

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE TEMPERATURA, TIEMPO Y
PORCENTAJE DE POLÍMERO AGREGADO EN LA MODIFICACIÓN DE
ASFALTOS CON PLÁSTICO RECICLADO PROVENIENTE DE ENVASES DE
AGROQUÍMICOS CON BASE EN GRADO DE DESEMPEÑO, REOLOGÍA Y
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS**

Informe de Proyecto de Graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería
Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Química.

XIMENA ACUÑA FERNÁNDEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO
SAN JOSÉ, COSTA RICA
2018

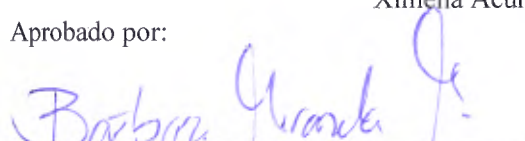
TRIBUNAL EXAMINADOR

Proyecto de Graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

Sustentante:

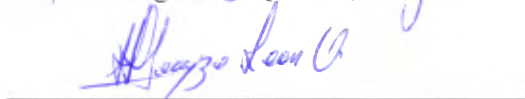
Ximena Acuña Fernández

Aprobado por:



Ing. Barbara Miranda Morales, Ph.D
Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Presidente del Tribunal



Ing. Octavio Loayza León, MSc.
Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales, U.C.R.

Director del proyecto

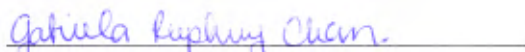


Ing. Ellen Rodríguez Castro, Lic.
Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales, U.C.R.

Miembro Lector

Dr. Benito Stradi Granados, Catedrático.
Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Miembro Lector



Ing. Gabriela Ruphuy Chan, Ph. D
Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Miembro Lector Invitado

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
2018

“Do...or do not. There is no try.”
Master Yoda, Star Wars: Episode V - The Empire Strikes Back. (1980)

DEDICATORIA

A mis padres, por ser un apoyo incondicional e impulsarme a dar lo mejor de mí.
A mi hermano Luis, por ser mi consejero, confidente y compañero de aventuras.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Rodrigo Acuña y Lizbeth Fernández, y mi hermano, Luis Acuña, por brindarme todo su apoyo, ayuda y comprensión a lo largo de toda esta travesía.

A mi director de proyecto, Ing. Octavio Loaiza, por su esfuerzo y dedicación para guiarme durante todo el proyecto.

A la Ing. Ellen Rodríguez por facilitar la realización del proyecto en las instalaciones del Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) de la Universidad de Costa Rica, y por su ayuda y guía en la elaboración y ejecución del diseño experimental.

A Jorge Salazar, Cindy Zúñiga, Vivian Bonilla y todo el personal del Laboratorio de Ligantes Asfálticos y demás personal del LANAMME que me brindaron su ayuda en la realización de los distintos ensayos.

A Clarcy y Gloria, las mosqueteras, por su amistad y por ser las mejores compañeras de trabajos y laboratorios. Sin ustedes nunca hubiera pasado Cinética ni hubiera disfrutado tanto las sesiones de estudio.

A mis amigas, María, Dania, Rebeca y Sujey, porque me ayudaron a ser una mejor persona y a disfrutar la U más allá de lo académico.

Finalmente, agradezco por todas las experiencias vividas en la Universidad ya que cada paso, tropiezo y triunfo me formó, fortaleció y me hizo la persona que soy ahora.

RESUMEN

Se evaluaron condiciones de temperatura, tiempo y porcentaje en masa de polímero agregado en la modificación de asfaltos con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos con base en grado de desempeño, reología y propiedades fisicoquímicas. El proyecto fue realizado en el Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales, LANAMME, de la Universidad de Costa Rica el cual facilitó el asfalto M-1904-16, los equipos y demás recursos empleados para la ejecución de los distintos ensayos. La fundación “Limpiemos Nuestros Campos” proporcionó los pellets de las botellas de agroquímicos que se utilizaron como material modificante.

Inicialmente, se procedió a caracterizar el asfalto original y el polímero para así conocer las propiedades de cada uno de los materiales antes de ser empleados en la modificación. La caracterización del asfalto original consistió en el análisis de ensayos de verificación de calidad con base en grado de viscosidad, penetración y desempeño, distinguiéndolo así como un asfalto AC-30 con PG-64-28 H. Por su parte, la caracterización del plástico reciclado consistió en un análisis termogravimétrico (TGA) y una espectrometría infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) para determinar la estabilidad y comportamiento del plástico a altas temperaturas y establecer la composición química del material, respectivamente. Al tratarse de plástico de envases de agroquímicos, se realizó como medida de seguridad una prueba de termogravimetría acoplada a análisis infrarrojo (TGA/FTIR) con la que se descartó la presencia de compuestos riesgosos en los gases que produce el material al ser expuesto a elevadas temperaturas.

Posteriormente, se procedió a la elaboración del diseño experimental factorial 2^3 para la preparación y análisis de las distintas muestras de asfalto modificado con el plástico empleando tres factores (temperatura, tiempo y porcentaje en masa de polímero agregado) en dos niveles (alto y bajo). Los niveles altos y bajos de cada uno de los factores se seleccionaron con base en investigación bibliográfica y en la realización de numerosas pruebas preliminares de homogenización entre el asfalto y el plástico a distintas temperaturas, tiempos y porcentajes de plástico. Las muestras de asfalto modificado del diseño experimental se elaboraron adicionando lentamente el plástico, previamente molido (malla 35 de 500 μm), en un sistema de mezclado que consta de un recipiente de calentamiento con control de temperatura y un agitador de dispersión de disco fijado a una velocidad constante de 500 rpm.

A las ocho muestras del diseño factorial se le realizaron ensayos de reología para obtener, por duplicado, el valor de deformación no recuperable a 3,2 kPa en el que se basa la clasificación por grado de desempeño PG Plus. La muestra de asfalto modificado por 4 horas a 190 °C y con un 0,75 % de polímero presentó el mejor grado de desempeño PG Plus con la menor deformación no recuperable correspondiente a 0,58 kPa⁻¹ para una clasificación VH referida a carga vehicular muy pesada. El análisis estadístico de estos

resultados señaló a la temperatura como el efecto más significativo sobre la variable respuesta seguido, en importancia, por el efecto de las cuatro interacciones entre las distintas variables.

A la muestra de asfalto modificado con mejor grado de desempeño se le realizaron ensayos de verificación de calidad (viscosidad, penetración y grado de desempeño) junto con ensayos adicionales de punto de ablandamiento, recuperación elástica, estabilidad y fatiga. Este asfalto obtuvo una clasificación PG-82-6 *VH*, mejor que su contraparte original, lo cual que se traduce en un desempeño adecuado a mayores temperaturas de pavimento y una mayor resistencia a cargas vehiculares pesadas.

En general, se presentan mejoras significativas en las propiedades del asfalto M-1904-16 al modificarse con plástico proveniente de envases de agroquímicos. La modificación le brinda al asfalto una mayor dureza, elasticidad, elevada resistencia a la fatiga y una mayor resistencia a fluir al aumentarse la temperatura, manteniendo la ductilidad del material dentro del rango normal. En estado líquido, la mezcla se vuelve inestable al transcurrir el tiempo y ocurre una separación entre las dos fases. Esto se podría evitar mediante la realización y colocación de la mezcla asfáltica inmediatamente después de realizar la modificación o mediante la adición de un plastificante a la mezcla que suavice el polímero, lo cual podría mejorar la incorporación del plástico a la matriz asfáltica.

Se recomienda evaluar el desempeño y estabilidad, en estado sólido, de la muestra de asfalto modificado con plástico de envases de agroquímicos mediante la elaboración de mezcla asfáltica y la simulación de la puesta en carretera del material.

ÍNDICE GENERAL

	Página
TRIBUNAL EXAMINADOR	i
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xx
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ASFALTO	5
2.1 Asfalto	5
2.2 Composición química.....	6
2.3 Degradación y envejecimiento	7
CAPÍTULO 2. POLÍMEROS	8
2.1 Polímero	8
2.2 Polímero termoplástico.....	8
2.3 Polietileno de alta densidad.....	9
2.4 Plástico de desecho.....	10
CAPÍTULO 3. ASFALTO MODIFICADO.....	12
3.1 Modificación de asfalto	12
3.2 Condiciones de modificación	12
3.3 Tipos de modificadores	14
3.4 Asfalto modificado con polímeros	15
3.5 Calidad del asfalto modificado.....	17
CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	19
4.1 Caracterización de polímeros	19

4.1.1	Análisis termogravimétrico (TGA) – ASTM E2550.....	19
4.1.2	Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) – ASTM E125220	
4.1.3	Prueba termogravimétrica acoplada a análisis infrarrojo (TGA/FTIR) – ASTM E2105	20
4.2	Caracterización de asfalto.....	21
4.2.1	Penetración a 25 °C – ASTM D5	21
4.2.2	Punto de ablandamiento – ASTM D36	21
4.2.3	Punto de inflamación – ASTM D92.....	22
4.2.4	Ductilidad a 25 °C – ASTM D113	22
4.2.5	Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada (TFO) – ASTM D1754	23
4.2.6	Viscosidad cinemática a 135 °C– ASTM D2170.....	24
4.2.7	Viscosidad absoluta a 60 °C – ASTM D2171.....	24
4.2.8	Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO) – ASTM D2872	25
4.2.9	Viscosidad dinámica rotacional – ASTM D4402	25
4.2.10	Recuperación Elástica – ASTM D6084	26
4.2.11	Efecto de envejecimiento a presión (PAV) – ASTM D6521	26
4.2.12	Estabilidad a 163 °C – INV E-726-07.....	26
4.2.13	Grado de desempeño (PG)	27
4.2.13.1	Módulo de deformabilidad y módulo de fatiga con reómetro de corte dinámico (DSR) – ASTM D7175.....	27
4.2.13.2	Módulo de rigidez con reómetro de vigas de flexión (BBR) – ASTM D6648	29
4.2.14	Resistencia a la fatiga mediante barrido de frecuencia y de amplitud – AASHTO T101	29
4.2.15	Grado de desempeño plus (PG Plus).....	31
4.2.15.1	Fluencia y recuperación de esfuerzo múltiple (MSCR) – ASTM D7405 .	32
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....		34
5.1	Materiales	34

5.2 Equipo.....	35
5.1 Caracterización del asfalto original.....	36
5.1.1 Punto de ablandamiento – ASTM D36	37
5.1.2 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO) – ASTM D2872	38
5.1.3 Recuperación Elástica – ASTM D6084	39
5.1.4 Efecto de envejecimiento a presión (PAV) – ASTM D6521	39
5.2 Caracterización del polímero.....	40
5.2.1 Análisis termogravimétrico (TGA) – ASTM E2550.....	40
5.2.2 Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) – ASTM E125241	
5.2.3 Prueba termogravimétrica acoplada a análisis infrarrojo (TGA/FTIR) – ASTM E2105	41
5.3 Diseño factorial 2 ³	42
5.4 Caracterización del asfalto modificado	45
5.3.1 Punto de ablandamiento – ASTM D36	46
5.3.2 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada (TFO) – ASTM D1754	46
5.3.3 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO) – ASTM D2872	47
5.3.4 Recuperación Elástica – ASTM D6084	47
5.3.5 Efecto de envejecimiento a presión (PAV) – ASTM D6521	48
5.3.6 Estabilidad a 163 °C – INV E-726-07	48
5.3.7 Punto de ablandamiento a residuo de estabilidad a 163 °C – ASTM D36.....	48
5.3.8 Ductilidad a 25 °C al residuo de TFO – ASTM D113	49
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	50
6.1 Caracterización del asfalto original.....	50
6.2 Caracterización del polímero.....	53
6.3 Diseño factorial 2 ³	57
6.4 Caracterización del asfalto modificado	70

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
7.1 Conclusiones.....	81
7.2 Recomendaciones	84
NOMENCLATURA	85
BIBLIOGRAFÍA.....	87
APÉNDICES.....	93
APÉNDICE A. DATOS EXPERIMENTALES.....	93
APÉNDICE B. DATOS INTERMEDIOS	125
APÉNDICE C. MUESTRA DE CÁLCULO	129
APÉNDICE D. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	138
D.1 MODIFICACIÓN DE ASFALTO CON PLÁSTICO DE ENVASES DE AGROQUÍMICOS.....	138
ANEXOS.....	139

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 3. 1 Tipos de modificadores de asfalto. (Hasan Iqbal, 2004).....	14
Cuadro 3. 2 Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos. (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014).....	17
Cuadro 4. 1 Clasificación de desempeño por fatiga con base en el valor de deformación aplicada. (Teymourpour & Bahia, 20014).....	31
Cuadro 4. 2 Clasificación por grado de desempeño PG Plus con base en el valor de deformación no recuperable. (Rodriguez & Salazar, 2015).....	33
Cuadro 5. 1 Propiedades de los materiales empleados.	35
Cuadro 5. 2 Propiedades de toxicidad y seguridad de los materiales empleados.	35
Cuadro 5. 3 Equipo utilizado para llevar a cabo el proyecto.	35
Cuadro 5. 4 Matriz del diseño experimental 2^3 para evaluar condiciones de temperatura, tiempo y porcentaje de polímero en la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.....	43
Cuadro 5. 5 Factores y niveles del diseño experimental 2^3 para la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.	43
Cuadro 6. 1 Caracterización del asfalto original M-1904-16 realizada por el LANAMME.	50
Cuadro 6. 2 Ensayos adicionales de caracterización del asfalto original M-1904-16.	51
Cuadro 6. 3 Caracterización por PG del asfalto original M-1904-16.	52
Cuadro 6. 4 Caracterización por PG Plus del asfalto original M-1904-16.	53
Cuadro 6. 5 Clasificación de grado de desempeño PG Plus de las muestras a distintos porcentajes de polímero.....	60
Cuadro 6. 6 Resumen de resultados de temperatura superior PG del diseño experimental 2^3 para la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.....	61

Cuadro 6. 7 Resumen de resultados de deformación no recuperable PG Plus del diseño experimental 2^3 para la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.	62
Cuadro 6. 8 Efectos e interacciones principales de los distintos factores del diseño experimental 2^3	65
Cuadro 6. 9 Cambio de masa del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	70
Cuadro 6. 10 Caracterización del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	71
Cuadro 6. 11 Caracterización por PG del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	73
Cuadro 6. 12 Caracterización por PG Plus del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	74
Cuadro 6. 13 Punto de ablandamiento del residuo de estabilidad a 163 °C del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.	75
Cuadro 6. 14 Coeficientes del modelo de vida de fatiga obtenidos del barrido de amplitud del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	77
Cuadro 6. 15 Vida de fatiga del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C para deformaciones aplicada de 2,5 % y 5 %.....	78
Cuadro A. 1 Punto de ablandamiento del asfalto M-1904-16 original.	93
Cuadro A. 2 Cambio de masa del asfalto M-1904-16 original en horno de película delgada rotativa vertical (RTFO).....	93
Cuadro A. 3 Distancias del ensayo de recuperación elástica del asfalto M-1904-16 original.	93
Cuadro A. 4 Cambio de masa en horno de envejecimiento a presión (PAV) del asfalto M-1904-16 original.	93

Cuadro A. 5 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original.....	94
Cuadro A. 6 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original.....	94
Cuadro A. 7 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original envejecido mediante RTFO.	95
Cuadro A. 8 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original envejecido mediante RTFO.	95
Cuadro A. 9 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original envejecido mediante PAV.....	96
Cuadro A. 10 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original envejecido mediante PAV.....	96
Cuadro A. 11 Datos obtenidos del reómetro BBR para el asfalto M-1904-16 original.....	97
Cuadro A. 12 Datos del ensayo MSCR del asfalto M-1904-16 modificado a distintos porcentajes de polímero para la comprobación de homogenización de la mezcla.....	97
Cuadro A. 13 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1.	97
Cuadro A. 14 Punto Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1.	98
Cuadro A. 15 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1 envejecido mediante RTFO.	98
Cuadro A. 16 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1 envejecido mediante RTFO.	99
Cuadro A. 17 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2.	99
Cuadro A. 18 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2.	100

Cuadro A. 19 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2 envejecido mediante RTFO. 100

Cuadro A. 20 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2 envejecido mediante RTFO. 101

Cuadro A. 21 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3. 101

Cuadro A. 22 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3. 102

Cuadro A. 23 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3 envejecido mediante RTFO. 102

Cuadro A. 24 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3 envejecido mediante RTFO. 103

Cuadro A. 25 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4. 103

Cuadro A. 26 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4. 104

Cuadro A. 27 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4 envejecido mediante RTFO. 104

Cuadro A. 28 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4 envejecido mediante RTFO. 105

Cuadro A. 29 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5. 105

Cuadro A. 30 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5. 106

Cuadro A. 31 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5 envejecido mediante RTFO. 106

Cuadro A. 32 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5 envejecido mediante RTFO. 107

Cuadro A. 33 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6. 107

Cuadro A. 34 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6. 108

Cuadro A. 35 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6 envejecido mediante RTFO. 108

Cuadro A. 36 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6 envejecido mediante RTFO. 109

Cuadro A. 37 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7. 109

Cuadro A. 38 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7. 110

Cuadro A. 39 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7 envejecido mediante RTFO. 110

Cuadro A. 40 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7 envejecido mediante RTFO. 111

Cuadro A. 41 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #8. 111

Cuadro A. 42 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #8. 112

Cuadro A. 43 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #8 envejecido mediante RTFO. 112

Cuadro A. 44 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado #8 envejecido mediante RTFO. 113

Cuadro A. 45 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1.....	113
Cuadro A. 46 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2.....	113
Cuadro A. 47 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3.....	114
Cuadro A. 48 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4.....	114
Cuadro A. 49 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5.....	114
Cuadro A. 50 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6.....	114
Cuadro A. 51 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7.....	115
Cuadro A. 52 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #8.....	115
Cuadro A. 53 Punto de ablandamiento del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	115
Cuadro A. 54 Cambio de masa en horno de película delgada rotativa horizontal (TFO) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	115
Cuadro A. 55 Cambio de masa en horno de película delgada rotativa vertical (RTFO) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	116
Cuadro A. 56 Distancias del ensayo de recuperación elástica del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.	116
Cuadro A. 57 Cambio de masa en horno de envejecimiento a presión (PAV) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.	116

