	2,19	0,79	2,07	1,68
45	2,13	3,10	2,59	2,61	2,25	0,86	2,11	1,74
60	2,29	3,34	2,76	2,80	2,39	1,03	2,22	1,88
75	2,42	3,54	2,92	2,96	2,53	1,18	2,32	2,01
90	2,57	3,73	3,06	3,12	2,64	1,31	2,39	2,11
105	2,71	3,89	3,20	3,27	2,75	1,43	2,45	2,21
120	2,85	4,02	3,32	3,40	2,85	1,54	2,52	2,30
DEFORMACION								
[mm]								
Deformación 30 - 45	0,16	0,30	0,14	0,20	0,18	0,20	0,13	0,17
Deformación 75 - 90	0,15	0,19	0,14	0,16	0,11	0,13	0,07	0,10
Deformación 105 - 120	0,14	0,13	0,12	0,13	0,10	0,11	0,07	0,09
VEL. DEFORMACION								
[µm/min]								
Velocidad Deformación 30 - 45	10,7	20,0	9,3	13,3	12,0	13,3	8,7	11,3
Velocidad Deformación 75 - 90	10,0	12,7	9,3	10,7	7,3	8,7	4,7	6,7
Velocidad Deformación 105 - 120	9,3	8,7	8,0	8,7	6,7	7,3	4,7	6,0
EST. DINAM.								
[pasadas/mm]								
Estabilidad Dinámica 30 - 45	3938	2100	4500	3150	3500	3150	4846	3706
Estabilidad Dinámica 75 - 90	4200	3316	4500	3938	5727	4846	9000	6300
Estabilidad Dinámica 105 - 120	4500	4846	5250	4846	6300	5727	9000	7000

Densidad Marshall Kg/m ³ : 2389	CAMD-V-SSS				CAMD-V-ES			
Etiqueta	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
Fecha Ensayo	04-feb	04-feb	04-feb		19-ene	19-ene	19-ene	
% Asfalto	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Densidad	2370	2392	2416	2393	2399	2380	2387	2389
% Densidad Marshall	99	100	101	100	100	100	100	100
Temperatura Ensayo [° C]	60	60	60	60	60	60	60	60
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio
1	1,38	1,94	1,17	1,50	1,96	0,35	1,25	1,19
3	1,50	2,04	1,28	1,61	2,09	0,44	1,37	1,30
5	1,57	2,10	1,34	1,67	2,16	0,48	1,43	1,36
10	1,65	2,17	1,44	1,75	2,30	0,58	1,46	1,45
15	1,70	2,22	1,52	1,81	2,38	0,68	1,52	1,53
20	1,78	2,25	1,58	1,87	2,41	0,79	1,58	1,59
25	1,82	2,29	1,62	1,91	2,45	0,88	1,64	1,66
30	1,86	2,33	1,67	1,95	2,48	0,95	1,68	1,70
35	1,91	2,36	1,70	1,99	2,51	1,02	1,72	1,75
40	1,95	2,39	1,74	2,03	2,53	1,09	1,76	1,79
45	2,06	2,43	1,77	2,09	2,55	1,15	1,80	1,83
60	2,15	2,54	1,88	2,19	2,60	1,31	1,89	1,93
75	2,30	2,66	1,95	2,30	2,66	1,48	1,98	2,04
90	2,48	2,79	2,05	2,44	2,70	1,64	2,07	2,14
105	2,63	2,94	2,13	2,57	2,75	1,79	2,15	2,23
120	2,80	3,08	2,20	2,69	2,79	1,92	2,25	2,32
DEFORMACION								
[mm]								
Deformación 30 - 45	0,20	0,10	0,10	0,14	0,07	0,20	0,12	0,13
Deformación 75 - 90	0,18	0,13	0,10	0,14	0,04	0,16	0,09	0,10
Deformación 105 - 120	0,17	0,14	0,07	0,12	0,04	0,13	0,10	0,09
VEL. DEFORMACION								
[µm/min]								
Velocidad Deformación 30 - 45	13,3	6,7	6,7	9,3	4,7	13,3	8,0	8,7
Velocidad Deformación 75 - 90	12,0	8,7	6,7	9,3	2,7	10,7	6,0	6,7
Velocidad Deformación 105 - 120	11,3	9,3	4,7	8,0	2,7	8,7	6,7	6,0
EST. DINAM.								
[pasadas/mm]								
Estabilidad Dinámica 30 - 45	3150	6300	6300	4500	9000	3150	5250	4846
Estabilidad Dinámica 75 - 90	3500	4846	6300	4500	15750	3938	7000	6300
Estabilidad Dinámica 105 - 120	3706	4500	9000	5250	15750	4846	6300	7000

B.1.2. Compactación con Compactador Giratorio.

Densidad Marshall Kg/m ³ : 2389	CA24-G-A				CA24K-G-A			
Etiqueta	1 *	2	3	Promedio	1	2	3 *	Promedio
Fecha Ensayo	30-may	30-may	30-may		30-may	31-may	31-may	
% Asfalto	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Densidad	2372	2413	2365	2389	2372	2374	2391	2373
% Densidad Marshall	99	101	99	100	99	99	100	99
Temperatura Ensayo [° C]	60	60	60	60	60	60	60	60
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio
1	1,78	2,11	3,33	2,72	1,00	1,34	1,25	1,17
3	2,85	3,65	4,38	4,02	1,43	2,82	2,71	2,13
5	3,92	4,73	5,11	4,92	2,19	3,71	3,90	2,95
10	5,50	6,26	6,07	6,17	3,50	5,00	5,73	4,25
15	6,56	7,17	6,75	6,96	4,38	5,84	7,08	5,11
20	7,26	7,79	7,29	7,54	5,14	6,43	8,67	5,79
25	7,88	8,31	7,81	8,06	5,69	6,90	9,87	6,30
30	8,33	8,79	8,32	8,56	6,23	7,33	10,32	6,78
35	8,75	9,22	8,73	8,98	6,67	7,69	10,89	7,18
40	9,09	9,63	9,18	9,41	7,19	7,97	11,33	7,58
45		10,02	9,67	9,85	7,61	8,21	11,80	7,91
60		11,20	10,93	11,07	8,52	9,30		8,91
75		12,19	11,54	11,87	9,29	10,10		9,70
90		12,83	12,15	12,49	9,94	11,01		10,48
105					10,69	11,54		11,12
120					11,37	12,05		11,71
DEFORMACION								
[mm]								
Deformación 30 - 45		1,23	1,35	1,29	1,38	0,88	1,48	1,13
Deformación 75 - 90		0,64	0,61	0,62	0,65	0,91		0,78
Deformación 105 - 120					0,68	0,51		0,59
VEL. DEFORMACION								
[µm/min]								
Velocidad Deformación 30 - 45		82,0	90,0	86,0	92,0	58,7	98,7	75,3
Velocidad Deformación 75 - 90		42,7	40,7	41,3	43,3	60,7		52,0
Velocidad Deformación 105 - 120					45,3	34,0		39,3
EST. DINAM.								
[pasadas/mm]								
Estabilidad Dinámica 30 - 45		512	467	488	457	716	426	558
Estabilidad Dinámica 75 - 90		984	1033	1016	969	692		808
Estabilidad Dinámica 105 - 120					926	1235		1068