Cuadro A. 58 Punto de ablandamiento del residuo superior de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 48 horas.	116
Cuadro A. 59 Punto de ablandamiento del residuo medio de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 48 horas.	117
Cuadro A. 60 Punto de ablandamiento del residuo inferior de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 48 horas.	117
Cuadro A. 61 Punto de ablandamiento del residuo superior de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 6 días.....	117
Cuadro A. 62 Punto de ablandamiento del residuo medio de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 6 días.....	117
Cuadro A. 63 Punto de ablandamiento del residuo inferior de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 6 días.....	117
Cuadro A. 64 Ensayo de ductilidad a 25 °C del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	118
Cuadro A. 65 Punto de inflamación del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	118
Cuadro A. 66 Penetración a 25 °C del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	118
Cuadro A. 67 Penetración a 25 °C a residuo TFO del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.	118
Cuadro A. 68 Datos de la primera muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 60 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.	119
Cuadro A. 69 Datos de la segunda muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 60 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	119
Cuadro A. 70 Datos de la tercera muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 60 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.	120

Cuadro A. 71 Datos de la primera muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C. 120

Cuadro A. 72 Datos de la segunda muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C..... 121

Cuadro A. 73 Datos de la tercera muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C. 121

Cuadro A. 74 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C envejecido mediante PAV. 122

Cuadro A. 75 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C envejecido mediante PAV. 122

Cuadro A. 76 Datos obtenidos del reómetro BBR para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C. 123

Cuadro A. 77 Datos de la primera corrida de barrido de frecuencia para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C. 123

Cuadro A. 78 Datos de la segunda corrida de barrido de frecuencia para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C. 124

Cuadro A. 79 Coeficientes del barrido de amplitud para dos corridas con el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75% de polímero, 4 horas y 190 °C. 124

Cuadro B. 1 Porcentaje de recuperación elástica del asfalto M-1904-16 original..... 125

Cuadro B. 2 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1904-16 original en horno de película delgada rotativa vertical (RTFO)..... 125

Cuadro B. 3 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1904-16 original en horno de envejecimiento a presión (PAV).	125
Cuadro B. 4 Datos de promedio y varianza muestral de los distintos experimentos del diseño factorial 2^3	126
Cuadro B. 5 Parámetros para la determinación del intervalo de no significancia.	126
Cuadro B. 6 Efectos e interacciones de las distintas variables del diseño factorial 2^3	126
Cuadro B. 7 Corrección de punto de inflamación por presión atmosférica.....	127
Cuadro B. 8 Porcentaje de recuperación elástica del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.	127
Cuadro B. 9 Porcentaje de cambio de masa en horno de película delgada horizontal (TFO) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	127
Cuadro B. 10 Porcentaje de cambio de masa en horno de película delgada rotativa vertical (RTFO) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C. 127	
Cuadro B. 11 Porcentaje de cambio de masa en horno de envejecimiento a presión (PAV) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	128
Cuadro B. 12 Parámetro α obtenido del barrido de frecuencia del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.	128
Cuadro B. 13 Vida de fatiga obtenida con el modelo de ley de fatiga para deformaciones aplicadas de 1 % hasta 10 % para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 5. 1 Montaje del equipo para la determinación del punto de ablandamiento. (Propio, 2017).....	38
Figura 5. 2 Horno de película delgada rotativa vertical. (Propio, 2017).....	39
Figura 5. 3 Baño para la determinación de la recuperación elástica (Propio, 2017).....	39
Figura 5. 4 Horno de enjecimiento a presión. (Propio, 2017).....	40
Figura 5. 5 Equipo de análisis termogravimétrico, TGA. (Propio, 2017)	41
Figura 5. 6 Equipo de espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR). (Propio, 2017).....	41
Figura 5. 7 Equipo de prueba termogravimétrica acoplada a espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier. (Propio, 2017).....	42
Figura 5. 8 Equipo para modificar asfalto: recipiente de mezclado, agitador y controlador de temperatura. (Propio, 2017).....	44
Figura 5. 9 Reómetro de corte dinámico. (Propio, 2017).....	45
Figura 5. 10 Horno de película delgada horizontal. (Propio, 2017).....	47
Figura 5. 11 Columna de estabilidad. (Propio, 2017)	48
Figura 6. 1 Espectro infrarrojo de la muestra de plástico de envases de agroquímicos obtenido del espectrofotómetro Thermo Scientific. (Propio, 2016).....	53
Figura 6. 2 Termograma del plástico de envases de agroquímicos obtenido del analizador termogravimétrico TA Instruments. (Propio, 2016).....	54
Figura 6. 3 Espectro infrarrojo 3D de gases del TGA del calentamiento de plástico de envases de agroquímicos en atmósfera de aire obtenido del espectrofotómetro Thermo Scientific. (Propio, 2017)	56
Figura 6. 4 Espectro infrarrojo 3D de gases del TGA del calentamiento de plástico de envases de agroquímicos en atmósfera inerte obtenido del espectrofotómetro Thermo Scientific. (Propio, 2017)	56

Figura 6. 5 Muestra de asfalto modificado con plástico de envases de agroquímicos al 1,5 % que presenta mala incorporación del polímero a la matriz asfáltica (Propio, 2016).	58
Figura 6. 6 Muestra de asfalto modificado con plástico de envases de agroquímicos al 1,1 % que presenta mala incorporación del polímero a la matriz asfáltica (Propio, 2016).	59
Figura 6. 7 a) Muestra de asfalto modificado al 1 % que presenta buena incorporación del polímero a la matriz asfáltica. b) Servilleta con asfalto modificado al 1 % que indica la no presencia de grumos en la mezcla. (Propio, 2016).....	59
Figura 6. 8 Gráfica normal de residuos obtenido de Minitab 17. (Propio, 2017)	63
Figura 6. 9 Histograma de residuos obtenido de Minitab 17. (Propio, 2017).....	63
Figura 6. 10 Gráfica de ajuste residual obtenida de Minitab 17. (Propio, 2017)	64
Figura 6. 11 Gráfica de orden de recolección de datos obtenida de Minitab 17. (Propio, 2017).....	64
Figura 6. 12 Gráfica normal de efectos estandarizados obtenida de Minitab 17. (Propio, 2017).....	66
Figura 6. 13 Gráfica de pareto para efectos estandarizados obtenida de Minitab 17. (Propio, 2017).....	67
Figura 6. 14 Gráfica intensidad del efecto de un factor sobre la variable respuesta obtenida de Minitab 17. (Propio, 2017)	68
Figura 6. 15 Gráfica de interacciones entre par de factores obtenida de Minitab 17. (Propio, 2017).....	69
Figura 6. 16 Gráfica de interacción entre los tres factores del diseño factorial obtenida de Minitab 17. (Propio, 2017).....	69
Figura 6. 17 Recta de mejor ajuste de la primera corrida de barrido de frecuencia para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C. (Zúñiga, 2016)..	76
Figura 6. 18 Recta de mejor ajuste de la segunda corrida de barrido de frecuencia para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C. (Zúñiga, 2016)..	76

Figura 6. 19 Vida de fatiga respecto a la deformación aplicada para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75% de polímero, 4 horas y 190 °C. (Propio, 2017) 77

Figura 6. 20 Curva de carga-deformación obtenida de la primera corrida de barrido de amplitud para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75% de polímero, 4 horas y 190 °C. (Zúñiga, 2016)..... 78

Figura 6. 21 Curva de carga-deformación obtenida de la segunda corrida de barrido de amplitud para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75% de polímero, 4 horas y 190 °C. (Zúñiga, 2016)..... 79

Figura A. 1 Análisis del asfalto M-1904-16 según la clasificación por grado de viscosidad. (LANAMME, 2016)..... 139

Figura A. 2 Mapa de zonificación climática de temperatura superior. (Rodriguez & Salazar, 2015)..... 141

Figura A. 3 Mapa de zonificación climática de temperatura inferior. (Rodriguez & Salazar, 2015)..... 141

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha visto un aumento prácticamente exponencial de la flota vehicular de nuestro país. El Quinto Informe del Estado de la Región presenta datos del 2010 hasta el 2014 donde Costa Rica ha presentado una tasa de crecimiento del parque automotor de alrededores del 5% anual (CONARE, 2016). El alto flujo vehicular, sumado a las condiciones adversas del clima tropical, con altas temperaturas en verano y torrenciales lluvias en invierno, disminuye considerablemente la vida útil de las carreteras. Estos factores externos deterioran la integridad del pavimento provocando la aparición prematura de daños como grietas y fisuras, así como deformación superficial y desintegración de las capas asfálticas (SIECA, 2010).

Como respuesta a esto, se ha desarrollado a nivel mundial el uso de asfaltos modificados con polímeros u otros materiales buscando un desempeño que extienda la vida útil de los pavimentos asfálticos. Estas modificaciones buscan alterar las propiedades viscoelásticas y reológicas de los asfaltos para que esto se traduzca en una mejor adherencia entre el asfalto y el agregado pétreo provocando una elasticidad que permita soportar altas cargas vehiculares (Salazar Delgado, 2007).

Investigaciones a nivel mundial han analizado diversos tipos de polímeros con el fin de determinar si se presentan mejoras realmente significativas en el asfalto modificado con respecto al original. En Estados Unidos se han realizado pruebas con asfaltos modificados empleando diversos agentes modificantes como, por ejemplo, SBR (estireno-butadieno-caucho), resinas de copolímero de etileno, caucho de llanta reciclado, EVA (etilvinil acetato), entre muchos otros. Algunas de estas investigaciones han arrojado como resultado mejoras en las propiedades reológicas del asfalto modificado respecto al original, así como una mayor estabilidad a altas temperaturas (France, 1997).

En Arabia Saudita, se han llevado a cabo investigaciones empleando polietileno de baja densidad (LDPE), EVA y polímeros de acrilatos obteniendo mejoras en comportamiento reológico, reducción del grado de susceptibilidad a la temperatura y estabilidad de almacenamiento (Hasan Iqbal, 2004). En Canadá, por su parte, se han realizado análisis por medio de métodos reológicos de asfaltos modificados con copolímeros como SBS (estireno-butadieno-estireno) y EVA para determinar su comportamiento a distintas condiciones (Vlachovicova, 2006).

En Costa Rica, el LANAMME (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica) ha realizado análisis reológicos y caracterizaciones de asfaltos modificados con varios materiales como SBS, SBR, EGA (etil-glicidil-acrilato), látex UPS-65 (SBR aniónico), negro de humo, asfaltita, entre otros. Estos experimentos demostraron, entre otras cosas, mejoras en los grados de desempeño de la mayoría de los asfaltos modificados respecto a su contraparte original; observándose, además, una fuerte dependencia entre este rendimiento y el material que se utiliza para modificar. Algunos polímeros como el SBR presentaron ciertos problemas de estabilidad, acumulación de polímero y separación de fases luego de un tiempo de reposo que se emplea para simular el almacenamiento del producto ya en planta. (Elizondo Arrieta, Salazar Delgado, & Villegas Villegas, 2010)

Lo que respecta a la puesta en práctica de asfaltos modificados, algunos países ya han incorporado el uso de estos en la construcción de sus carreteras. En Estados Unidos, el asfalto modificado con polímeros representa un 15% del consumo total de asfalto utilizado para pavimentación. Países como Ecuador, Australia, Perú y Argentina cuentan con plantas dedicadas a la producción de asfaltos modificados. (Salazar Delgado, 2007)

En Costa Rica, los asfaltos modificados son una alternativa relativamente reciente. No existen empresas que se dediquen formalmente a la elaboración de estos asfaltos por lo que, hasta el momento, su fabricación ha sido llevada a cabo exclusivamente por empresas constructoras. La empresa MECO, por ejemplo, tuvo la iniciativa de efectuar una

modificación a su equipo para producir mezcla asfáltica con asfalto modificado empleando polímeros líquidos. Este sistema se utilizó para la modificación de asfalto que fue posteriormente empleado en la construcción del tramo San Ramón-Barranca, en la carretera a Caldera y en la Costanera (Salazar Delgado, Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta, 2007). En las empresas constructoras, las modificaciones del asfalto se realizan en planta dentro del proceso de producción de mezcla asfáltica utilizando sistemas muy básicos. Esto dificulta la implementación de controles de calidad y limita los tipos de aditivos que se pueden emplear para modificar (Elizondo Arrieta, Salazar Delgado, & Villegas Villegas, 2010).

Debido al gran auge en las técnicas de construcción amigables con el ambiente, se ha presentado un incremento en el uso de pavimentos verdes que consisten en el empleo de asfaltos modificados con materiales de desecho para la construcción de carreteras. Esta alternativa representa, no sólo beneficios económicos, sino beneficios ambientales ya que se ofrece un uso alternativo a los desechos como el plástico de envases, botellas y bolsas que poseen un alto grado de contaminación (LANAMME, 2014).

A nivel mundial, se han realizado numerosas investigaciones del mejoramiento del desempeño del asfalto con el uso de materiales de desecho, principalmente con PET (tereftalato de polietileno). Otro material ampliamente utilizado es el caucho de llantas, el cual es molido con el fin de utilizarse para modificar las propiedades elásticas del asfalto (Aguiar Moya & Villegas Villegas, 2012).

En la línea de investigación de asfaltos verdes del Laboratorio de Ligantes Asfálticos del departamento de Infraestructura Vial del LANAMME, está trabajando en el uso de materiales de desecho para la modificación de asfaltos. Por ejemplo, se ha analizado la incorporación de la bolsa que se utiliza para cubrir los bananos en las plantaciones como agente modificante y, a la fecha, se han detectado varias ventajas, no sólo desde el punto de vista del desempeño del asfalto, sino también desde el punto de vista ecológico. (Aguiar Moya & Villegas Villegas, 2012)

La fundación “Limpiemos Nuestros Campos”, en busca de la promoción de las buenas prácticas agrícolas con enfoque al uso responsable de plaguicidas, recolección y disposición adecuada de envases vacíos, le ofreció al LANAMME material plástico proveniente de envases de agroquímicos con el fin de que se le pudiera dar un uso alternativo y, así, formar parte de la iniciativa de asfaltos verdes.

El objetivo principal de este proyecto es evaluar las condiciones de temperatura, tiempo y porcentaje en masa de polímero agregado en la modificación del asfalto con el plástico reciclado proveniente de estas botellas de agroquímicos con base en grado de desempeño, reología y propiedades fisicoquímicas.

Durante la etapa experimental, se realiza la caracterización del asfalto original y el polímero para conocer las propiedades de cada uno de los materiales antes de efectuar la modificación del asfalto. Posteriormente, se plantea y se elabora el diseño experimental factorial 2^3 para la preparación y análisis de las muestras de asfalto modificado con el plástico empleando tres factores (temperatura, tiempo y porcentaje de polímero agregado) en dos niveles cada uno (alto y bajo). A estas muestras, se les realizan ensayos de reología para obtener, por duplicado, el grado de desempeño PG Plus y, mediante un análisis estadístico, estudiar el efecto de cada factor sobre este grado de desempeño, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable. Es así como se establecen las mejores condiciones de temperatura, tiempo y porcentaje en masa de polímero agregado a las cuales se presenta un mayor grado de desempeño PG Plus.

A la muestra de asfalto modificado con mayor grado de desempeño PG Plus, se le realiza una caracterización mediante ensayos de verificación de calidad (viscosidad, penetración y grado de desempeño), junto con ensayos adicionales, para comparar los resultados de la muestra de asfalto modificado con los obtenidos por el asfalto original.

CAPÍTULO 1. ASFALTO

2.1 Asfalto

El asfalto es uno de los materiales más antiguos conocidos en la ingeniería. Ha sido utilizado durante miles de años como adhesivo, sellador, conservante, agente impermeabilizante y como aglutinante de pavimento (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014).

Es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Además, posee propiedades ideales para la construcción de pavimentos, cumpliendo las siguientes funciones: (Salazar Delgado, 2011):

- Impermeabiliza la estructura del pavimento, haciéndolo menos sensible a la humedad y mucho más eficaz contra la penetración de agua proveniente de la precipitación.
- Proporciona una fuerte unión y cohesión entre el agregado, optimizando la capacidad de resistir la acción mecánica de disgregación causada por las cargas de los vehículos.
- Mejora la capacidad portante o capacidad para soportar cargas de la estructura, lo que permite disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.

El asfalto es un material viscoelástico que demuestra la dependencia del tiempo y la temperatura con la relación de tensión-deformación. El grado en que su comportamiento es viscoso o elástico es función de la temperatura y del período y la duración de la carga aplicada. A altas temperaturas o tiempos de carga largos, el asfalto se comporta como líquido viscoso mientras que a bajas temperaturas o tiempos de carga cortos se comporta como sólido elástico. En condiciones medias del período de servicio, se muestra un

comportamiento viscoelástico en el que la respuesta del material dependerá de la temperatura o de la velocidad de carga (Modarres & Hamed, 2014).

2.2 Composición química

La composición química del asfalto es muy compleja y variable. Sus propiedades están estrechamente relacionadas con fuentes de petróleo crudo y procesos de refinación. Existen dos tipos de asfalto: naturales y artificiales. Los asfaltos artificiales se derivan del petróleo y contienen muchos grupos funcionales, mientras que los naturales se encuentran en depósitos en rocas o lagunas (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014).

Los asfaltos son grupos de moléculas complejas bastante grandes. Sus principales componentes son de naturaleza orgánica (85 % carbono y 10 % hidrógeno), además de alrededor de 5 % de heteroátomos (azufre, oxígeno, y nitrógeno) y menos de un 1 % de metales como níquel y vanadio (Yut & Zofka, 2014).

El asfalto puede ser fraccionado con disolventes utilizando diversos métodos cromatográficos como la cromatografía de columna y la cromatografía de capa fina, entre otros. Estos métodos separan el asfalto en cuatro componentes principales: ácidos grasos saturados, asfaltenos, resinas y aromáticos. La polaridad y el peso molecular de estas fracciones aumenta con respecto al orden SARA (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos), siendo los asfaltenos los de mayor polaridad y peso molecular (Vlachovicova, 2006). Los aceites en el asfalto tienen el peso molecular más bajo (entre 25 g/mol y 800 g/mol) y poseen un gran número de cadenas laterales saturadas y pocos anillos. Las resinas son los compuestos con un peso molecular intermedio (entre 800 g/mol y 2000 g/mol) y contienen azufre y nitrógeno. Los asfaltenos son compuestos de peso molecular más alto (entre 1800 g/mol y 8000 g/mol) con estructuras aromáticas de anillo, pocas cadenas laterales y grupos funcionales que pueden reaccionar con modificadores poliméricos potenciales. Una muestra promedio de asfalto contiene una proporción de asfaltenos/resinas/aceites de 23/27/50 aproximadamente; a mayor contenido de asfaltenos,

más duro es el asfalto. Los asfaltos son sistemas multifásicos que presentan un comportamiento reológico similar a la de los polímeros de bajo peso molecular (Hasan Iqbal, 2004).