Densidad Marshall Kg/m3: 2389	CAMD-G-A				CAMDK-G-A			
Etiqueta	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
Fecha Ensayo	31-may	01-jun	21-jun		01-jun	01-jun	21-jun	
% Asfalto	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Densidad	2413	2370	2401	2395	2375	2364	2412	2384
% Densidad Marshall	101	99	101	100	99	99	101	100
Temperatura Ensayo [° C]	60	60	60	60	60	60	60	60
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio
1	0,72	2,32	0,32	1,12	1,30	0,81	0,61	0,91
3	1,08	2,75	0,55	1,46	1,80	1,41	1,01	1,41
5	1,29	3,02	0,71	1,67	2,09	1,74	1,23	1,69
10	1,67	3,44	0,95	2,02	2,58	2,26	1,59	2,14
15	1,96	4,07	1,13	2,39	2,98	2,61	1,90	2,50
20	2,25	4,67	1,29	2,74	3,31	2,92	2,20	2,81
25	2,47	5,27	1,45	3,06	3,61	3,20	2,42	3,08
30	2,65	5,78	1,62	3,35	3,85	3,48	2,65	3,33
35	2,85	6,19	1,80	3,61	4,05	3,75	2,87	3,56
40	3,11	6,53	1,97	3,87	4,25	4,00	3,01	3,75
45	3,43	6,94	2,11	4,16	4,44	4,16	3,15	3,92
60	4,22	7,90	2,56	4,89	4,89	4,59	3,51	4,33
75	4,79	8,68	2,86	5,44	5,22	4,90	3,79	4,64
90	5,17	9,31	3,12	5,87	5,51	5,17	4,01	4,90
105	5,52	9,65	3,47	6,21	5,77	5,35	4,22	5,11
120	5,79	10,00	3,69	6,49	5,97	5,53	4,39	5,30
DEFORMACION								
[mm]								
Deformación 30 - 45	0,78	1,16	0,49	0,81	0,59	0,68	0,50	0,59
Deformación 75 - 90	0,38	0,63	0,26	0,43	0,29	0,27	0,22	0,26
Deformación 105 - 120	0,27	0,35	0,22	0,28	0,20	0,18	0,17	0,19
VEL. DEFORMACION								
[µm/min]								
Velocidad Deformación 30 - 45	52,0	77,3	32,7	54,0	39,3	45,3	33,3	39,3
Velocidad Deformación 75 - 90	25,3	42,0	17,3	28,7	19,3	18,0	14,7	17,3
Velocidad Deformación 105 - 120	18,0	23,3	14,7	18,7	13,3	12,0	11,3	12,7
EST. DINAM.								
[pasadas/mm]								
Estabilidad Dinámica 30 - 45	808	543	1286	778	1068	926	1260	1068
Estabilidad Dinámica 75 - 90	1658	1000	2423	1465	2172	2333	2864	2423
Estabilidad Dinámica 105 - 120	2333	1800	2864	2250	3150	3500	3706	3316

B.2. Ensayos en Medio Húmedo.

B.2.1. Compactación Vibratoria.

Densidad Marshall Kg/m ³ : 2389	CA24-V-Hu				CA24K-V-Hu			
Etiqueta	1	2 *	3	Promedio	1 *	2	3	Promedio
Fecha Ensayo	25-mar	26-mar	29-mar		28-mar	31-mar	01-abr	
% Asfalto	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Densidad	2448	2412	2413	2431	2414	2435	2400	2418
% Densidad Marshall	102	101	101	102	101	102	100	101
Temperatura Ensayo [° C]	60	60	60	60	60	60	60	60
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio
1	0,64	0,61	1,23	0,94	0,58	1,00	0,87	0,94
3	0,86	1,40	1,52	1,19	1,02	1,20	1,41	1,31
5	1,05	1,96	1,78	1,42	1,44	1,27	1,89	1,58
10	1,63	3,15	2,45	2,04	2,54	1,87	2,74	2,31
15	2,35	5,62	2,93	2,64	3,62	2,72	3,40	3,06
20	2,98	6,48	3,27	3,13	4,51	3,51	3,98	3,75
25	3,47	7,12	3,56	3,52	5,26	4,07	4,41	4,24
30	3,95	7,71	3,82	3,89	5,93	4,50	4,71	4,61
35	4,38	8,25	4,04	4,21	6,42	4,82	5,01	4,92
40	4,75	8,73	4,26	4,51	6,84	5,19	5,37	5,28
45	5,05	9,02	4,48	4,77	7,20	5,48	5,81	5,65
60	5,77	10,86	5,09	5,43	7,98	6,23	6,44	6,34
75	6,45	12,30	5,66	6,06		6,92	7,01	6,97
90	6,96	13,19	6,18	6,57		7,61	7,54	7,58
105	7,33		6,82	7,08		8,14	8,10	8,12
120	7,72		7,38	7,55		8,53	8,75	8,64
135	8,21		7,81	8,01		8,92	9,47	9,20
150	8,65		8,31	8,48		9,25	10,26	9,76
165	9,06		8,85	8,96		9,46	11,43	10,45
180	9,51		9,45	9,48		9,85	12,76	11,31
195	10,05		9,98	10,02		10,20	14,09	12,15
210	10,60		10,72	10,66		10,75	15,42	13,09
225	11,13		11,67	11,40				
240	11,67		12,55	12,11				
255								
270								
285								
300								
315								
330								
345								
360								
DEFORMACION								
[mm]								
Deformación 30 - 45	1,10	1,31	0,66	0,88	1,27	0,98	1,10	1,04
Deformación 75 - 90	0,51	0,89	0,52	0,51		0,69	0,53	0,61
Deformación 105 - 120	0,39		0,56	0,47		0,39	0,65	0,52
VEL. DEFORMACION								
[µm/min]								
Velocidad Deformación 30 - 45	73,3	87,3	44,0	58,7	84,7	65,3	73,3	69,3
Velocidad Deformación 75 - 90	34,0	59,3	34,7	34,0		46,0	35,3	40,7
Velocidad Deformación 105 - 120	26,0		37,3	31,3		26,0	43,3	34,7
EST. DINAM.								
[pasadas/mm]								
Estabilidad Dinámica 30 - 45	573	481	955	716	496	643	573	606
Estabilidad Dinámica 75 - 90	1235	708	1212	1235		913	1189	1033
Estabilidad Dinámica 105 - 120	1615		1125	1340		1615	969	1212

Densidad Marshall Kg/m3: 2389	CAMD-V-Hu			CAMDK-V-Hu			
Etiqueta	1	2	Promedio	1	2	3	Promedio
Fecha Ensayo	22-mar	23-mar		17-mar	18-mar	21-mar	
% Asfalto	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Densidad	2409	2365	2387	2420	2423	2385	2409
% Densidad Marshall	101	99	100	101	101	100	101
Temperatura Ensayo [° C]	60	60	60	60	60	60	60
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Lectura	Promedio
1	0,48	0,23	0,36	0,66	0,37	0,59	0,54
3	0,68	0,40	0,54	0,82	0,50	0,73	0,68
5	0,80	0,51	0,66	0,90	0,60	0,83	0,78
10	1,07	0,72	0,90	1,00	0,79	1,03	0,94
15	1,34	0,95	1,15	1,07	0,98	1,20	1,08
20	1,65	1,23	1,44	1,13	1,18	1,37	1,23
25	2,00	1,58	1,79	1,19	1,41	1,61	1,40
30	2,56	2,29	2,43	1,25	1,67	1,92	1,61
35	3,05	3,01	3,03	1,33	1,92	2,24	1,83
40	3,49	3,63	3,56	1,41	2,14	2,50	2,02
45	3,83	4,15	3,99	1,52	2,29	2,69	2,17
60	4,47	5,00	4,74	1,99	2,65	3,14	2,59
75	4,97	5,50	5,24	2,44	2,99	3,50	2,98
90	5,40	5,92	5,66	2,77	3,27	3,88	3,31
105	5,79	6,30	6,05	3,01	3,44	4,14	3,53
120	6,13	6,50	6,32	3,20	3,62	4,37	3,73
135	6,37	6,92	6,65	3,33	3,72	4,60	3,88
150	6,59	7,20	6,90	3,46	3,86	4,80	4,04
165	6,86	7,48	7,17	3,57	4,02	4,99	4,19
180	7,09	7,54	7,32	3,66	4,15	5,13	4,31
195	7,30	7,73	7,52	3,73	4,18	5,28	4,40
210	7,51	7,73	7,62	3,81	4,27	5,35	4,48
225	7,69	7,73	7,71	3,90	4,36	5,48	4,58
240	7,88	7,73	7,81	3,97	4,42	5,60	4,66
255	8,02	7,93	7,98	4,03	4,50	5,70	4,74
270	8,15	8,15	8,15	4,06	4,55	5,79	4,80
285	8,26	8,20	8,23	4,09	4,61	5,86	4,85
300	8,38	8,26	8,32	4,12	4,64	5,93	4,90
315	8,47	8,45	8,46	4,15	4,69	6,04	4,96
330	8,61	8,56	8,59	4,18	4,74	6,10	5,01
345	8,73	8,64	8,69	4,25	4,80	6,16	5,07
360	8,92	8,75	8,84	4,27	4,90	6,23	5,13
DEFORMACION							
[mm]							
Deformación 30 - 45	1,27	1,86	1,56	0,27	0,62	0,77	0,56
Deformación 75 - 90	0,43	0,42	0,42	0,33	0,28	0,38	0,33
Deformación 105 - 120	0,34	0,20	0,27	0,19	0,18	0,23	0,20
VEL. DEFORMACION							
[µm/min]							
Velocidad Deformación 30 - 45	84,7	124,0	104,0	18,0	41,3	51,3	37,3
Velocidad Deformación 75 - 90	28,7	28,0	28,0	22,0	18,7	25,3	22,0
Velocidad Deformación 105 - 120	22,7	13,3	18,0	12,7	12,0	15,3	13,3
EST. DINAM.							
[pasadas/mm]							
Estabilidad Dinámica 30 - 45	496	339	404	2333	1016	818	1125
Estabilidad Dinámica 75 - 90	1465	1500	1500	1909	2250	1658	1909
Estabilidad Dinámica 105 - 120	1853	3150	2333	3316	3500	2739	3150