2.3 Degradación y envejecimiento

La principal causa del envejecimiento del asfalto y su fragilidad es la oxidación atmosférica de ciertas moléculas causando la formación de grupos funcionales altamente polares (alcoholes, carboxilos, fenólicos, aminas, tioles, entre otros) y fuertes interacciones que contienen oxígeno. En la aplicación del pavimento, los asfaltos están expuestos a procesos de envejecimiento durante el almacenamiento, mezcla, transporte y construcción, así como en la vida de servicio. Por lo general, se produce un rápido envejecimiento a altas temperaturas en la superficie de los agregados durante el mezclado del asfalto caliente (Yut & Zofka, 2014).

Las mezclas asfálticas son sensibles a los agentes de degradación tales como calor, oxígeno, ozono y productos químicos a los que están expuestos durante su preparación, almacenamiento y servicio. Los procesos termo-oxidativos conducen a la formación de estructuras químicas inestables en el asfalto que puede inducir deterioro de las propiedades físicas y químicas de las superficies asfálticas (Vlachovicova, 2006).

Los daños más comúnmente observados en los pavimentos de concreto asfáltico se pueden catalogar en (SIECA, 2010):

- Fisuras y grietas: fisuras de piel de cocodrilo, fisuras en bloque, fisuras en arco, fisuras transversales, fisuras longitudinales y fisuras por flexión de junta.
- Deformaciones superficiales: ahuellamiento, corrimiento, corrugación, hinchamiento y hundimiento
- Desintegración: baches, desintegración de bordes, presencia de agregados, y desprendimiento de capa de rodadura

CAPÍTULO 2. POLÍMEROS

2.1 Polímero

Un polímero es un compuesto de alto peso molecular formado por la unión de moléculas denominadas monómeros las cuales, al unirse, forman moléculas más grandes en distintos arreglos (Elizondo Arrieta, Salazar Delgado, & Villegas Villegas, 2010). En comparación con la mayoría de metales y materiales cerámicos, los polímeros presentan, en su mayoría, baja resistencia, rigidez y temperatura de fusión; sin embargo, poseen baja densidad y buena resistencia química (Askeland, 1998).

Los polímeros se pueden clasificar según el mecanismo de polimerización, constitución química, escala de fabricación, comportamiento mecánico o tipo de aplicación. Otra manera de clasificarlos es según el tipo de estructura química, ya sea por la cantidad de monómeros diferentes, la estructura de estos monómeros o la forma de la cadena polimérica que puede ser lineal o ramificada (Blanco Alvarez, 2004). En los polímeros lineales, cada monómero está conectado a otros dos monómeros y, en los polímeros ramificados, algunas unidades están conectadas a tres o más unidades (Vlachovicova, 2006).

La estructura macromolecular del polímero condiciona de forma importante sus propiedades físicas y químicas, entre ellas el comportamiento frente a la temperatura. De esta manera, pueden diferenciarse en termoplásticos, termoestables (termoendurecibles, duroplásticos o termofijos) y elastómeros (Blanco Alvarez, 2004).

2.2 Polímero termoplástico

Los polímeros termoplásticos se componen de largas cadenas de monómeros que se comportan de una manera plástica y dúctil (Askeland, 1998). Poseen una estructura molecular mayoritariamente lineal con o sin ramificaciones. Las moléculas quedan

enmarañadas unas con otras pero sin que se produzca la reticulación entre sí con enlaces covalentes (Blanco Alvarez, 2004).

La elevación de la temperatura hace que la fuerza de los enlaces secundarios se debilite al aumentar la movilidad molecular, lo que facilita el movimiento relativo de las cadenas adyacentes al aplicar un esfuerzo, fluyendo así como un líquido altamente viscoso (Blanco Alvarez, 2004).

Un polímero termoplástico se ablanda hasta fluir cuando se somete a un calentamiento y se vuelve sólido y rígido cuando la temperatura baja. Estos dos procesos son completamente reversibles y pueden repetirse de forma reiterada. Lo anterior permite que el plástico pueda ser moldeado un número indefinido de veces, empleando en efecto combinado la presión y la temperatura. La degradación irreversible se origina cuando la temperatura del termoplástico fundido se eleva a tal punto que las vibraciones moleculares son tan violentas que rompen los enlaces covalentes (Blanco Alvarez, 2004).

Algunos de los principales termoplásticos son el polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), tereftalato de polietileno (PET), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP) y el poliestireno (PS) (Askeland, 1998).

2.3 Polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad, también llamado HDPE por sus siglas en inglés, es un polímero termoplástico del grupo de las poliolefinas parcialmente amorfo y parcialmente cristalino. El grado de cristalinidad depende del peso molecular, de la cantidad de monómero presente y del tratamiento térmico aplicado. Este termoplástico se obtiene mediante polimerización de etileno a baja presión por lo que su estructura química se basa en unidades repetitivas de etileno $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ (Blanco Alvarez, 2004).

El polietileno de alta densidad es más rígido, cristalino y duro que los materiales de menor densidad, con un peso molecular menor a los 300 kg/mol. Este polímero posee una alta

resistencia al impacto y a la compresión, así como una alta resistencia al agrietamiento. No se ve afectado por la humedad o el agua y presenta una buena resistencia química a la corrosión, con excepción de ácidos fuertemente oxidantes (Vasile & Pascu, 2005).

Debido al alto peso molecular del polietileno de alta densidad, combinado con su bajo coeficiente de fricción, éste constituye en un excelente producto resistente a la abrasión. Además, presenta como ventaja que sus principales propiedades se mantienen a temperaturas extremadamente bajas, con excepción de su resistencia al impacto la cual disminuye conforme baja la temperatura (Vasile & Pascu, 2005).

Este tipo de polímero representa la parte más grande de las aplicaciones del polietileno. Se emplea en la producción de botellas, envases y otros contenedores industriales, así como bolsas, juguetes y ciertos accesorios de tuberías, entre otras aplicaciones (Vasile & Pascu, 2005).

Como desventaja, el polietileno de alta densidad posee una menor rigidez que la del polipropileno, un módulo de encogimiento mayor que los polímeros de baja densidad y una menor resistencia a los rayos UV. Al calentarse a altas temperaturas, puede producir vapores tóxicos y humo denso. Asimismo, el polvo de este material puede ser irritante para los ojos, la piel y el sistema respiratorio (Vasile & Pascu, 2005).

2.4 Plástico de desecho

Debido a su alta temperatura de descomposición, resistencia a la radiación y a que en su mayoría no son biodegradables, los plásticos pueden permanecer en la tierra y el mar por muchos años causando contaminación al medio ambiente. Los plásticos tienden a romperse en fragmentos más pequeños llamados macro-plásticos, meso-plásticos y micro-plásticos que tienen, por su estructura química, un impacto negativo significativo sobre los ecosistemas y pueden afectar la salud humana y animal (Gürü, Cubukb, Arslan, Farzaniyan, & Bilici, 2014).

El uso de plásticos reciclados en lugar de materiales vírgenes presenta varias ventajas. Por ejemplo, puede ayudar a aliviar la cantidad de desechos en los vertederos y la reducción de demandas de extracción en las canteras naturales. Por otra parte, constituye una solución alternativa a la contaminación del medio ambiente mediante la utilización de materiales de desecho como materiales secundarios en proyectos de construcción de carreteras (Gürü, Cubukb, Arslan, Farzarian, & Bilici, 2014).

CAPÍTULO 3. ASFALTO MODIFICADO

3.1 Modificación de asfalto

Para reducir al mínimo el deterioro y, por lo tanto, aumentar la durabilidad a largo plazo de un pavimento, se deben mejorar las propiedades de las capas de asfalto relacionadas con el rendimiento como, por ejemplo, la resistencia a la deformación permanente, la temperatura de craqueo, la fatiga asociada a la carga, el desgaste, el decapado y el envejecimiento (Hasan Iqbal, 2004).

La modificación de asfaltos es una técnica en la que se añade al asfalto un cierto tipo y dosificación de uno o varios aditivos con el fin de mejorar sus características viscoelásticas (Toraldó & Mariani, 2014). Esta práctica busca mejorar la elasticidad, flexibilidad, consistencia y durabilidad del asfalto con el fin de evitar daños prematuros en los pavimentos (Elizondo Arrieta, Salazar Delgado, & Villegas Villegas, 2010).

Se espera que los modificantes aumenten la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y, por ende, a la fatiga. Asimismo, se busca que los aditivos reduzcan el agrietamiento y la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura a las que puedan verse expuestas. Usualmente, los agentes modificantes se aplican directamente al material asfáltico antes de ser mezclados con el material pétreo (Figueroa, Fonseca, & Reyes, 2009).

3.2 Condiciones de modificación

La modificación ideal se da cuando el agente modificante conserva su estructura interna después de ser mezclado con el asfalto. Investigaciones actuales no sólo se basan en la escogencia de este agente modificante sino, también, en el establecimiento de procesos y condiciones de mezclado que le brinden al pavimento una mayor vida útil (Polacco, Filippi, Merusi, & Stastna, 2015).

Algunos de los factores que se ha determinado que influyen en la calidad del asfalto modificado son (Garnica, Delgado, Gómez, & González, 2004):

- Cantidad, granulometría y composición del agente modificante
- Tiempo y temperatura de mezclado
- Calidad del asfalto original

Un mayor contenido de modificante tiende a mejorar las propiedades del asfalto al adoptar éste características del modificante. En algunos casos, esto puede traducirse en un aumento en la viscosidad, en el punto de ablandamiento, en el porcentaje de recuperación elástica y/o en el grado de desempeño. En términos de granulometría, cuanto menor sea el tamaño de las partículas del agente modificante, mayor es la superficie específica y, con ella, el grado de interacción entre el modificante y el asfalto (Garnica, Delgado, Gómez, & González, 2004).

En cuanto al tiempo de mezcla, éste debe ser el menor posible, no sólo razones económicas, sino que el proceso de mezclado a alta temperatura por tiempos prolongados puede inducir al envejecimiento y degradación del asfalto y del agente modificante. Además, el tiempo para obtener una buena solubilidad e interacción es importante para una correcta incorporación entre los materiales pero no al grado en que se pierdan en la mezcla las propiedades deseadas del modificante (Polacco, Filippi, Merusi, & Stastna, 2015).

Por otro lado, la temperatura de disolución y mezclado es importante ya que la incorporación eficiente del polímero en el asfalto se da cuando éste último se encuentra en forma líquida. Al aumentar la temperatura de mezcla, se acelera la interacción química entre el asfalto y el agente modificante, lo que mejora la homogenización de la mezcla entre ambos materiales (Garnica, Delgado, Gómez, & González, 2004).

3.3 Tipos de modificadores

Las sustancias químicas llamadas modificadores son, en su mayoría, polímeros o sustancias inertes que combinados químicamente con el asfalto mejoran las propiedades según las necesidades de servicio (Salazar Delgado, 2007). El Cuadro 3.1 muestra los tipos de modificadores de asfalto más comúnmente utilizados.

Cuadro 3. 1 Tipos de modificadores de asfalto (Hasan Iqbal, 2004).

Tipo		Ejemplos
	Rellenos	Cal, negro carbón, cenizas
	Aditivos adhesivos	Amidas y aminas orgánicas
Aditivos	Extensores	Lignina y sulfuro
	Antioxidantes	Antioxidantes de zinc, antioxidantes de plomo, aminas, fenólicos
	Organometálicos	Compuestos organo-manganeso, organo-cobalto
	Plásticos	
	a) Termoplásticos	Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policloruro de vinilo (PVC), Poliestireno (PS), Etilvinil acetato (EVA)
	b) Termoestables	Resinas epoxi
Polímeros	Elastómeros	
	a) Caucho natural	
	b) Caucho sintético	Estireno-butadieno (SBR), Estireno-butadieno-estireno (SBS), etileno propileno dieno (EPDM), Isobuteno-isopreno (IIR)
	Fibras	Fibras de poliéster, fibras de polipropileno

3.4 Asfalto modificado con polímeros

Los asfaltos modificados con polímeros son asfaltos a los cuales se les ha adicionado algún polímero con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas (Elizondo Arrieta, Salazar Delgado, & Villegas Villegas, 2010). La modificación del asfalto se puede dar mediante la incorporación del polímero por mezcla mecánica o por reacción química (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014).

El objetivo de modificar con polímeros es obtener mejoras en propiedades reológicas y, por consiguiente, en la totalidad de la mezcla asfáltico (Salazar Delgado, 2013). Los polímeros tienden a mejorar las propiedades del asfalto dando mayor rigidez a altas temperaturas, mayor resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas y mejor resistencia a la humedad o la fatiga (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014). Mejoran el desempeño de la mezcla aumentando la resistencia a la deformación permanente, la resistencia a la fatiga, al mismo tiempo que aumenta su durabilidad al disminuir la oxidación y el deterioro por permeabilidad (Salazar Delgado, Métodos de ensayo para la determinación cualitativa y cuantitativa del contenido de polímero presente en ligantes asfálticos modificados, 2013).

La modificación eficaz con el polímero resulta en un sistema termodinámicamente inestable pero cinéticamente estable donde el polímero es parcialmente hinchado por los componentes livianos del asfalto. Las propiedades finales del asfalto modificado son determinadas por las características propias del asfalto y del polímero, así como el contenido de polímero y los procesos de fabricación (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014).

Cuando se utilizan como modificadores de asfalto los polímeros seleccionados, solos o mezclados con asfalto, estos deben (Hasan Iqbal, 2004):

- ser compatibles con el asfalto
- resistir la degradación a temperaturas de mezcla
- mejorar la susceptibilidad a la temperatura
- ser capaces de ser procesados mediante mezcla

- dar lugar a una viscosidad de recubrimiento a temperaturas normales de aplicación
- mantener propiedades de primera calidad durante el almacenamiento, la aplicación y en el servicio cuando se mezcla con asfalto
- ser rentables

Los investigadores han encontrado varios desafíos en el uso de polímeros para la modificación de asfaltos. El alto costo, alta sensibilidad a la temperatura, baja resistencia al envejecimiento, mala estabilidad durante el almacenamiento y la poca mejora en la elasticidad son algunos de los problemas que se presentan. La combinación de oxidación y degradación del asfalto causa propensión al envejecimiento, especialmente en polímeros insaturados. Asimismo, la poca estabilidad de almacenamiento de algunos asfaltos modificados suele ser resultado de la pobre compatibilidad entre el polímero y el asfalto en aspectos como densidad, peso molecular, polaridad y solubilidad. La estructura química y la reactividad de los polímeros, sin embargo, también afectan su compatibilidad con asfalto, lo que puede tener relación directa con las propiedades de la mezcla resultante. Con el fin de superar estos desafíos, los investigadores han intentado diferentes soluciones, tales como saturación, vulcanización de azufre, adición de antioxidantes o minerales de arcilla hidrofóbicas, así como la funcionalización y aplicación de polímeros reactivos (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014).

Los polímeros que se utilizan comúnmente para la modificación de asfalto, se pueden dividir en dos categorías principales: elastómeros y plastómeros. Los elastómeros se caracterizan por una alta respuesta elástica que tiene la capacidad de resistir deformaciones permanentes por el estiramiento y la recuperación de su forma inicial, mientras que los plastómeros contribuyen a formar una red resistente, tridimensional para resistir la deformación cuando se mezcla con asfalto (Cardone, Ferrotti, Frigio, & Canestrari, 2014).

El Cuadro 3.2 muestra los polímeros comúnmente empleados en la modificación de asfaltos y sus principales ventajas y desventajas.

Cuadro 3. 2 Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014).

Categorías	Ejemplos	Ventajas	Desventajas
Plastómeros	Polietileno (PE) Polipropileno (PP)	- Buenas propiedades a altas temperaturas - Costo relativamente bajo	- Poca mejora en la elasticidad - Problemas de separación de fases
	Etil-vinil acetato (EVA) Etil-butil-acrilato (EBA)	- Buena estabilidad al ser almacenado - Alta resistencia a la formación de surcos	- Poca mejora en la recuperación elástica - Poca mejora en propiedades a bajas temperaturas
	Estireno-butadieno-estireno (SBS) Estireno-isopreno-estireno (SIS)	- Aumento en la rigidez - Baja sensibilidad a la temperatura - Mejora de la respuesta elástica	- Problemas de compatibilidad con algunos asfaltos - Baja resistencia al calor, oxidación y radiación ultravioleta - Costo relativamente alto
Elastómeros termoplásticos	Estireno-etileno/butileno-estireno (SEBS)	- Alta resistencia al calor, oxidación y radiación ultravioleta	- Problemas de sensibilidad al ser almacenado - Elasticidad relativamente baja - Alto costo

3.5 Calidad del asfalto modificado

La compatibilidad entre el polímero y el asfalto se basan en las fracciones de asfalto SARA. Un alto contenido de asfaltenos puede llegar a disminuir la compatibilidad entre los materiales. Por su parte, la aromaticidad de los maltenos debe disminuir para alcanzar un buen nivel de compatibilidad (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014).

El control de calidad reológico es una buena técnica para indicar la homogeneidad en la incorporación del polímero y, así, demostrar que las propiedades se modificaron lo suficiente como para obtener resultados finales deseados desde el punto de vista del desempeño asfáltico (Salazar Delgado, 2013).

Al analizar un asfalto modificado, también interesa valorar el potencial de recuperación elástica en condiciones originales y de envejecimiento. Con esto, se busca valorar la capacidad del asfalto para absorber esfuerzos sin presentar fisuras o deformaciones en su estructura (Elizondo Arrieta, Salazar Delgado, & Villegas Villegas, 2010).

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

La caracterización es la determinación de los atributos particulares de un material de modo que permita distinguirlo de los demás. El análisis y caracterización de materiales permite un control adecuado de la calidad para determinar si se cumplen las propiedades deseadas (Faraldos, 2011).

Los ensayos empleados en una caracterización dependen tanto del tipo de material como del objetivo de la investigación.

4.1 Caracterización de polímeros

La caracterización de polímeros permite establecer la calidad del material y determinar propiedades físicas y químicas de los mismos ante distintas condiciones.

A continuación, se especificarán los ensayos empleados en esta investigación para la caracterización del polímero utilizado en la modificación del asfalto.

4.1.1 Análisis termogravimétrico (TGA) – ASTM E2550

El análisis termogravimétrico (TGA) se emplea para medir la cantidad y tasa de cambio de la pérdida de material en función de la temperatura y/o el tiempo bajo condiciones controladas. En general, la técnica es utilizada para determinar la descomposición del material y para predecir su estabilidad térmica a altas temperaturas (Villegas, Aguiar, & Loría, 2012).

Una muestra del material a examinar se coloca en un recipiente inerte del equipo de análisis termogravimétrico y se calienta a una velocidad controlada de 1 °C/min a 20 °C/min bajo una atmósfera controlada. La masa de la muestra se registra continuamente en función del tiempo y/o la temperatura. Cuando la muestra experimenta una reacción o

descomposición térmica implica un cambio de masa, indicándose como una desviación de la línea de base inicialmente establecida del registro de masa (ASTM International, 2011).