B.3. Ensayos en HWTD.

B.3.1. Compactación Vibratoria.

Densidad Marshall Kg/m ³ : 2389	CA24-V-Ha			CA24K-V-Ha		
Probeta N°	1	2	Promedio	1	2	Promedio
Fecha Ensayo	04-abr	04-abr		05-abr	05-abr	
% Asfalto	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Densidad	2427	2428	2428	2421	2421	2421
% Densidad Marshall	102	102	102	101	101	101
Temperatura Ensayo [° C]	60	60	60	60	60	60
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Promedio
1	0,45	0,41	0,43	0,48	0,44	0,46
3	0,77	0,70	0,74	0,83	0,76	0,80
5	0,96	0,88	0,92	1,11	0,97	1,04
10	1,33	1,18	1,26	1,74	1,30	1,52
15	1,63	1,40	1,52	2,06	1,51	1,79
20	1,88	1,58	1,73	2,25	1,65	1,95
25	2,10	1,75	1,93	2,41	1,79	2,10
30	2,28	1,88	2,08	2,56	1,88	2,22
35	2,45	2,02	2,24	2,69	1,99	2,34
40	2,61	2,13	2,37	2,81	2,06	2,44
45	2,74	2,24	2,49	2,92	2,14	2,53
60	3,15	2,51	2,83	3,24	2,30	2,77
75	3,59	2,74	3,17	3,48	2,48	2,98
90	4,24	2,99	3,62	3,65	2,66	3,16
105	5,27	3,28	4,28	3,82	2,82	3,32
120	6,94	3,56	5,25	3,99	2,99	3,49
135	10,48	3,87	7,18	4,17	3,18	3,68
150	14,03	4,28	9,16	4,35	3,38	3,87
165	17,22	4,94	11,08	4,54	3,62	4,08
180	20,34	6,08	13,21	4,74	3,89	4,32
195	23,46	7,98	15,72	4,98	4,23	4,61
210	26,58	10,37	18,48	5,31	4,71	5,01
225	29,70	13,45	21,58	5,83	5,48	5,66
240	32,82	18,16	25,49	6,32	6,33	6,33
255		24,37		7,11	7,85	7,48
270				8,05	8,89	8,47
285				9,30	10,27	9,79
300				11,22	12,39	11,81
315				13,43	14,82	14,13
330				15,19	16,77	15,98
345				17,18	18,97	18,08
360				19,40	21,42	20,41
375				21,70	23,96	22,83
DEFORMACION [mm]						
Deformación 30 - 45	0,46	0,36	0,41	0,36	0,26	0,31
Deformación 75 - 90	0,65	0,25	0,45	0,17	0,18	0,18
Deformación 105 - 120	1,67	0,28	0,97	0,17	0,17	0,17
VEL. DEFORMACION [µm/min]						
Velocidad Deformación 30 - 45	30,7	24,0	27,3	24,0	17,3	20,7
Velocidad Deformación 75 - 90	43,3	16,7	30,0	11,3	12,0	12,0
Velocidad Deformación 105 - 120	111,3	18,7	64,7	11,3	11,3	11,3
EST. DINAM. [pasadas/mm]						
Estabilidad Dinámica 30 - 45	1370	1750	1537	1750	2423	2032
Estabilidad Dinámica 75 - 90	969	2520	1400	3706	3500	3500
Estabilidad Dinámica 105 - 120	377	2250	649	3706	3706	3706