4.1.2 Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) – ASTM E1252

La espectrometría infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) es el método más utilizado de espectrometría infrarroja. Este consiste en pasar radiación infrarroja, con longitud de onda conocida, por una muestra de material. Al someter la muestra a esta radiación, parte de la energía es absorbida por la muestra mientras que otra parte es transmitida (Villegas, Aguiar, & Loría, 2012).

La espectrometría infrarroja es sensible a la presencia de grupos funcionales en la molécula que consisten en fragmentos estructurales con propiedades químicas comunes. Esto, permite identificar especies químicas a través de la determinación del número de onda a la que los distintos grupos funcionales presentan bandas de absorción en el espectro infrarrojo. La intensidad de estas bandas puede utilizarse para determinar la concentración de estas especies en la muestra (Faraldos, 2011).

Ningún par de estructuras moleculares únicas pueden producir el mismo espectro, por lo que esta técnica puede ser empleada en la caracterización e identificación de distintos tipos de materiales. De la misma manera, la espectrometría permite verificar la calidad de la muestra al compararse el espectro resultante con espectros de muestras con propiedades definidas y conocidas (Villegas, Aguiar, & Loría, 2012).

4.1.3 Prueba termogravimétrica acoplada a análisis infrarrojo (TGA/FTIR) – ASTM E2105

El ensayo consiste en calentar una muestra en un horno TGA utilizando un perfil de temperatura predeterminado donde la muestra sufre una o más pérdidas de peso. Los materiales gaseosos obtenidos durante estas pérdidas de peso se analizan seguidamente mediante espectroscopia infrarroja para determinar su identidad química o descartar la presencia de alguna sustancia en particular (ASTM International, 2016).

Los gases son transferidos del equipo TGA mediante una línea de transferencia la cual se mantiene caliente para evitar una posible condensación. Luego, pasan a través de una celda dentro del equipo FTIR del cual se obtiene el espectro (Craver & Carraher, 2000).

4.2 Caracterización de asfalto

Para el caso de los asfaltos, se busca que la caracterización brinde información de la calidad y el desempeño del betún (Villegas, Aguiar, & Loría, 2012). La caracterización de asfaltos intenta evaluar la consistencia del asfalto a una o varias temperaturas, así como evaluar propiedades relacionadas con pureza, susceptibilidad al envejecimiento y seguridad mediante la realización de varios ensayos (Salazar Delgado, 2011).

Seguidamente, se detallarán los ensayos empleados en esta investigación para la caracterización del asfalto.

4.2.1 Penetración a 25 °C – ASTM D5

El ensayo consiste en la determinación de la penetración de materiales bituminosos sólidos y semi-sólidos mediante la inserción de una aguja en la muestra bajo condiciones específicas de carga y temperatura (ASTM International, 2013).

Esta prueba permite cuantificar la consistencia del asfalto; a mayores valores de penetración, más suave es la consistencia del asfalto. En general, los asfaltos blandos presentarán penetraciones mayores que los más rígidos (ASTM International, 2013).

4.2.2 Punto de ablandamiento – ASTM D36

La prueba consiste en la determinación del punto de ablandamiento del asfalto en el rango de 30 °C hasta 157 °C, empleando una sistema bola-anillo inmerso en un recipiente con agua destilada (ASTM International, 2014).

Se vierte asfalto fundido en dos anillos metálicos formando discos y se calientan en un baño líquido a una velocidad controlada soportando cada uno una bola de acero. El punto

de ablandamiento se indica como la media de las temperaturas a las que los discos se ablandan lo suficiente permitiendo que cada bola, envuelta en asfalto, baje una distancia de 25 mm (ASTM International, 2014).

Al ser los asfaltos materiales viscoelásticos, estos se vuelven más suaves y menos viscosos a medida que sube la temperatura. Así, el punto de ablandamiento se convierte en un indicativo de la tendencia del material a fluir a temperaturas elevadas encontradas en servicio (ASTM International, 2014).

4.2.3 Punto de inflamación – ASTM D92

El punto de inflamación se obtiene empleando un equipo de copa abierta Cleveland. Este método es aplicable a todos los productos obtenidos del petróleo con puntos de inflamación por encima de 79 °C y por debajo de 400 °C (ASTM International, 2013).

Se llena la copa con muestra, se coloca sobre la plantilla del equipo y se va incrementando la temperatura. El punto de inflamación es la temperatura más baja del líquido a la que la aplicación de una llama de prueba sobre la superficie de la muestra caliente hace que los vapores se inflamen. Para determinar el punto de fuego, la prueba se continúa hasta que la aplicación de la llama hace que la muestra se encienda y sostenga la combustión durante un mínimo de 5 s (ASTM International, 2013).

La prueba de punto de inflamación es un parámetro importante que se emplea en regulaciones de transporte y seguridad ya que permite evaluar el riesgo general de inflamabilidad del material. Este ensayo indica la temperatura mínima a la cual el asfalto empieza a generar vapores potencialmente inflamables, presentando altos riesgos de fuego (Salazar Delgado, 2011).

4.2.4 Ductilidad a 25 °C – ASTM D113

El ensayo de ductilidad mide la capacidad de elongación del asfalto envejecido antes de romperse bajo condiciones controladas. El procedimiento para determinar la ductilidad de

un material es mediante la observación del lugar de rompimiento del material cuando se separan dos extremos de las briquetas que sostienen al material, a una velocidad y temperatura específicas. Un rompimiento en el centro del material denota una ductilidad normal. También, se realiza la medición de la distancia a la que se alargará el material antes de romperse. El ensayo se realiza a una temperatura de $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ y una velocidad de $5\text{ cm/min} \pm 5,0\%$ (ASTM International, 2008).

Normalmente, los asfaltos dúctiles presentan mejores propiedades aglomerantes. Por su parte, los asfaltos con una ductilidad muy elevada son susceptibles a los cambios de temperatura y, por ende, a la deformación (Salazar Delgado, 2011).

4.2.5 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada (TFO) – ASTM D1754

El ensayo se utiliza para determinar los efectos del calor y el aire sobre las propiedades de una película delgada de material asfáltico que se calienta en un horno durante 5 horas a una temperatura de 163 °C . A partir de cambios en propiedades físicas medidas antes y después del tratamiento, se logran determinar estos efectos en la muestra. Algunos de los cambios pueden ser variantes en viscosidad, penetración, masa y/o ductilidad (ASTM International, 2014).

Esta prueba se emplea para evaluar la susceptibilidad al endurecimiento o envejecimiento que presentaría el asfalto durante operaciones de mezclado a las que se ve sometido en la práctica. Esta tendencia del asfalto al endurecimiento o envejecimiento se mide con el análisis del cambio de masa mediante la comparación de la masa inicial de la muestra respecto a la masa luego del calentamiento. Al realizar esta prueba, se puede obtener un resultado con signo negativo que indica pérdida de masa o un dato con signo positivo que indicaría ganancia de masa (Salazar Delgado, 2011).

4.2.6 Viscosidad cinemática a 135 °C– ASTM D2170

Este ensayo permite caracterizar el comportamiento del flujo por medio de la determinación de la viscosidad cinemática de cementos asfálticos a 135 °C (ASTM International, 2010).

Para esto, se mide el tiempo que tarda un volumen establecido de líquido en fluir a través del capilar de un viscosímetro de vidrio calibrado a una temperatura estrechamente controlada. La viscosidad cinemática se calcula entonces multiplicando el tiempo de eflujo en segundos por el factor de calibración del viscosímetro (ASTM International, 2010).

Esta prueba permite analizar el comportamiento del material respecto a la temperatura, lo que permite garantizar condiciones adecuadas de almacenamiento, transporte y bombeo. Asimismo, este parámetro se emplea en el cálculo de temperaturas de mezclado y compactación, junto al ensayo de viscosidad absoluta a 60 °C (Salazar Delgado, 2011).

4.2.7 Viscosidad absoluta a 60 °C – ASTM D2171

Por medio de esta práctica, se obtiene la viscosidad del asfalto utilizando un viscosímetro capilar a vacío a una temperatura de 60 °C. Este método es aplicable a materiales que tienen viscosidades en el intervalo de 0,0036 Pa·s hasta los 20 000 Pa·s (ASTM International, 2010).

Consiste en medir el tiempo que tarda un volumen específico de líquido en ser extraído a través de un tubo capilar por medio de vacío, bajo condiciones de temperatura y vacío controladas. La viscosidad, en Pa·s, se calcula multiplicando el tiempo de flujo en segundos por el factor de calibración del viscosímetro (ASTM International, 2010).

El ensayo permite cuantificar la consistencia del asfalto a una temperatura de 60 °C. Además, se utiliza para analizar el efecto de la temperatura en el comportamiento del material lo que permite establecer el rango de temperaturas para la producción y colocación de mezcla asfáltica (Salazar Delgado, 2011).

4.2.8 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO) – ASTM D2872

La prueba permite medir el efecto del calor y el aire sobre una película en movimiento de materiales asfálticos semisólidos. Para ello, una película de material asfáltico se coloca en movimiento rotatorio constante expuesto a un flujo de aire y se calienta en un horno durante 85 minutos a una temperatura de 163 °C. Para determinar los efectos de este tratamiento, se comparan las mediciones de las propiedades del asfalto antes y después del ensayo (ASTM International, 2012).

Este ensayo simula las condiciones de envejecimiento temprano de un pavimento durante las operaciones de mezclado y compactación. Mediante reología, se miden las propiedades físicas de los ligantes envejecidos en el horno RTFO para determinar la rigidización causada por el envejecimiento (Salazar Delgado, 2011). Este método de ensayo también se puede usar para determinar el cambio de masa el cual que cuantifica la volatilidad del asfalto (ASTM International, 2012).

4.2.9 Viscosidad dinámica rotacional – ASTM D4402

El viscosímetro rotacional caracteriza la rigidez del asfalto a una temperatura determinada. La prueba consiste en un cilindro rotacional coaxial que mide la viscosidad por medio del torque requerido para rotar un eje sumergido en la muestra de asfalto caliente a una velocidad constante (Salazar Delgado, 2011).

Este ensayo es utilizado para medir la viscosidad aparente de los asfaltos en las temperaturas de manipulación, mezclado o aplicación (ASTM International, 2015). Éste garantiza un asfalto que pueda ser bombeado y manejado durante la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente (Salazar Delgado, 2011).

4.2.10 Recuperación Elástica – ASTM D6084

El ensayo se emplea para evaluar la recuperación elástica del asfalto al medir la distancia recuperada después de cortar las muestras de asfalto elongadas una distancia específica. Las muestras se estiran bajo condiciones específicas de velocidad y temperatura, $5 \text{ cm/min} \pm 5 \%$ y $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente (ASTM International, 2013).

Esta prueba es útil en asfaltos modificados ya que permite determinar si se ha añadido un material al asfalto que proporciona una mejora significativa en la elasticidad del asfalto (ASTM International, 2013).

4.2.11 Efecto de envejecimiento a presión (PAV) – ASTM D6521

Posterior al envejecimiento RTFO, se realiza el envejecimiento en un recipiente a alta presión (PAV, por sus siglas en inglés) el cual simula el endurecimiento por envejecimiento después de varios años de servicio (Salazar Delgado, 2011).

Esta prueba simula el envejecimiento acelerado del asfalto por medio de la aplicación de aire a presión y temperatura elevada con el objetivo de simular los cambios en reología que se producen en el asfalto durante el servicio. Los residuos de este ensayo pueden utilizarse para estimar propiedades físicas o químicas del asfalto después de varios años de envejecimiento en el campo (ASTM International, 2013).

El residuo de RTFO se coloca en platos de acero inoxidable y se envejece a la temperatura de acondicionamiento específica durante 20 h en un recipiente presurizado con aire a 2,10 MPa. La temperatura de acondicionamiento se selecciona según el tipo de asfalto (ASTM International, 2013).

4.2.12 Estabilidad a 163 °C – INV E-726-07

Este ensayo permite determinar la estabilidad al almacenamiento que presentan los asfaltos modificados con polímeros. Durante el almacenamiento a temperaturas elevadas, se pueden producir quemado o sedimentación en los asfaltos modificados. Esto provoca que,

después de un tiempo, el asfalto presente mayor cantidad de polímero en la parte inferior o superior del tanque, todo en función de las densidades respectivas. Este fenómeno puede ser causado por una incorrecta dispersión del polímero con el asfalto a la hora del mezclado o por incompatibilidad entre ambos materiales (INVIAS, 2007).

Para esto, se coloca una muestra del ligante modificado en un recipiente metálico que tiene tres válvulas para la toma de muestras en la parte superior, media e inferior. El recipiente lleno se somete a una temperatura elevada de 163 °C durante un tiempo determinado. Al finalizar este tiempo, se toman muestras en los tres puntos del recipiente y se someten a pruebas de punto de ablandamiento u otras que se consideren relevantes para determinar si hay cambios en las características del asfalto que se asemejen más al comportamiento del polímero utilizado para modificar (INVIAS, 2007).

4.2.13 Grado de desempeño (PG)

La clasificación por grado de desempeño PG permite determinar el rango de temperaturas de servicio, máxima y mínima, entre las que el asfalto se desempeña de una manera satisfactoria y es menos susceptible a la deformación y al agrietamiento. Esta clasificación permite seleccionar el asfalto más adecuado para una determinada aplicación, en función del clima predominante en la zona y de la magnitud de tráfico a la que estará sujeto el pavimento en su vida útil (Salazar Delgado, 2011).

Para la obtención de las temperaturas máxima e intermedia de servicio se emplea el reómetro de corte dinámico (DSR) y para la temperatura inferior de desempeño se utiliza el reómetro de vigas de flexión (BBR) (Rodríguez & Salazar, 2015).

4.2.13.1 Módulo de deformabilidad y módulo de fatiga con reómetro de corte dinámico (DSR) – ASTM D7175

Para determinar las temperaturas superior e intermedia de la clasificación PG, se deben medir propiedades fundamentales de rendimiento como esfuerzo y deformación del asfalto a las distintas condiciones que se presentan a lo largo de la vida esperada del pavimento.

La prueba que se utiliza para determinar las propiedades reológicas y caracterizar el comportamiento viscoso y elástico de ligantes asfálticos emplea la medición del módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) mediante el reómetro de corte dinámico (DSR) y la geometría de placas paralelas a temperaturas intermedias y altas. Es aplicable en asfaltos en estado original, envejecidos a corto plazo (RTFO) y envejecidos a largo plazo (PAV) (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

El módulo complejo G^* es una medida de la resistencia total de un material a la deformación cuando se expone a presiones de corte. Este módulo consta de dos componentes: elástico (recuperable) y viscoso (no recuperable). El valor de δ es un indicador de la cantidad relativa de deformación recuperable y no recuperable. Para asfaltos, tanto el valor de G^* como el de δ dependen altamente de la temperatura y la frecuencia de la carga (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

Primero, se coloca la muestra de asfalto entre dos platos paralelos. Durante la prueba, una de las placas paralelas oscilada hacia adelante y hacia atrás con respecto a la otra en frecuencias preseleccionadas y amplitudes de desviación angular. La amplitud requerida depende del valor del módulo complejo de corte del asfalto que se está ensayando y se selecciona de manera que, para la mayoría de los ligantes asfálticos, la prueba esté dentro de la región del comportamiento lineal. La muestra se mantiene a la temperatura de ensayo encerrando las placas superior e inferior en un entorno controlado térmicamente (ASTM International, 2015).

Los valores de G^* y δ se calculan midiendo la respuesta de deformación específica que presenta la muestra al ser sometida a un torque a una temperatura determinada (Salazar Delgado, 2011). Como resultado de la prueba, se reporta como temperatura superior la temperatura a la cual el módulo de deformabilidad $G^*/\sin(\delta)$ es superior o igual a 1,00 kPa para asfalto original o si es superior o igual a 2,20 kPa para asfalto envejecido RTFO. La temperatura intermedia se reporta cuando el módulo de fatiga $G^*\sin(\delta)$ es inferior o igual a 5,00 MPa para asfalto envejecido PAV (Rodríguez & Salazar, 2015).

4.2.13.2 Módulo de rigidez con reómetro de vigas de flexión (BBR) – ASTM D6648

Este ensayo se utiliza para determinar la rigidez y la velocidad de fluencia a temperaturas que representen las más bajas a las que pueda verse expuesto el pavimento en servicio. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003) El equipo donde se realiza el ensayo puede funcionar en el intervalo de temperaturas de -36 °C a 0 °C (ASTM International, 2016).

El reómetro se utiliza para medir la deflexión de una muestra de asfalto sometida a una carga constante aplicada en su punto medio. Se coloca una probeta de asfalto en un baño a una temperatura controlada y se aplica una carga constante ($980 \text{ mN} \pm 50 \text{ mN}$) por 240 s (ASTM International, 2016).

La carga y la deflexión del punto medio de la muestra se controlan en función del tiempo mediante un sistema de adquisición de datos. Con estos datos, se grafica la deflexión contra el logaritmo del tiempo en segundos. Así, los valores de rigidez en fluencia en un tiempo determinado se calculan a partir de la carga aplicada, distancia entre puntos de apoyo, deflexión y ancho y altura de la viga (Rodríguez & Salazar, 2015).

Para obtener la temperatura inferior de la clasificación PG, se grafica el logaritmo de la rigidez en fluencia contra el logaritmo del tiempo. De esa forma, se reporta la temperatura a la que el módulo de rigidez no sobrepasa los 300 MPa y la pendiente a los 60 s sea mínimo 0,300 (Rodríguez & Salazar, 2015).

4.2.14 Resistencia a la fatiga mediante barrido de frecuencia y de amplitud – AASHTO T101

Este ensayo se emplea para determinar la susceptibilidad del asfalto al agrietamiento por fatiga aplicando una carga cíclica a amplitudes de carga linealmente crecientes con el fin de acelerar el daño. La prueba se lleva a cabo utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR) a la temperatura intermedia del pavimento determinada a partir del grado de desempeño (PG) del asfalto (AASHTO, 2014).

El asfalto se envejece utilizando el horno RTFO para simular el envejecimiento a corto plazo de los pavimentos. Adicional a esto, el asfalto puede envejecerse antes de la prueba mediante presión con el horno PAV con el fin de simular el envejecimiento a largo plazo. La muestra se prepara de acuerdo con la metodología del DSR empleando geometría de placas paralelas. Primero, la muestra se prueba usando un barrido de frecuencia para determinar sus propiedades reológicas. Luego, a la muestra se le aplica una serie de ciclos de carga oscilatoria en amplitudes de aumento sistemático a una frecuencia constante para causar daño de fatiga acelerado. El enfoque de daño continuo se utiliza para calcular la resistencia a la fatiga a partir de las propiedades reológicas y los resultados de barrido de amplitud (AASHTO, 2014).

La tasa de acumulación de daños en el material puede utilizarse para indicar el rendimiento de fatiga del asfalto dado las condiciones estructurales del pavimento y la cantidad esperada de carga de tráfico (AASHTO, 2014).

Por medio de este ensayo, se determinan los coeficientes a y b del modelo de vida de fatiga, mostrado en la Ecuación 4.1, el cual permite predecir la vida de fatiga del asfalto a una deformación determinada (LANAMME, 2017):

$$Nf = a(\gamma)^b \quad (4.1)$$

Donde,

Nf = Duración o vida de fatiga del material, ciclos

a = Coeficiente del modelo de vida de fatiga, adim

b = Coeficiente del modelo de vida de fatiga, adim

γ = Deformación aplicada, %

El parámetro a brinda información sobre el número de ciclos que puede soportar el asfalto antes de que ocurra el fallo del material a una amplitud de carga. Este parámetro aumenta conforme disminuye la fisura por fatiga por lo que su resistencia a la fatiga es mayor. A mayores valores de a , menor es el agrietamiento del material en la puesta en práctica. El

parámetro b se relaciona con la habilidad del material resistir a la fatiga. Es deseable que este coeficiente se encuentre en valores cercanos a cero para que el material no presente cambios en susceptibilidad a la fatiga cuando se proporcionan mayores amplitudes de carga aplicada (LANAMME, 2017).

La deformación aplicada permite determinar el desempeño del asfalto con respecto al valor de vida de fatiga. Como se observa en el Cuadro 4.1, según el valor de deformación aplicada, así será la carga de tránsito que pueda soportar el asfalto. Esta carga de tránsito es denominada carga equivalente de eje simple (ESAL) que equivale a 80 kN. Con la ley de fatiga, se puede predecir el comportamiento del asfalto con base en el valor de vida de fatiga (Teymourpour & Bahia, 20014).

Cuadro 4. 1 Clasificación de desempeño por fatiga con base en el valor de deformación aplicada (Teymourpour & Bahia, 20014).

ESAL's (1×10^6)	Clasificación		Deformación aplicada γ (%)
< 3	Estándar	<i>S</i>	$\gamma > 5\%$
3 a 10	Pesado	<i>H</i>	$2,5\% < \gamma < 5\%$
10 a 30	Muy pesado	<i>VH</i>	$\gamma < 2,5\%$

Además, se obtiene la curva de esfuerzo en función de la deformación que permite visualizar propiedades del material como resistencia, ductilidad y tenacidad. Entre más alto sea el pico máximo de la curva, mayor será la resistencia a la tensión o esfuerzo. El material puede soportar mayor deformación entre más bajo el esfuerzo ya que exhibe una mayor ductilidad. Una mayor tenacidad es representada con una mayor área bajo la curva. Si una curva tiene un pico muy alto pero es muy angosta, tiene menor tenacidad respecto a otra curva más gruesa, aun si ésta presenta un pico máximo mucho menor (LANAMME, 2017).

4.2.15 Grado de desempeño plus (PG Plus)

El grado PG no es suficiente para caracterizar de manera adecuada el desempeño de los asfaltos originales y modificados. En ocasiones, el ensayo no permite discernir entre

asfaltos que, aunque cumplen con el grado PG, no presentan un buen desempeño en el pavimento en términos de su vida útil (Sandoval & Cremades, 2013).

Con esta caracterización, no sólo se solicita un grado de desempeño PG para el asfalto, sino que, adicionalmente, se realiza una prueba de recuperación elástica con ductilímetro que predice de mejor forma el comportamiento futuro del asfalto en el pavimento. Esto, mejora la exactitud para predecir el desempeño del asfalto en un pavimento y que éste cumpla con la vida útil diseñada para el mismo (Sandoval & Cremades, 2013).

4.2.15.1 Fluencia y recuperación de esfuerzo múltiple (MSCR) – ASTM D7405

La prueba de fluencia y recuperación de esfuerzo múltiple (MSCR, por sus siglas en inglés) se basa en la determinación del porcentaje de recuperación y la deformación no recuperable del asfalto. Esta prueba se lleva a cabo utilizando el reómetro dinámico de corte a una temperatura específica (ASTM International, 2015).

El ensayo consiste en la medición de propiedades viscoelásticas de un asfalto envejecido en horno RTFO al aplicarle esfuerzos de 100 Pa y 3200 Pa por medio de ciclos de carga y descarga. La preparación de la muestra y el uso del aparato se realizan de acuerdo con la prueba ASTM D7175 (ASTM International, 2015).

La deformación no recuperable es una estimación de la deformación permanente y se define como el porcentaje de deformación unitaria residual de un espécimen luego de ser sometido a un ciclo de carga y recuperación dividido entre el esfuerzo aplicado (Elizondo Arrieta, Salazar Delgado, & Villegas Villegas, 2010).

Este ensayo es utilizado para identificar la presencia de respuesta elástica en un aglutinante y el cambio en la respuesta elástica en dos niveles diferentes de tensión. El cumplimiento de fluencia no recuperable es un indicador de la resistencia de un aglutinante asfáltico a una deformación permanente bajo carga repetido (ASTM International, 2015).

Los valores de deformación no recuperable permiten realizar la clasificación por grado de desempeño PG Plus. Como se observa en el Cuadro 4.2, según el valor de deformación no recuperable, así será la carga de tránsito ESAL que pueda soportar el asfalto. Con esos valores, se puede determinar si el asfalto presentará un buen desempeño entre valores de carga estándar y carga extremadamente pesada (Rodríguez & Salazar, 2015).

Cuadro 4. 2 Clasificación por grado de desempeño PG Plus con base en el valor de deformación no recuperable (Rodríguez & Salazar, 2015).

ESAL's (1 x 10 ⁶)	Clasificación		J_{nr} 3,2 kPa	J_{nr} diff
< 3	Estándar	<i>S</i>	$\leq 4,0 \text{ kPa}^{-1}$	< 75%
3 a 10	Pesado	<i>H</i>	$\leq 2,0 \text{ kPa}^{-1}$	< 75%
10 a 30	Muy pesado	<i>VH</i>	$\leq 1,0 \text{ kPa}^{-1}$	< 75%
>30	Extremadamente pesado	<i>E</i>	$\leq 0,5 \text{ kPa}^{-1}$	< 75%

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Esta investigación tiene como objetivo principal evaluar condiciones de temperatura, tiempo y porcentaje en masa de polímero agregado en la modificación de asfaltos con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos con base en grado de desempeño, reología y propiedades fisicoquímicas.

Para cumplir con el objetivo anterior, se siguió el siguiente método de trabajo:

- 1- Se realizó una caracterización del asfalto original M-1904-16.
- 2- Se realizó una caracterización del plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.
- 3- Se procedió a la elaboración y ejecución del diseño experimental factorial 2^3 empleando tres factores (temperatura, tiempo y porcentaje de polímero agregado) en dos niveles (alto y bajo).
- 4- Se realizó la caracterización de la muestra de asfalto modificado que presentó mejor grado de desempeño PG Plus.

5.1 Materiales

Para el desarrollo de las etapas experimentales del proyecto, se utilizó la muestra M-1904-16 de asfalto grado AC-30 obtenida de RECOPE Moín para el uso del LANAMME. Además, como agente modificante, se emplearon pellets de plástico de proveniente de envases de agroquímicos suministrados por la fundación “Limpiemos Nuestros Campos”.

En el Cuadro 5.1 se indican las propiedades de los materiales empleados y en el Cuadro 5.2 se especifican datos de toxicidad, seguridad y disposición de los residuos.

Cuadro 5. 1 Propiedades de los materiales empleados.

Sustancia	Densidad a 25 °C	Pto. fusión	Pto. ebullición	Pto. inflamación
Asfalto	1 g/cm ³	54-173 °C	470 °C	230 °C
Polietileno de alta densidad	0,97 g/cm ³	120-150 °C	Se descompone	300 °C

Cuadro 5. 2 Propiedades de toxicidad y seguridad de los materiales empleados.

Sustancia	No. CAS	Toxicidad	Seguridad	Disposición de residuos
Asfalto	8052-42-4	Humos irritantes	Inflamable	Se desecha en el recipiente correspondiente para su posterior recolección e incineración.
Polietileno de alta densidad	9002-88-4	Humos irritantes	Polvo inflamable	Se desecha en el recipiente correspondiente para su posterior reciclaje o incineración.

5.2 Equipo

En el cuadro 5.3 se muestran los principales equipos utilizados para el desarrollo de las distintas pruebas experimentales.

Cuadro 5. 3 Equipo utilizado para llevar a cabo el proyecto.

Equipo	Fabricante	Placa	Ámbito	Incertidumbre
Molino	Retsch	342793	(6000 - 18000) rpm	-
Analizador TGA	TA Instruments	315016	T _{amb} - 1200 °C	± 0,1 % ± 1 °C
Espectrofotómetro FTIR	Thermo Scientific	335727	(15 - 27000) cm ⁻¹	± 0,01 cm ⁻¹
Horno de convección forzada	Humboldt	294186	T _{amb} - 232 °C	± 2 °C
Balanza de precisión	Ohaus	348678	(0 - 8100) g	± 0,2 g
Recipiente de mezclado	Rite-Hete	-	-	-
Agitador	IKA	367868	(30 - 2000) rpm	± 3 rpm

Continuación Cuadro 5.3 Equipo utilizado para llevar a cabo el proyecto.

Equipo	Fabricante	Placa	Ámbito	Incertidumbre
Controlador temperatura	Ogden	-	$T_{amb} - 195$ °C	± 2 °C
Balanza analítica	Ohaus	175286	(0 - 210) g	$\pm 0,2$ mg
RTFO	James Cox & Sons Inc.	170233	$T_{amb} - 200$ °C (0 - 100) psi	$\pm 0,5$ °C
PAV	ATS	181176	2,10 MPa (90 - 110) °C	$\pm 0,05$ MPa $\pm 0,5$ °C
TFO	Kohler	206638	$T_{amb} - 180$ °C	± 1 °C
Ductilímetro	Soiltest Inc.	246905	-	-
Agitador magnético	Thomas Scientific	264487	(60 - 1600) rpm	± 2 %
Transformador para resistencia	Warner Electric	174790	-	-
Termómetro 12C	ERTCO	-	(-20 - 102) °C	$\pm 0,2$ °C
Penetrómetro	Labline	C12944	(0 - 390) mm	$\pm 0,1$ mm
Viscosímetro Rotacional	Anton Paar	342797	(-20 - 180) °C (1 - 10 ⁹) mPa·s	-
Copa abierta de Cleveland	Humboldt	141605	-	-
BBR	ATS	294188	(-40 - 25) °C	-
DSR	TA Instruments	238722	(-40 - 195) °C	$\pm 0,1$ °C

5.1 Caracterización del asfalto original

Parte de la caracterización del asfalto original consistió en la recopilación de resultados de ensayos de verificación de calidad realizados por el LANAMME. Los ensayos cuyos resultados fueron recopilados para su uso en esta investigación fueron los siguientes:

- Penetración a 25 °C – *ASTM D5*
- Punto de inflamación – *ASTM D92*

- Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada (TFO) – ASTM D1754
- Viscosidad cinemática a 135°C – *ASTM D2170*
- Viscosidad absoluta a 60 °C – *ASTM D2171*
- Módulo de deformabilidad con reómetro dinámico de corte (DSR) – *ASTM D7175*
- Módulo de deformabilidad de reómetro dinámico de corte a residuo de RTFO – *ASTM D7175*
- Módulo de fatiga con reómetro dinámico de corte a residuo del PAV – *ASTM D7175*

Adicionalmente, se realizaron los siguientes ensayos como parte de la caracterización del asfalto original para complementar la verificación de calidad que realiza el LANAMME:

- Punto de ablandamiento – *ASTM D36*
- Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO) – *ASTM D2872*
- Recuperación Elástica – *ASTM D6084*
- Efecto de envejecimiento a presión (PAV) – *ASTM D6521*

5.1.1 Punto de ablandamiento – ASTM D36

Se sobrellenaron dos anillos con asfalto original fluido. Las pastillas se dejaron enfriar 1 hora y se enrasaron con una espátula caliente para eliminar el exceso. Se llenó hasta la mitad un beaker de 1000 ml con agua destilada, se colocó sobre una plantilla magnética y se le colocó dentro una pastilla agitadora. Se montó dentro del beaker un soporte para anillos acoplado a una resistencia, una placa metálica y un termómetro. Se agregó hielo hasta alcanzar una temperatura de 5 °C. Se colocaron las pastillas y las guías dentro del agua manteniendo la temperatura por debajo de 5 °C. Se calentó el agua por medio de la resistencia a una velocidad de 5 °C/min. Cuando se alcanzó una temperatura de 25 °C, se colocó, sobre cada pastilla de asfalto, un balín de acero de 3,50 g ± 0,5 g. Se continuó

calentando el sistema provocando que los balines empezaran a descender con el asfalto. Se anotó la temperatura a la cual cada balín rodeado de asfalto tocó la placa metálica inferior del soporte.

La Figura 5.1 muestra el montaje del equipo empleado para la determinación del punto de ablandamiento. Este incluye un beaker, un termómetro, una plantilla, una pastilla magnética, una resistencia, placas de soporte y las guías y anillos metálicos.

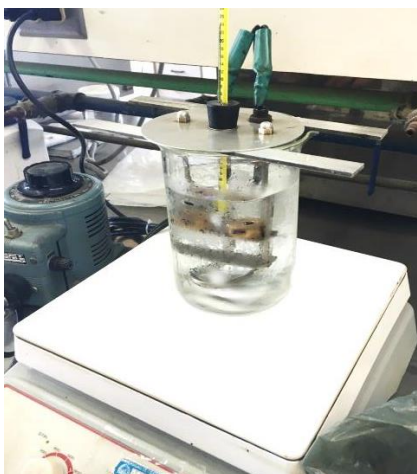


Figura 5. 1 Montaje del equipo para la determinación del punto de ablandamiento (Propio, 2017).

5.1.2 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO) – ASTM D2872

Se calentó el horno por 2 horas a 162,8 °C. Se trasvasaron 35 g \pm 0,5 g de asfalto original en frascos cilíndricos de vidrio y luego se pesaron en balanza analítica para determinar la masa inicial de asfalto. Se colocaron los cilindros en el portamuestras rotatorio dentro del horno y, manteniendo una presión manométrica de 50 psi (aproximadamente 345 kPa), se reguló el flujo de aire a 4 L/min. Las muestras se calentaron por 85 minutos. Una vez pasado el tiempo, los cilindros se pesaron para determinar la masa final de las muestras.

En la Figura 5.2 se muestra el horno de película delgada rotativa vertical empleado en este ensayo.



Figura 5. 2 Horno de película delgada rotativa vertical (Propio, 2017).

5.1.3 Recuperación Elástica – ASTM D6084

Se ajustó la temperatura del baño a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para que éste se estabilizara por una hora y media. Se engrasaron briquetas y se armaron tres moldes. Se sobrellenaron estos moldes con asfalto original fluido y se dejaron enfriar por una hora. Pasado el tiempo, se engrasaron los moldes con una espátula caliente para eliminar el exceso y se colocaron en el baño para que se atemperara el sistema por hora y media. Se colocaron los moldes en posición y se encendió el motor para estirar el asfalto hasta la marca de los 20 cm y se dejó reposar por 5 minutos. El asfalto se cortó por la mitad y se dejó recuperando por una hora. Una vez concluido este tiempo, se midió la distancia entre las dos mitades de asfalto. El baño empleado en esta prueba se muestra en la Figura 5.3.



Figura 5. 3 Baño para la determinación de la recuperación elástica (Propio, 2017).

5.1.4 Efecto de envejecimiento a presión (PAV) – ASTM D6521

En platos metálicos, se trasvasaron $50\text{ g} \pm 0,5\text{ g}$ de asfalto original y se pesaron en balanza analítica para determinar la masa inicial del asfalto. Una vez precalentado el horno, se

colocaron las muestras y se envejecieron las muestras a una presión manométrica de 2,1 MPa y una temperatura de 100 °C por 20 horas. Pasado el tiempo, los platos se pesaron para determinar la masa final del asfalto. La Figura 5.4 muestra el horno empleado para el envejecimiento a presión.



Figura 5. 4 Horno de enjecimiento a presión (Propio, 2017).

5.2 Caracterización del polímero

La caracterización del plástico proveniente de envases de agroquímicos consistió en un análisis termogravimétrico y una espectrometría infrarroja de transformada de Fourier.

Además, al tratarse de plástico reciclado de envases de agroquímicos, se realizó una prueba de termogravimetría acoplada a análisis infrarrojo (TGA/FTIR) como medida de seguridad para determinar la presencia o ausencia de trazas de compuestos riesgosos para la salud.

5.2.1 Análisis termogravimétrico (TGA) – ASTM E2550

Luego de precalentar el equipo, el cual se muestra en la Figura 5.5, se montó una muestra de plástico molido de aproximadamente 10 mg en el portamuestras con aislante y se colocó sobre la balanza de contrapesos. Una vez cerrado el equipo, se procede a calentar la muestra a una tasa de 10 °C/min hasta alcanzar los 992 °C. Durante el ensayo, se registró la curva de calentamiento y pérdida de masa con el software que cuenta el equipo.



Figura 5. 5 Equipo de análisis termogravimétrico, TGA (Propio, 2017).

5.2.2 Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) – ASTM E1252

Se colocó una pequeña cantidad de muestra del plástico molido en el equipo y se realizó la medición del espectro infrarrojo.

El equipo de espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier se muestra en la Figura 5.6.



Figura 5. 6 Equipo de espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) (Propio, 2017).

5.2.3 Prueba termogravimétrica acoplada a análisis infrarrojo (TGA/FTIR) – ASTM E2105

Se acopló el equipo de análisis termogravimétrico al espectrómetro infrarrojo mediante una manguera aislada que mantiene caliente los vapores.

La Figura 5.7 muestra el sistema acoplado que se empleó para este ensayo.



Figura 5. 7 Equipo de prueba termogravimétrica acoplada a espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (Propio, 2017).

Se precalentó el equipo termogravimétrico, se montó una muestra de plástico molido en el portamuestras con aislante y se colocó sobre la balanza de contrapesos. Una vez cerrado el equipo, se procedió a calentar la muestra a una tasa de 5 °C/min hasta alcanzar los 190 °C, después se mantuvo la isoterma de 190 °C por 10 minutos y luego se siguió calentando a una tasa de 10 °C/min hasta alcanzar los 230 °C. Con los gases generados por el calentamiento de la muestra, se procedió a realizar la medición del espectro infrarrojo en 3D (tres dimensiones) en el equipo de espectroscopía infrarroja. Este ensayo se realizó primero con aire y después con una atmósfera inerte de nitrógeno.