Densidad Marshall Kg/m ³ : 2389	CAMD-V-Ha			CAMDK-V-Ha		
Probeta Nº	1	2	Promedio	1	2	Promedio
Fecha Ensayo	06-abr	06-abr		07-abr	07-abr	
% Asfalto	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Densidad	2408	2390	2399	2411	2421	2416
% Densidad Marshall	101	100	100	101	101	101
Temperatura Ensayo [° C]	50	50	50	50	50	50
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Promedio
1	0,32	0,39	0,36	0,28	0,27	0,28
3	0,54	0,68	0,61	0,45	0,42	0,44
5	0,70	0,86	0,78	0,55	0,51	0,53
10	0,96	1,15	1,06	0,69	0,65	0,67
15	1,14	1,33	1,24	0,80	0,74	0,77
20	1,29	1,49	1,39	0,88	0,82	0,85
25	1,40	1,61	1,51	0,93	0,89	0,91
30	1,49	1,71	1,60	1,00	0,95	0,98
35	1,57	1,81	1,69	1,02	1,00	1,01
40	1,66	1,90	1,78	1,09	1,06	1,08
45	1,74	1,99	1,87	1,11	1,12	1,12
60	1,95	2,19	2,07	1,22	1,25	1,24
75	2,12	2,38	2,25	1,30	1,39	1,35
90	2,29	2,55	2,42	1,38	1,52	1,45
105	2,43	2,72	2,58	1,43	1,62	1,53
120	2,55	2,88	2,72	1,48	1,71	1,60
135	2,68	3,07	2,88	1,54	1,80	1,67
150	2,81	3,28	3,05	1,57	1,87	1,72
165	2,93	3,59	3,26	1,65	1,94	1,80
180	3,03	3,96	3,50	1,66	2,00	1,83
195	3,16	4,48	3,82	1,75	2,08	1,92
210	3,27	5,24	4,26	1,78	2,15	1,97
225	3,40	6,86	5,13	1,83	2,21	2,02
240	3,54	8,51	6,03	1,87	2,29	2,08
255	3,70	10,25	6,98	1,90	2,37	2,14
270	3,94	11,67	7,81	1,95	2,46	2,21
285	4,24	12,69	8,47	1,98	2,54	2,26
300	4,67	14,15	9,41	2,06	2,67	2,37
315	4,97	15,06	10,02	2,16	2,83	2,50
330	5,63	16,47	11,05	2,23	2,99	2,61
345	6,31	17,70	12,01	2,32	3,18	2,75
360	6,86	18,99	12,93	2,38	3,51	2,95
375	7,55	20,65	14,10	2,47	4,20	3,34
DEFORMACION						
[mm]						
Deformación 30 - 45	0,25	0,28	0,27	0,11	0,17	0,14
Deformación 75 - 90	0,17	0,17	0,17	0,08	0,13	0,10
Deformación 105 - 120	0,12	0,16	0,14	0,05	0,09	0,07
VEL. DEFORMACION						
[µm/min]						
Velocidad Deformación 30 - 45	16,7	18,7	18,0	7,3	11,3	9,3
Velocidad Deformación 75 - 90	11,3	11,3	11,3	5,3	8,7	6,7
Velocidad Deformación 105 - 120	8,0	10,7	9,3	3,3	6,0	4,7
EST. DINAM.						
[pasadas/mm]						
Estabilidad Dinámica 30 - 45	2520	2250	2333	5727	3706	4500
Estabilidad Dinámica 75 - 90	3706	3706	3706	7875	4846	6300
Estabilidad Dinámica 105 - 120	5250	3938	4500	12600	7000	9000