5.3 Diseño factorial 2³

Para evaluar las condiciones de temperatura, tiempo y porcentaje en masa de polímero en la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos, se procedió a la elaboración de un diseño experimental factorial 2³ para la preparación y análisis de distintas muestras de asfalto modificado. Se seleccionó un diseño factorial ya que éste permite estudiar de manera eficiente el efecto individual y de interacción de varios factores sobre la variable respuesta.

Se empleó la temperatura, el tiempo y el porcentaje en masa de polímero agregado como factores del diseño factorial en niveles alto y bajo para un total de 8 experimentos distintos; obteniendo como variable respuesta el grado de desempeño PG Plus por duplicado. Otras

variables de diseño establecidas fueron la masa del asfalto y la velocidad de agitación. Además, la temperatura ambiente y presión atmosférica fueron variables independientes o no controlables en el desarrollo del experimento factorial.

El Cuadro 5.4 muestra la matriz del diseño experimental 2^3 empleada para elaborar las distintas muestras de asfalto modificado.

Cuadro 5. 4 Matriz del diseño experimental 2^3 para evaluar condiciones de temperatura, tiempo y porcentaje en masa de polímero en la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.

K	Porcentaje polímero (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Los niveles altos y bajos de cada uno de los factores se seleccionaron preliminarmente con base en investigación bibliográfica, la metodología de modificación de asfaltos del LANAMME y el alcance operacional del equipo disponible. Luego, mediante la realización de numerosas mezclas de asfalto y plástico a distintas temperaturas, tiempos y porcentajes de plástico agregado, se determinaron los niveles altos y bajos de los factores con los cuales la mezcla era relativamente homogénea y se facilitaba la correcta medición de la variable respuesta. El Cuadro 5.5 detalla los valores establecidos para dichos factores.

Cuadro 5. 5 Factores y niveles del diseño experimental 2^3 para la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.

Factores de diseño	Notación	Nivel bajo (-)	Nivel alto (+)
Porcentaje de polímero	A	0,75 %	1 %
Temperatura	B	170 °C	190 °C
Tiempo	C	1 h	4 h

Las muestras de asfalto modificado del diseño experimental se elaboraron adicionando lentamente el plástico previamente molido (malla 35 o 500 μm) a aproximadamente 600 g de asfalto en un sistema de mezclado que consta de un recipiente de calentamiento con control de temperatura y un agitador de dispersión de disco a una velocidad constante de 500 rpm. La Figura 5.8 muestra el equipo empleado para la modificación de asfaltos.



Figura 5. 8 Equipo para modificar asfalto: recipiente de mezclado, agitador y controlador de temperatura (Propio, 2017).

A estas ocho muestras se les realizaron los siguientes ensayos de reología para obtener, por duplicado, el valor de grado de desempeño PG Plus:

- Módulo de deformabilidad con reómetro de corte dinámico (DSR) – *ASTM D7175*
- Módulo de deformabilidad con reómetro de corte dinámico (DSR) al residuo de RTFO – *ASTM D7175*
- Fluencia y recuperación de esfuerzo múltiple (MSCR) al residuo de RTFO – *ASTM D7405*

En la Figura 5.9 se muestra el reómetro utilizado para la realización de los ensayos anteriores para la muestra de asfalto modificado.



Figura 5. 9 Reómetro de corte dinámico (Propio, 2017).

5.4 Caracterización del asfalto modificado

Posteriormente, se procedió a caracterizar a la muestra de asfalto modificado que presentó mayor grado de desempeño PG Plus en el experimento factorial anterior.

Para ello, se realizaron los siguientes ensayos:

- Punto de ablandamiento – *ASTM D36*
- Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada (TFO) – *ASTM D1754*
- Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO) – *ASTM D2872*
- Recuperación Elástica – *ASTM D6084*
- Efecto de envejecimiento a presión (PAV) – *ASTM D6521*
- Estabilidad a 163 °C *INV E-726-07*
- Punto de ablandamiento a residuo de estabilidad a 163 °C – *ASTM D36*
- Ductilidad A 25 °C al residuo de TFO – *ASTM D113*

Por cuestiones de seguridad, manejo de equipo especializado y política del laboratorio, los siguientes ensayos fueron realizados por personal técnico y calificado del LANAMME. Los resultados de estos ensayos se recopilaron para su posterior uso en esta investigación:

- Penetración a 25 °C – *ASTM D5*
- Punto de inflamación – *ASTM D92*
- Viscosidad dinámica rotacional a 60°C – *ASTM D4402*
- Viscosidad dinámica rotacional a 135°C – *ASTM D4402*
- Módulo de rigidez con reómetro de vigas de flexión a residuo de PAV (BBR) – *ASTM D6648*
- Fatiga – *AASHTO T101*
- Penetración a 25 °C a TFO – *ASTM D5*
- Viscosidad dinámica rotacional a 135°C a residuo de TFO – *ASTM D4402*

5.3.1 Punto de ablandamiento – ASTM D36

Para la determinación del punto de ablandamiento del asfalto modificado, se siguieron los mismos pasos que para el asfalto original. Se montaron dos anillos llenos de asfalto modificado en el soporte dentro del beaker manteniendo la temperatura del agua por debajo de 5 °C. Se empezó a calentar el agua a una velocidad de 5 °C/min y, una vez alcanzados los 25 °C, se colocó un balín de acero sobre cada pastilla de asfalto. Se continuó calentando el sistema provocando que los balines empezaran a descender con el asfalto y se anotó la temperatura a la que cada balín rodeado de asfalto tocó la placa metálica inferior del soporte.

5.3.2 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada (TFO) – ASTM D1754

Se precalentó el horno por 2 horas a 163 °C. Se trasvasaron 50 g ± 0,5 g de asfalto modificado en platos metálicos y luego se pesaron en balanza analítica para determinar la masa inicial del asfalto. Se colocaron los platos dentro del horno en el portamuestras rotatorio y se calentaron por 5 horas. Una vez pasado el tiempo, los platos se pesaron para determinar la masa final de las muestras.

La Figura 5.10 muestra el horno de película delgada rotatorio horizontal empleado en esta prueba.



Figura 5. 10 Horno de película delgada horizontal (Propio, 2017).

5.3.3 Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO) – ASTM D2872

El ensayo para asfalto modificado se realizó de la misma manera que para el asfalto original. Se colocaron los cilindros con $35 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ de asfalto modificado dentro del horno precalentado a $162,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Se ajustó un flujo de aire a 4 L/min y se calentaron las muestras por 85 minutos. Una vez pasado el tiempo, se pesaron los cilindros para determinar la masa final de las muestras.

5.3.4 Recuperación Elástica – ASTM D6084

Se colocaron tres moldes, esta vez con asfalto modificado fluido, en el baño. Se atemperó el sistema y se encendió el motor para estirar el asfalto hasta la marca de los 20 cm y se dejó reposar por 5 minutos. El asfalto se cortó por la mitad y se dejó recuperando por una hora. Una vez concluido este tiempo, se midió la distancia entre las dos mitades.

5.3.5 Efecto de envejecimiento a presión (PAV) – ASTM D6521

Se trasvasó asfalto modificado en platos metálicos. Conociendo la masa inicial del asfalto, se envejecieron las muestras a una presión de 2,1 MPa y una temperatura de 100 °C por 20 horas. Pasado el tiempo, se pesaron los platos para determinar la masa final del asfalto.

5.3.6 Estabilidad a 163 °C – INV E-726-07

El asfalto modificado se colocó en una columna de estabilidad que tiene tres válvulas a distintas alturas de la columna, como se muestra en la Figura 5.11. Se tapó la columna y se metió en un horno a 163 °C. Pasadas 48 horas, se tomaron y rotularon muestras del asfalto modificado de cada una de las válvulas de la columna y se volvió a meter la columna en el horno a la temperatura anterior. Luego, pasados 6 días, se tomaron y rotularon otros tres residuos de asfalto correspondientes a las tres válvulas de la columna. Posteriormente, a todas estas muestras se les procedió a realizar el ensayo de determinación de punto de ablandamiento.



Figura 5. 11 Columna de estabilidad (Propio, 2017).

5.3.7 Punto de ablandamiento a residuo de estabilidad a 163 °C – ASTM D36

A todos los residuos de la prueba de estabilidad, se les realizó la determinación de punto de ablandamiento, para un total de seis pruebas de punto de ablandamiento. En cada caso, se montaron dos pastillas de asfalto dentro del beaker. Con el agua por debajo de 5 °C, se

calentó el sistema a una velocidad de 5 °C/min y a los 25 °C se colocó un balín de acero sobre cada pastilla. Se continuó calentando y se anotó la temperatura a la que cada balín tocó la placa metálica inferior del soporte.

5.3.8 Ductilidad a 25 °C al residuo de TFO – ASTM D113

Para el ensayo de ductilidad, se utilizó el mismo baño de recuperación elástica. Se estabilizó el baño a una temperatura de $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ por una hora y media. Se engrasaron varias briquetas y se armaron tres moldes de ductilidad. Se sobrellenaron estos moldes con asfalto modificado fluido y se dejaron enfriar por una hora. Pasado este tiempo, se engrasaron los moldes con una espátula caliente para eliminar el exceso y se colocaron en el baño por hora y media. Los moldes se colocaron en posición y se encendió el motor para estirar el asfalto hasta que se produce la ruptura de cada muestra. Finalmente, se midió cada distancia a la que se estiraron las muestras para producir su ruptura.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Caracterización del asfalto original

Para la caracterización del asfalto original M-1904-16, se realizó una recopilación de los resultados de distintos ensayos de verificación de calidad que efectuó el LANAMME como parte del protocolo estándar del laboratorio para la caracterización de asfaltos.

Con los resultados de esta verificación, el LANAMME determinó una clasificación AC-30 por grado de viscosidad para el asfalto M-1904-16 con un grado de penetración de 50-60 con base en los límites de la norma ASTM D3381. La caracterización obtenida es típica de los asfaltos importados por RECOPE. El Cuadro 6.1 muestra los datos más relevantes de esta caracterización cuyos resultados completos se encuentran en el Anexo 1 de esta investigación.

Cuadro 6. 1 Caracterización del asfalto original M-1904-16 realizada por el LANAMME.

Ensayo	Resultado	Unidades
Viscosidad absoluta a 60 °C	316,6	Pa·s
Viscosidad cinemática a 135 °C	520	mm ² /s
	0,5361	Pa·s
Penetración a 25 °C	55	1/10 mm
Punto de inflamación	354	°C
Efecto de calentamiento y ventilación en película delgada horizontal (TFO)	-0,03	%
Ductilidad a 25 °C al residuo de TFO	100	cm

A una temperatura de 60 °C, el asfalto M-1904-16 presentó una viscosidad absoluta de 316,6 Pa·s lo que le indica que es un asfalto AC-30 con base en la clasificación por grado de viscosidad. La muestra presentó, además, una viscosidad cinemática de 520 mm²/s a una temperatura 135 °C, que multiplicada por la densidad del fluido (1,031 g/cm³)

corresponde a una viscosidad de 0,5361 Pa·s. En cuanto a la consistencia del asfalto, se obtuvo una penetración de 55 1/10 mm a una temperatura de 25 °C, cumpliendo así el límite mínimo de 50 1/10 mm que debe tener un asfalto con clasificación AC-30. En el ensayo de punto de inflamación, se determinó que el asfalto original empieza a generar vapores potencialmente inflamables a una temperatura mínima de 354 °C. Adicionalmente, la muestra de asfalto original presentó un cambio de masa por pérdida de compuestos volátiles correspondiente a un 0,03% del total de la muestra en el horno TFO. Una vez envejecido, a esta muestra se le realizó la prueba de ductilidad, donde se alcanzaron los 100 cm de capacidad máxima de elongación del ductilímetro, lo que indica una ductilidad normal.

Adicionalmente, se realizaron otra serie de ensayos como parte de la caracterización del asfalto original para complementar la verificación de calidad del LANAMME. El cuadro 6.2 muestra los resultados obtenidos.

Cuadro 6. 2 Ensayos adicionales de caracterización del asfalto original M-1904-16.

Ensayo	Resultado	Unidades
Punto de ablandamiento	48,1	°C
Recuperación Elástica	8,8	%
Efecto de calentamiento y ventilación en película delgada rotativa (RTFO)	-0,08	%
Envejecimiento a presión (PAV)	0,46	%

El punto de ablandamiento del asfalto M-1904-16 se obtuvo a una temperatura de 48,1 °C. En cuanto a recuperación elástica, el asfalto original en estudio mostró un porcentaje de recuperación del 8,8 % lo que indica que el asfalto mantiene un 92,2 % del tamaño al que es estirado.

Con respecto al cambio de masa en las pruebas de envejecimiento, la muestra de asfalto presentó una pérdida de 0,08 % de la masa total en el horno RTFO y un aumento de 0,46 % en el recipiente PAV. La disminución de masa en el RTFO se da por pérdida significativa de compuestos volátiles mientras que el aumento en el PAV se da porque la

muestra, que contiene un bajo porcentaje de compuestos volátiles posterior a la prueba RTFO, tiende a ganar peso por la reacción con el oxígeno.

Luego, se realizó la caracterización por grado de desempeño PG mediante la medición con el reómetro de corte dinámico del módulo complejo y el ángulo de fase para el asfalto original y los residuos del horno RTFO y PAV. En el Cuadro 6.3 se muestran los datos de esta caracterización.

Cuadro 6. 3 Caracterización por PG del asfalto original M-1904-16.

Ensayo	Temperatura (°C)	Parámetro	Valor	Unidades
Módulo de deformabilidad	64	$G^*/\text{sen}(\delta)$	1,7757	kPa
Módulo de deformabilidad a residuo de RTFO	64	$G^*/\text{sen}(\delta)$	4,3061	kPa
Módulo de fatiga a residuo de PAV	22	$G^*\text{sen}(\delta)$	5 598,60	kPa
Módulo de rigidez	-22	Rigidez	118,6811	MPa

Con los datos del asfalto original y la muestra envejecida con el RTFO, se establece una temperatura superior de grado de desempeño de 64 °C. Se obtuvo una temperatura intermedia de 22 °C con el análisis de la muestra envejecida en el horno PAV y una temperatura inferior de -22 °C mediante el estudio del valor de rigidez con el BBR.

Es así, como el asfalto original M-1904-16 recibe una clasificación PG 64-22. Esto indica que, para que el asfalto tenga un desempeño adecuado en su tiempo de servicio, éste debe estar expuesto a una temperatura de pavimento no mayor a los 64 °C ni inferior a los -22 °C.

Por último, se realizó una caracterización por grado de desempeño PG Plus mediante el análisis de la variable de deformación no permanente $J_{nr\ 3,2}$. En el Cuadro 6.4 se observa el resultado de deformación no permanente de la muestra y la clasificación correspondiente de PG Plus.

Cuadro 6. 4 Caracterización por PG Plus del asfalto original M-1904-16.

Parámetro	Resultado	Unidades	Clasificación PG Plus
$J_{nr\ 3,2}$	1,94	kPa^{-1}	<i>H</i>

El cuadro anterior señala que el asfalto original M-1904-16 obtuvo una clasificación *H* referida a un tránsito pesado entre los 3 y 10 millones de ejes equivalentes. Así, se complementa la clasificación anterior del asfalto como PG 64-22 *H*.

6.2 Caracterización del polímero

Como parte de la caracterización del plástico, se efectuó una espectroscopía infrarroja para determinar el tipo de polímero que conforma los envases de agroquímicos utilizados en la modificación del asfalto M-1904-16. En la Figura 6.1 se muestra el espectro obtenido.

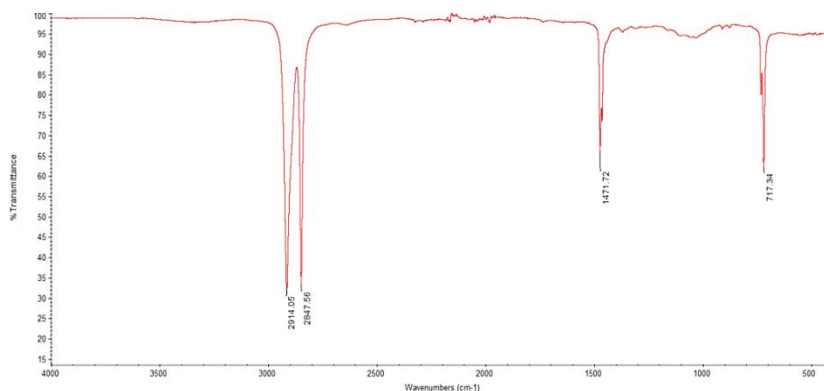


Figura 6. 1 Espectro infrarrojo de la muestra de plástico de envases de agroquímicos obtenido del espectrofotómetro Thermo Scientific. (Propio, 2016)

En el lado izquierdo del espectro, se encuentran dos bandas intensas con un alto número de onda. La primera a $2\ 914,05\ cm^{-1}$ se refiere al estiramiento asimétrico de CH_2 mientras que la segunda banda a $2\ 847,56\ cm^{-1}$ se debe al estiramiento simétrico de CH_2 . En el centro hacia la derecha se observa una banda menos intensa a $1\ 471,72\ cm^{-1}$ que se debe a la flexión de CH_2 alifático. Al lado derecho del espectro, se presenta otra banda a $717,34\ cm^{-1}$ referida al balanceo de CH_2 que indica la presencia de cadenas de $(CH_2)_n$ con $n \geq 4$. Estas cuatro bandas son características del polímero termoplástico denominado polietileno cuya estructura se basa en largas cadenas del monómero CH_2 .

Considerando que el polímero comúnmente utilizado para envases plásticos de agroquímicos es el polietileno de alta densidad, se podría incluso establecer que la figura anterior se refiere a ese polietileno. Al tener el material una densidad y dureza mayor, se le atribuye la relativamente alta intensidad que presenta la banda $717,34\text{ cm}^{-1}$ a un mayor empaquetamiento y cristalización, esto en comparación con la absorción que, teóricamente, presenta una muestra de polietileno de baja densidad a ese número de onda.

Luego, se realizó un análisis termogravimétrico para medir la variación de la masa de una muestra de plástico reciclado con el aumento gradual de la temperatura, esto con el fin de determinar el comportamiento del material a altas temperaturas y establecer la temperatura de descomposición del mismo. La muestra, con una masa inicial de 16,6571 mg, se calentó a una tasa constante de 10 °C/min iniciando a los $38,61\text{ °C}$ hasta alcanzar una temperatura máxima de 992 °C , establecida previamente. La Figura 6.2 muestra el gráfico obtenido para el plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.