B.3.2. Compactación con Compactador Giratorio.

Densidad Marshall Kg/m3: 2389	CA24-G-Ha			CA24K-G-Ha		
Probeta N°	1	2	Promedio	1	2	Promedio
Fecha Ensayo	05-may	05-may		06-may	06-may	
% Asfalto	5,2	5,2		5,2	5,2	
Densidad	2385	2380	2383	2381	2396	2389
% Densidad Marshall	100	100	100	100	100	100
Temperatura Ensayo [° C]	50	50	50	50	50	50
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Promedio
1	1,01	1,29	1,15	0,97	0,86	0,92
3	1,92	2,27	2,10	1,74	1,52	1,63
5	2,51	2,92	2,72	2,16	1,98	2,07
10	3,38	3,82	3,60	2,88	2,69	2,79
15	3,81	4,25	4,03	3,36	3,16	3,26
20	4,20	4,67	4,44	3,70	3,48	3,59
25	4,52	5,05	4,79	4,02	3,73	3,88
30	4,78	5,37	5,08	4,31	3,96	4,14
35	4,98	5,57	5,28	4,52	4,15	4,34
40	5,34	5,91	5,63	4,73	4,30	4,52
45	5,50	6,07	5,79	4,89	4,46	4,68
60	6,11	6,77	6,44	5,33	4,83	5,08
75	6,55	7,31	6,93	5,75	5,24	5,50
90	6,91	7,78	7,35	6,12	5,68	5,90
105	7,45	8,49	7,97	6,50	6,14	6,32
120	7,90	9,21	8,56	6,79	6,59	6,69
135	8,54	10,19	9,37	7,09	7,07	7,08
150	9,24	11,63	10,44	7,37	7,58	7,48
165	9,96	13,39	11,68	7,79	8,06	7,93
180	11,08	15,86	13,47	8,31	8,61	8,46
195	12,72	17,70	15,21	8,94	9,27	9,11
210	15,11	19,60	17,36	9,64	10,13	9,89
225	18,30	21,97	20,14	10,97	11,25	11,11
240				12,40	12,93	12,67
255				14,24	14,56	14,40
270				15,77	16,10	15,94
285				17,18	17,61	17,40
300				18,88	19,21	19,05
315				20,42	20,88	20,65
330						
345						
360						
375						
DEFORMACION						
[mm]						
Deformación 30 - 45	0,72	0,70	0,71	0,58	0,50	0,54
Deformación 75 - 90	0,36	0,47	0,42	0,37	0,44	0,40
Deformación 105 - 120	0,45	0,72	0,59	0,29	0,45	0,37
VEL. DEFORMACION						
[µm/min]						
Velocidad Deformación 30 - 45	48,0	46,7	47,3	38,7	33,3	36,0
Velocidad Deformación 75 - 90	24,0	31,3	28,0	24,7	29,3	26,7
Velocidad Deformación 105 - 120	30,0	48,0	39,3	19,3	30,0	24,7
EST. DINAM.						
[pasadas/mm]						
Estabilidad Dinámica 30 - 45	875	900	887	1086	1260	1167
Estabilidad Dinámica 75 - 90	1750	1340	1500	1703	1432	1575
Estabilidad Dinámica 105 - 120	1400	875	1068	2172	1400	1703

Densidad Marshall Kg/m ³ : 2389	CAMD-G-Ha			CAMDK-G-Ha		
Probeta Nº	1	2	Promedio	1	2	Promedio
Fecha Ensayo	09-may	09-may		10-may	10-may	
% Asfalto	5,2	5,2		5,2	5,2	
Densidad	2394	2384	2389	2382	2393	2388
% Densidad Marshall	100	100	100	100	100	100
Temperatura Ensayo [° C]	50	50	50	50	50	50
Tiempo [minutos]	Lectura	Lectura	Promedio	Lectura	Lectura	Promedio
1	0,81	0,88	0,85	0,62	0,70	0,66
3	1,34	1,48	1,41	1,02	1,18	1,10
5	1,68	1,84	1,76	1,27	1,46	1,37
10	2,26	2,48	2,37	1,72	1,97	1,85
15	2,65	2,91	2,78	2,03	2,29	2,16
20	3,00	3,30	3,15	2,32	2,58	2,45
25	3,28	3,60	3,44	2,56	2,79	2,68
30	3,46	3,80	3,63	2,71	2,94	2,83
35	3,68	4,04	3,86	2,88	3,12	3,00
40	3,85	4,22	4,04	3,03	3,27	3,15
45	4,01	4,31	4,16	3,11	3,37	3,24
60	4,42	4,72	4,57	3,31	3,65	3,48
75	4,80	4,98	4,89	3,55	3,93	3,74
90	5,13	5,19	5,16	3,72	4,15	3,94
105	5,43	5,49	5,46	3,89	4,34	4,12
120	5,78	5,83	5,81	3,96	4,48	4,22
135	6,37	6,22	6,30	4,12	4,67	4,40
150	6,72	6,59	6,66	4,09	4,78	4,44
165	7,45	7,03	7,24	4,22	4,95	4,59
180	8,19	7,65	7,92	4,33	5,11	4,72
195	9,64	8,29	8,97	4,39	5,25	4,82
210	11,26	9,23	10,25	4,47	5,37	4,92
225	12,59	9,87	11,23	4,55	5,52	5,04
240	13,90	10,72	12,31	4,51	5,67	5,09
255	15,23	11,71	13,47	4,66	5,89	5,28
270	16,75	13,23	14,99	4,76	6,13	5,45
285	18,30	14,81	16,56	4,78	6,57	5,68
300	19,40	16,29	17,85	4,91	6,99	5,95
315	20,40	17,37	18,89	5,04	7,40	6,22
330	21,83	18,06	19,95	5,22	8,01	6,62
345	22,70	18,79	20,75	5,36	8,77	7,07
360	23,77	19,61	21,69	5,53	9,40	7,47
375				5,82	9,91	7,87
DEFORMACION						
[mm]						
Deformación 30 - 45	0,55	0,51	0,53	0,40	0,43	0,41
Deformación 75 - 90	0,33	0,21	0,27	0,17	0,22	0,20
Deformación 105 - 120	0,35	0,34	0,35	0,07	0,14	0,10
VEL. DEFORMACION						
[µm/min]						
Velocidad Deformación 30 - 45	36,7	34,0	35,3	26,7	28,7	27,3
Velocidad Deformación 75 - 90	22,0	14,0	18,0	11,3	14,7	13,3
Velocidad Deformación 105 - 120	23,3	22,7	23,3	4,7	9,3	6,7
EST. DINAM.						
[pasadas/mm]						
Estabilidad Dinámica 30 - 45	1145	1235	1189	1575	1465	1537
Estabilidad Dinámica 75 - 90	1909	3000	2333	3706	2864	3150
Estabilidad Dinámica 105 - 120	1800	1853	1800	9000	4500	6300