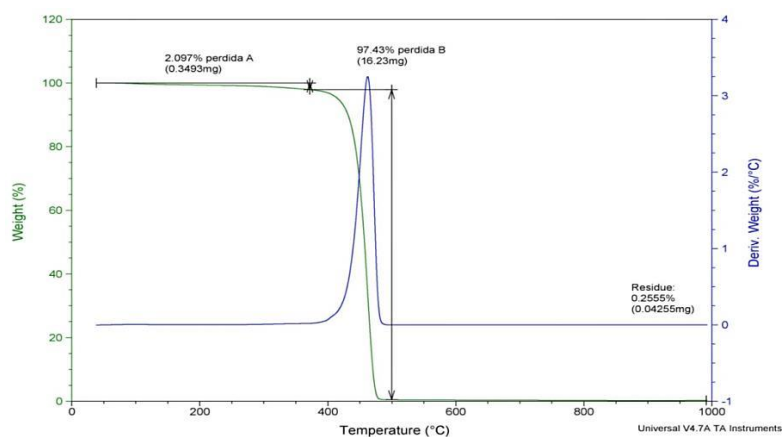


Figura 6. 2 Termograma del plástico de envases de agroquímicos obtenido del analizador termogravimétrico TA Instruments (Propio, 2016).

La curva verde corresponde al termograma del plástico. En ésta, se puede observar que la primera pérdida de masa sufrida por la muestra es de 0,3493 mg cerca de los 100 °C , lo cual representa una disminución del 2,097 % de la masa total inicial. Este cambio se relaciona principalmente con la pérdida de agua que se encuentra en la superficie u ocluida

en el material. Luego, se observa una segunda pérdida de 16,23 mg que ocurre a partir de los 375 °C hasta cerca de los 500 °C. Este cambio significativo en la masa equivale a una pérdida del 97,43 % del total de masa inicial. Así, queda una masa residual de 0,04255 mg por sustancias que no son capaces de sufrir una degradación aún a temperaturas elevadas. Este residuo representa apenas el 0,2555 % del total de la muestra por lo que el cambio de masa total de la muestra es de 99,74 %.

La curva azul representa la derivada de la masa en función de la temperatura por lo que el área bajo esta curva es proporcional al cambio en la masa total. Esta curva permite identificar con mayor facilidad la temperatura a la cual ocurre la descomposición máxima ya que es representada por el punto de inflexión de la misma. En este caso, el punto de inflexión se encuentra cerca de los 460 °C lo que indica que la degradación de la mayoría de los componentes de la muestra se da a esta temperatura.

Este ensayo permite predecir el comportamiento que va a presentar el plástico al emplearse en la modificación de asfaltos a altas temperaturas. Como las temperaturas de mezclado no superan los 200 °C, el plástico no se va a descomponer durante el mezclado con asfalto ya que no se va a alcanzar la temperatura de 460 °C a la que se da la degradación máxima del material. Es por esto, que se puede esperar un comportamiento relativamente normal, sin cambios de masa significativos, al exponer el material a altas temperaturas.

A pesar de que los envases de agroquímicos que facilitó la fundación “Limpiemos Nuestros Campos” son sometidos a una limpieza de triple lavado, se realizó el ensayo de termogravimetría acoplado a análisis infrarrojo como prueba de seguridad adicional para identificar o descartar la presencia de sustancias peligrosas en los vapores que se podrían generar al calentar el plástico a altas temperaturas en la mezcla con el asfalto. Los gases obtenidos del calentamiento de la muestra en el horno TGA se pasaron por el espectrofotómetro para obtener espectros infrarrojos en tres dimensiones (3D). Al añadir la variable tiempo, los espectros 3D permiten observar con mayor facilidad y detalle si se da la presencia de algún compuesto durante algún momento de la prueba.

Primero, se procedió a calentar la muestra hasta alcanzar los 190 °C que es la temperatura máxima que alcanza el equipo de modificación de asfaltos del LANAMME. Se mantuvo en 190 °C por 10 minutos y luego se siguió calentando hasta alcanzar una temperatura de 230 °C. La Figura 6.3 muestra el espectro 3D obtenido al calentar la muestra bajo una atmósfera de aire y la Figura 6.4 se obtuvo realizando el mismo ensayo en una atmósfera inerte para descartar cualquier efecto del aire y sus compuestos al momento de la prueba.

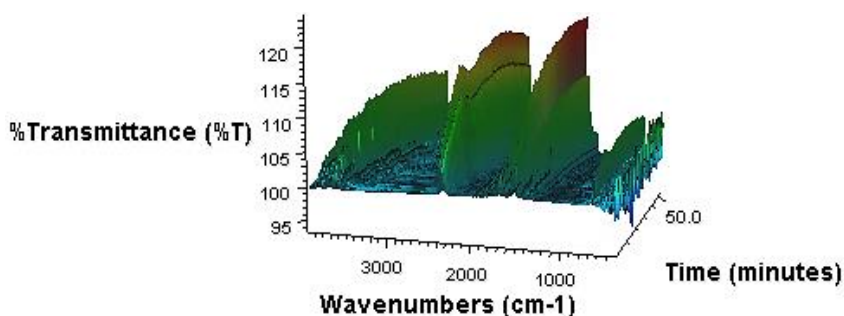


Figura 6. 3 Espectro infrarrojo 3D de gases del TGA del calentamiento de plástico de envases de agroquímicos en atmósfera de aire obtenido del espectrofotómetro Thermo Scientific (Propio, 2017).

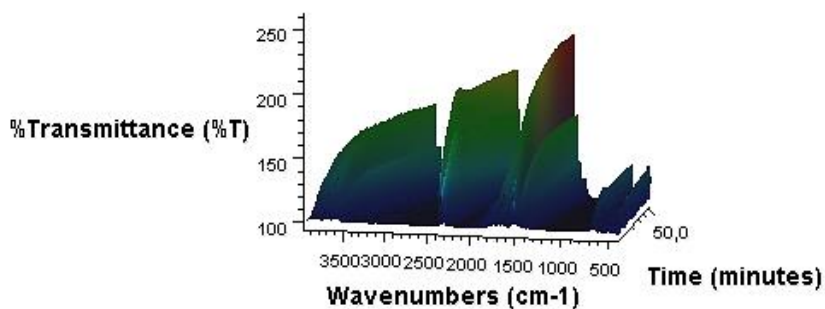


Figura 6. 4 Espectro infrarrojo 3D de gases del TGA del calentamiento de plástico de envases de agroquímicos en atmósfera inerte obtenido del espectrofotómetro Thermo Scientific (Propio, 2017).

En ambas figuras, no se observa la presencia de ninguna banda entre 0% y 100% de transmitancia por lo que no hay evidencia de materiales peligrosos en los gases expedidos por el plástico. Cabe señalar que las bandas que se observan por arriba del 100% de transmitancia se deben únicamente al cambio respecto al *background* o ambiente que

genera la humedad adicional que está aportando la muestra al calentarse. Así, se puede señalar como seguro el uso del plástico de envases de agroquímicos de la fundación “Limpiemos Nuestros Campos” en la modificación de asfaltos.

6.3 Diseño factorial 2³

Antes de proceder a la elaboración de las muestras de asfalto modificado para el diseño factorial 2³, se realizó la selección de los niveles altos y bajos de las condiciones variables de mezclado: porcentaje en masa del polímero, temperatura y tiempo.

El asfalto no posee un punto de fusión definido. En su lugar, por su naturaleza viscoelástica, la literatura indica un rango de temperaturas que va desde que el asfalto comienza a ablandarse, cerca de los 50 °C, hasta considerarse completamente fluido, cerca de los 170 °C (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2003). Debido a esto, se seleccionó 170 °C como nivel bajo para la variable de temperatura de mezcla garantizando así fluidez del asfalto. En esta elección se considera además que el polietileno de alta densidad se funde a 150 °C, esto para asegurar que ambos materiales se puedan incorporar con mayor facilidad.

De acuerdo con la bibliografía, al aumentar la temperatura de mezcla se acelera la interacción entre el polímero y el asfalto por lo que se busca que el nivel alto sea la temperatura más elevada posible, siempre y cuando no se alcancen temperaturas de descomposición tanto del polímero como del asfalto (Garnica, Delgado, Gómez, & González, 2004). Se seleccionó 190 °C como el nivel alto debido a la limitante del equipo de mezclado de alcanzar temperaturas superiores que se mantengan estables durante todo el tiempo de mezcla.

La selección de un tiempo de mezclado adecuado debe garantizar, principalmente, una distribución homogénea del polímero en la matriz asfáltica. A su vez, deben evitarse tiempos de mezclado prolongados que, acompañados de altas temperaturas, produzcan

envejecimiento o degradación del asfalto así como mayores costos en electricidad, desgaste de equipos y largas jornadas laborales.

Investigaciones anteriores emplean tiempos entre 1 y 2 horas para materiales como SBR y EVA, obteniendo resultados favorables en cuanto a homogeneidad de la mezcla. Por recomendación de personeros del LANAMME, finalmente se emplearon 1 hora y 4 horas como niveles bajo y alto respectivamente, considerados tiempos adecuados de mezcla. Pruebas posteriores de la presente investigación confirman que, junto a las otras variables seleccionada del diseño factorial, se obtienen mezclas homogéneas con estos tiempos.

Para establecer el nivel alto de porcentaje en masa del polímero, se elaboraron muestras de asfalto modificado con distintas cantidades de plástico para determinar el porcentaje máximo que resulta en una mezcla homogénea. La homogeneidad de la mezcla es una condición fundamental para la realización de distintas metodologías de análisis debido a que, si las muestras presentan diferencias significativas de concentración del polímero a lo largo de la matriz asfáltica, se podrían generar resultados poco precisos.

La primera muestra se elaboró con 1,5 % de polímero respecto a una masa total de asfalto de aproximadamente 600 g. Se utilizaron los niveles bajos de las condiciones de tiempo y temperatura de mezclado, 1 hora y 170 °C respectivamente, para así emplear los niveles que, teóricamente, tienden a dificultar la interacción entre el asfalto y el polímero. La Figura 6.5 muestra la presencia de grumos en la mezcla resultante que indica que el plástico no logró incorporarse al asfalto.



Figura 6. 5 Muestra de asfalto modificado con plástico de envases de agroquímicos al 1,5 % que presenta mala incorporación del polímero a la matriz asfáltica (Propio, 2016).

Se procedió a realizar una segunda prueba disminuyendo el porcentaje a 1,1 % bajo las mismas condiciones de mezclado anteriores obteniendo como resultado una muestra con problemas de aglomeración similares a los de la muestra anterior, como se observa en la Figura 6.6.



Figura 6. 6 Muestra de asfalto modificado con plástico de envases de agroquímicos al 1,1 % que presenta mala incorporación del polímero a la matriz asfáltica (Propio, 2016).

Bajo las mismas condiciones de mezclado, se realizó una tercera muestra de prueba al 1 % dando como resultado una mezcla en apariencia homogénea, como se observa en la imagen a) de la Figura 6.7. Para verificar lo anterior, se tomó un poco de la muestra con una espátula y se cubrió una sección de una servilleta limpia. Como se observa en la imagen b) de la Figura 6.7, la servilleta ayuda a comprobar que la mezcla es relativamente homogénea ya que no hay presencia de grumos ni de plástico dissociado. Esto evidencia una buena incorporación del material al asfalto y, a su vez, permite seleccionar a 1% como el nivel alto de la variable del presente diseño.

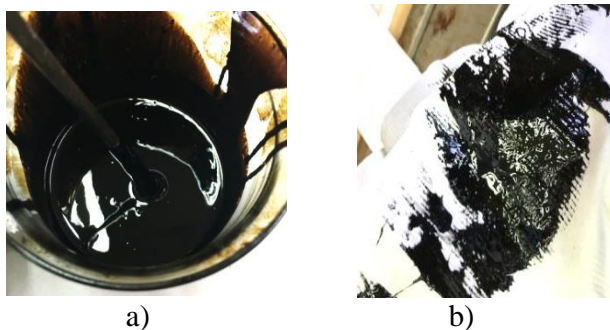


Figura 6. 7 a) Muestra de asfalto modificado al 1 % que presenta buena incorporación del polímero a la matriz asfáltica. b) Servilleta con asfalto modificado al 1 % que indica la no presencia de grumos en la mezcla (Propio, 2016).

Cabe mencionar que la homogeneidad de la mezcla también queda demostrada con los resultados de PG y PG Plus del diseño factorial que se presentan más adelante. Los ensayos realizados con mezclas heterogéneas tienden a presentar valores fuera de los rangos normales o que no cumplen con el principio de repetitividad. Estas variaciones indican que algunos de los resultados obtenidos corresponden a mediciones realizadas solamente al modificante y no al total de la mezcla. En este caso, al obtenerse valores por duplicado que se encuentran dentro del rango característico de clasificación de los asfaltos modificados, se puede comprobar nuevamente la homogeneidad de la mezcla.

Para seleccionar el nivel bajo de porcentaje de polímero, se elaboraron muestras a distintos porcentajes hasta determinar una relación mínima entre asfalto y plástico cuya clasificación PG Plus fuera mayor a la estándar. Esto se realizó con la intención de no elegir simplemente un porcentaje bajo sino uno en el cual se evidencie el efecto generado por la adición de polímero en el asfalto y, así, evitar cantidades de plástico tan pequeñas cuyo efecto se pierde en la totalidad del asfalto.

En el Cuadro 6.5 se presentan los resultados de $J_{nr\ 3,2}$ y la correspondiente clasificación PG Plus de cada muestra que se obtuvo al efectuar la prueba MSCR a una temperatura de 70 °C previamente determinada con el reómetro dinámico de corte.

Cuadro 6. 5 Clasificación de grado de desempeño PG Plus de las muestras a distintos porcentajes de polímero.

Variable	Porcentaje de polímero (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,75
$J_{nr\ 3,2}$ (kPa ⁻¹)	2,40	2,23	2,02	1,70
Clasificación PG Plus	S	S	S	H

Las mezclas con porcentajes en masa de polímero de 0,5 %, 0,6 % y 0,7 % presentaron una clasificación *S* o estándar de grado de desempeño PG Plus. Fue hasta la muestra de 0,75 % que se obtuvo una clasificación *H* referida a tránsito pesado. Al presentar esta muestra una mejora respecto a la clasificación estándar, se elige 0,75 % como nivel bajo de la variable.

Una vez seleccionados los niveles altos y bajos, se procedió a elaborar las ocho muestras del diseño factorial a las cuales primero se les realizó mediciones de módulo complejo y ángulo de fase con el reómetro de corte dinámico. Para determinar la temperatura superior de grado de desempeño PG de cada experimento, se tomó la temperatura del asfalto modificado en condición original para la cual la relación $G^*/\sin(\delta)$ fue superior o igual a 1,00 kPa. El Cuadro 6.6 presenta estos resultados de temperatura superior de grado de desempeño para los distintos experimentos del diseño.

Cuadro 6. 6 Resumen de resultados de temperatura superior PG del diseño experimental 2^3 para la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos

K	Porcentaje polímero (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Temperatura superior PG (°C)
1	-	-	-	76
2	+	-	-	76
3	-	+	-	76
4	+	+	-	76
5	-	-	+	70
6	+	-	+	76
7	-	+	+	82
8	+	+	+	76

En el cuadro anterior, se observa que la muestra del experimento 7 es la que presenta una temperatura superior de grado de desempeño mayor al resto de los experimentos. Esto permite clasificar a la muestra como un asfalto PG-82, siendo éste un valor superior al PG-64 que presenta la muestra de asfalto original. Lo anterior indica que el asfalto, modificado a las condiciones del experimento 7, presenta menor susceptibilidad a la deformación que el asfalto original y un desempeño satisfactorio hasta los 82 °C.

Para complementar la clasificación de grado de desempeño PG para caracterizar de manera adecuada el desempeño de los asfaltos en términos de cargas y flujo vehicular, se recurre a los resultados de la prueba MSCR para medir la susceptibilidad del asfalto a deformarse o recuperarse elásticamente luego de la aplicación de un esfuerzo. El ensayo MSCR se

realizó como parte de la clasificación PG Plus con el fin de obtener valores de deformación no recuperable a 3,2 kPa que constituyen la variable respuesta del diseño factorial en estudio. Cabe señalar que se utilizó 64 °C como temperatura de prueba para que los datos fueran comparables con los obtenidos para el asfalto original. El Cuadro 6.7 resume los resultados obtenidos para las ocho muestras.

Cuadro 6. 7 Resumen de resultados de deformación no recuperable PG Plus del diseño experimental 2^3 para la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.

K	A	B	C	$J_{nr3,2}$ (kPa ⁻¹)		
				1	2	Promedio
1	-	-	-	0,70	0,74	0,72
2	+	-	-	1,10	1,20	1,15
3	-	+	-	1,00	0,98	0,99
4	+	+	-	0,59	0,73	0,66
5	-	-	+	1,28	1,32	1,30
6	+	-	+	0,99	1,00	1,00
7	-	+	+	0,58	0,58	0,58
8	+	+	+	0,66	0,67	0,67

Antes de proceder a analizar los resultados anteriores, el diseño factorial, como modelo estadístico, debe cumplir con ciertos supuestos para poder dar como válidas las conclusiones que se realicen en la interpretación de sus resultados. En general, los modelos factoriales suponen que la variable respuesta se distribuye de forma normal y con varianza constante y, además, que las mediciones fueron realizadas de forma aleatoria e independiente entre sí. Para verificar los supuestos del diseño factorial 2^3 de la presente investigación, se realiza un análisis de gráficas de residuos obtenidas mediante el empleo del software Minitab 17.

La Figura 6.8 muestra los resultados de la probabilidad normal donde se observa que los residuos se ajustan a la recta. Por su parte, el histograma de la Figura 6.9 muestra una forma de campana simétrica característica de la distribución normal. Con ambas figuras, se logra comprobar el supuesto de normalidad del modelo.

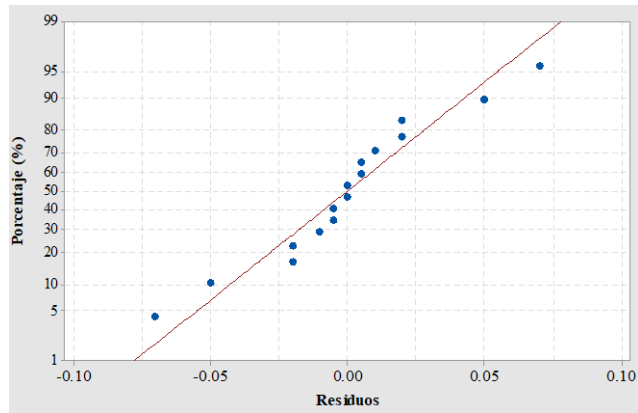


Figura 6. 8 Gráfica normal de residuos obtenido de Minitab 17 (Propio, 2017).

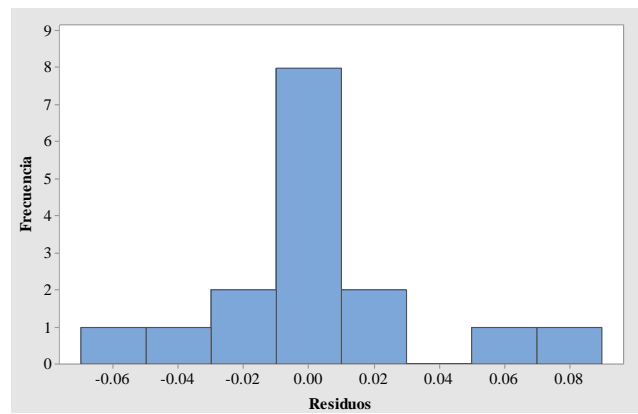


Figura 6. 9 Histograma de residuos obtenido de Minitab 17 (Propio, 2017).

Para verificar el cumplimiento del supuesto de varianza constante, se emplea la gráfica de ajuste residual que muestra los residuos contra los valores ajustados o predichos por el modelo. Como se ve en la Figura 6.10, los residuos se distribuyen de manera aleatoria y no muestran ningún patrón definido, lo cual indica que los tratamientos tienen una varianza similar.

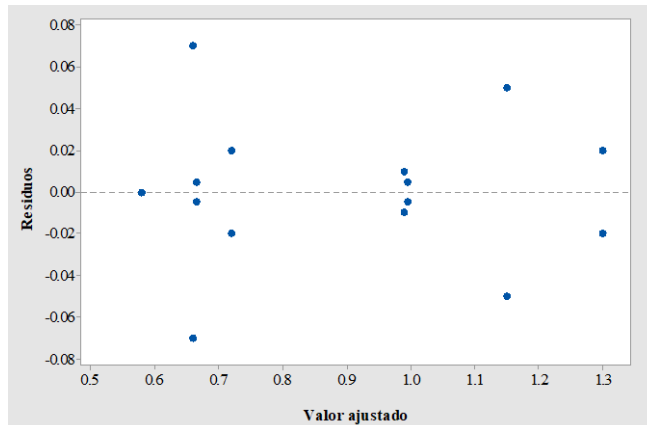


Figura 6. 10 Gráfica de ajuste residual obtenida de Minitab 17 (Propio, 2017).

Por otro lado, la Figura 6.11 muestra la gráfica del orden en que se recolectaron los resultados de PG Plus contra el residuo correspondiente. Al no detectarse una tendencia o patrón definido a la hora de elaborar las muestras y recolectar los resultados, se cumple también el supuesto de independencia.

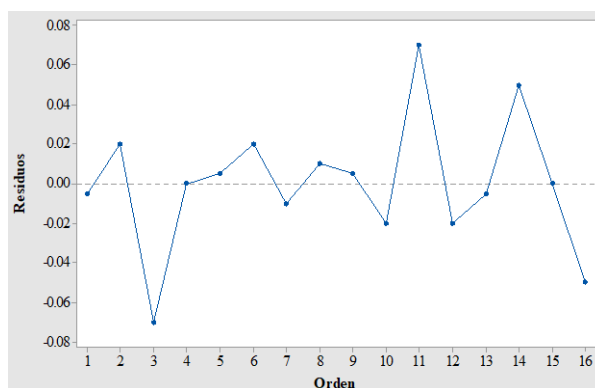


Figura 6. 11 Gráfica de orden de recolección de datos obtenida de Minitab 17 (Propio, 2017).

Las gráficas anteriores comprueban el cumplimiento de los supuestos del modelo estadístico de diseño factorial completo 2^3 que valida las conclusiones que se obtengan de estos datos más adelante en la investigación.

Continuando con el análisis de resultados del diseño factorial, se puede observar en el Cuadro 6.3 que el menor valor de deformación no recuperable a 3,2 kPa se obtiene para la

muestra del experimento 7 con un valor de $0,58 \text{ kPa}^{-1}$. Esto le da a la muestra una clasificación *VH* que se refiere a una capacidad de carga vehicular muy pesada.

Así, las mejores clasificaciones, tanto de PG como de PG Plus, fueron obtenidas para la muestra del experimento 7 modificada bajo las condiciones de bajo porcentaje de polímero, alta temperatura y alto tiempo de mezclado, esto en comparación con las muestras de los demás experimentos.

Para determinar los efectos e interacciones significativas en la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico de envases de agroquímicos, se realizó un análisis del diseño factorial 2^3 mediante una prueba de significancia estadística y las gráficas del software Minitab 17.

Para la prueba de significancia estadística, se estableció como rango de no significancia el intervalo $[-0,0399; 0,0399]$ con un nivel de confianza del 95 %. Luego, se procedió a realizar el cálculo de los efectos e interacciones de los factores del diseño factorial para cada uno de los experimentos; estos valores se encuentran tabulados en el cuadro B.3. El Cuadro 6.8 muestra los efectos e interacciones principales obtenidas al promediar los valores de los experimentos.

Cuadro 6. 8 Efectos e interacciones principales de los distintos factores del diseño experimental 2^3 .

K	Efecto			Interacción			
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Total	-0,01	-0,16	0,004	-0,05	-0,04	-0,10	0,14

Los efectos se refieren a la variación observada en la variable respuesta debido a un cambio de nivel de un factor y los efectos de interacción se refieren a la interacción de 2 o más factores sobre la variable respuesta cuando el efecto de uno depende del nivel en que se encuentra el otro. En el caso del presente diseño factorial 2^3 , se puede observar que el efecto de la temperatura y los efectos de las cuatro distintas interacciones tienen mayor

repercusión sobre la variable respuesta que los demás efectos ya que, al salirse del intervalo de no significancia, son considerados efectos significativos del diseño.

Para comprobar este análisis, se utilizó el software Minitab 17 ajustado para el diseño factorial 2^3 con los mismos factores, niveles y resultados de esta investigación, para un nivel de confianza de 95 %. Así, se obtuvieron las Figuras 6.12 hasta la 6.15 como salida del programa.

La Figura 6.12 muestra los efectos estandarizados que identifica los efectos e interacciones significativas como los puntos más alejados de la línea de ajuste. Entre más alejado de la línea, mayor es su efecto sobre la variable respuesta.

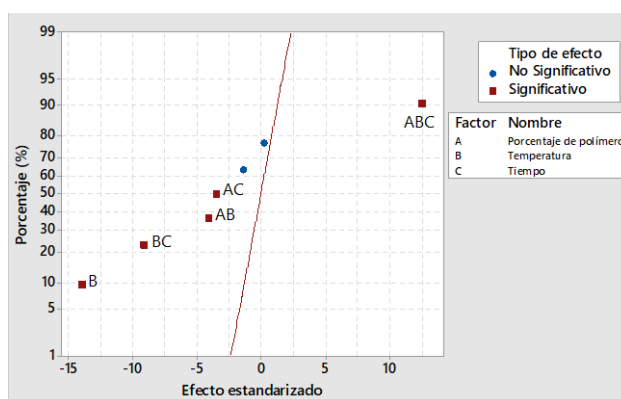


Figura 6. 12 Gráfica normal de efectos estandarizados obtenida de Minitab 17 (Propio, 2017).

Por su parte, la Figura 6.13 presenta el pareto para efectos estandarizados que permite, no sólo visualizar la significancia de los mismos efectos e interacciones anteriores, sino que compara, de manera más visible, la intensidad de estos efectos sobre la variable respuesta.

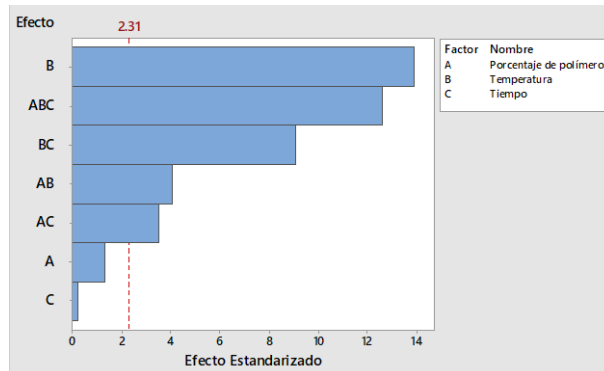


Figura 6. 13 Gráfica de Pareto para efectos estandarizados obtenida de Minitab 17 (Propio, 2017).

Al igual que la prueba de significancia estadística, la Figura 6.12 y la Figura 6.13 señalan que el efecto más significativo en la modificación del asfalto corresponde a la temperatura de mezclado (B). También, se consideran significativas todas las distintas interacciones entre los factores del diseño factorial, siendo la interacción entre el porcentaje de polímero, la temperatura y el tiempo (ABC) la más significativa de todas. El menor efecto de interacción se presenta entre el porcentaje de polímero y el tiempo de mezclado (AC).

El efecto del factor de temperatura de mezcla presenta una mayor significancia en comparación con los demás efectos al estar más alejada de la línea de ajuste normal y al presentar mayor intensidad en la gráfica de Pareto. Además, la temperatura forma parte de 3 de las 4 interacciones más significativas del diseño. Esta evidente significancia del factor temperatura indica que una variación entre el nivel alto y el nivel bajo de este factor afecta de forma considerable la variable respuesta de deformación no recuperable. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 6.14.

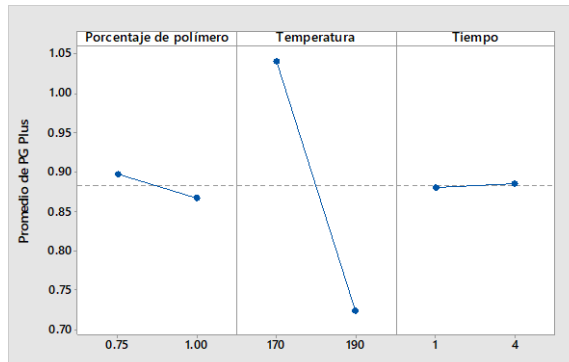


Figura 6. 14 Gráfica intensidad del efecto de un factor sobre la variable respuesta obtenida de Minitab 17 (Propio, 2017).

En la figura previa, se observa el cambio, en promedio, que sufre la variable respuesta al pasar del nivel bajo al nivel alto para cada uno de los factores del diseño. De estos tres factores, el cambio entre el nivel bajo y el nivel alto del factor de temperatura de mezcla es el que se traduce en una mayor variación en la variable respuesta. En promedio, la variable respuesta llega a pasar de $1,04 \text{ kPa}^{-1}$ para el nivel bajo hasta $0,72 \text{ kPa}^{-1}$ para el nivel alto.

Esta gráfica también permite observar la tendencia promedio que presenta la variable respuesta cuando se varían cada uno de los tres factores entre los niveles bajo y alto. Al aumentar el nivel de los factores de temperatura o de porcentaje de polímero, la deformación no permanente tiende a disminuir, siempre en mayor proporción para el factor de temperatura. Para el nivel alto del tiempo de mezclado, la variable respuesta tiende más bien a aumentar levemente el promedio.

Después del efecto de la temperatura de mezclado, los efectos de las distintas interacciones son los siguientes más significativos, por lo que su estudio es de suma importancia. La Figura 6.15 muestra la gráfica de interacciones entre cada par de factores. Cuando existe interacción entre factores, las líneas obtenidas tienen una pendiente muy diferente y pueden llegar a cruzarse. Si no hay interacción, las líneas tienen pendientes similares y tienden a ser paralelas.

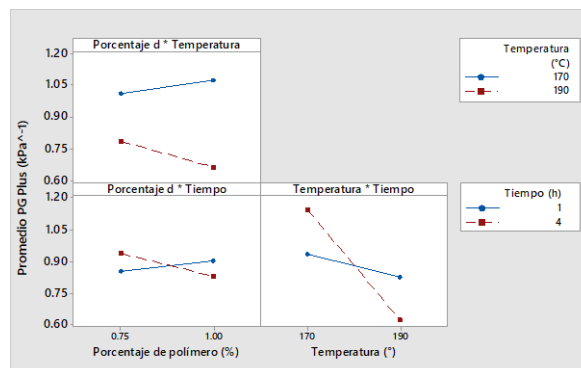


Figura 6. 15 Gráfica de interacciones entre par de factores obtenida de Minitab 17 (Propio, 2017).

La Figura 6.15 confirma la existencia de interacciones entre todos los pares de factores ya que las líneas de cada par de factores presentan pendientes distintas con tendencia a cruzarse entre sí. Las dos interacciones que involucran al factor de temperatura presentan líneas con pendientes más pronunciadas debido al mayor efecto que tiene este factor sobre la variable respuesta, siendo la interacción entre la temperatura y el tiempo (BC) la de mayor significancia de las dos. Como lo había indicado la Figura 6.13, el menor efecto de interacción se presenta entre el porcentaje de polímero y el tiempo de mezclado (AC).

Para determinar el efecto de la interacción entre los tres factores se emplea el cuadro de triple entrada mostrado en la Figura 6.16. Este cuadro permite establecer la combinación de niveles para cada uno de los factores a los que se obtiene el menor valor de la variable de deformación no permanente para la clasificación PG Plus.

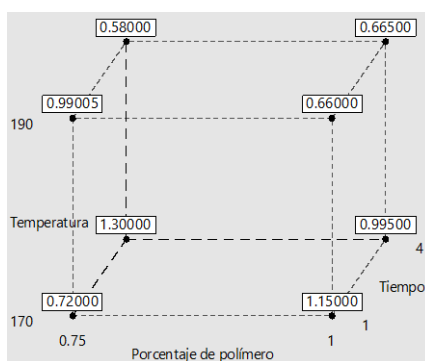


Figura 6. 16 Gráfica de interacción entre los tres factores del diseño factorial obtenida de Minitab 17 (Propio, 2017).

La Figura 6.16 muestra la interacción entre el porcentaje de polímero, la temperatura y el tiempo de mezclado. Como se observa en la esquina superior izquierda del fondo del cubo, el menor valor de deformación no recuperable se obtiene a una temperatura alta, a un tiempo alto y a un porcentaje bajo de polímero para un valor de deformación no recuperable de $0,58 \text{ kPa}^{-1}$. Por su parte, el mayor resultado de deformación no recuperable de $1,30 \text{ kPa}^{-1}$ se obtiene a una temperatura baja, un tiempo alto de mezclado y a un bajo porcentaje de polímero. Esto evidencia el efecto significativo que tiene pasar de un nivel bajo a un nivel alto de temperatura lo cual puede variar completamente la clasificación de PG Plus desde *H* hasta *VH*.

Todo lo anterior permite establecer un nivel alto de temperatura como la condición más determinante en la obtención de una buena clasificación de PG Plus en la modificación de asfalto con plástico proveniente de envases de agroquímicos.

6.4 Caracterización del asfalto modificado

Posteriormente, se caracterizó el asfalto M-1904-16 modificado a las condiciones del experimento 7, a las cuales, se presentó el mejor grado de desempeño PG Plus.

Para medir el cambio de masa durante el envejecimiento del asfalto modificado, se empleó un horno de película delgada (TFO), un horno de película delgada rotativa (RTFO) y un recipiente de envejecimiento a presión (PAV). El Cuadro 6.9 muestra los resultados de cada uno de estos envejecimientos.

Cuadro 6. 9 Cambio de masa del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y $190 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ensayo	Cambio de masa (%)
Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada (TFO)	0,0109
Efecto de calentamiento y ventilación en película delgada rotativa (RTFO)	-0,0093
Efecto de envejecimiento a presión (PAV)	-0,4756

Se presentó un aumento de masa del 0,0109% en el TFO debido a que la tasa de oxidación de la muestra es mayor a la tasa a la que se pierden compuestos volátiles durante el envejecimiento, lo que se traduce en una ganancia neta de peso. En el horno RTFO se da una pérdida del 0,0093% de la masa total y en el recipiente PAV una pérdida de 0,4756%. Ambas disminuciones de masa se deben a la pérdida significativa de compuestos volátiles durante estos procesos de envejecimiento.

La adición del polímero en el asfalto provoca una mayor tasa de pérdida de volátiles en el PAV en relación con la mayor tasa de oxidación que experimenta el asfalto original. En el TFO, se da la situación contraria, la tasa de oxidación es mayor para el asfalto modificado que la pérdida de volátiles en la muestra original pero en ambos casos la variación en la masa es mínima. En el RTFO, el comportamiento del asfalto modificado es similar al asfalto original presentando, en ambos casos, pérdida de masa.

En el Cuadro 6.10 se presentan resultados de los ensayos de caracterización correspondientes a viscosidad, penetración, punto de inflamación, recuperación elástica, ductilidad y punto de ablandamiento.

Cuadro 6. 10 Caracterización del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Ensayo	Resultado	Unidades
Viscosidad dinámica rotacional a 60 °C	1358	Pa·s
Viscosidad dinámica rotacional a 135 °C	1,30	Pa·s
Viscosidad dinámica rotacional a 135 °C al residuo de TFO	1,06	Pa·s
Punto de inflamación	349	°C
Penetración a 25 °C	25,6	1/10 mm
Penetración a 25 °C al residuo de RTFO	27,4	1/10 mm
Recuperación Elástica	17,5	%
Ductilidad a 25 °C al residuo de TFO	Normal	n/a
Punto de ablandamiento	57,4	°C

Para el asfalto M-1904-16 modificado, se empleó el viscosímetro rotacional, en lugar de uno de tubo capilar, para facilitar la medición en este tipo de asfaltos que tienen una

consistencia más pesada que su contraparte original. El asfalto modificado obtuvo un valor de viscosidad a 60 °C de 1358 Pa·s, 4 veces mayor que el presentado por la muestra original. Conforme se aumenta la temperatura a 135 °C, la viscosidad disminuye de forma considerable a 1,30 Pa·s, mostrando siempre un resultado mayor que el asfalto original a la misma temperatura. Así, la modificación con envases de agroquímicos produce un aumento en la viscosidad del asfalto, lo que debe considerarse en las operaciones de almacenamiento, transporte y bombeo del material en la práctica. La viscosidad a 135 °C del residuo de asfalto modificado envejecido en el TFO fue de 1,06 Pa·s, ligeramente menor al obtenido anteriormente para el asfalto modificado sin envejecer. Este valor indica que la adición del polímero retrasa el endurecimiento a altas temperaturas que, en asfaltos originales, tiende a aumentar la viscosidad del material.

El punto de inflamación del asfalto modificado es 5 °C menor que el obtenido para el asfalto original. Esta disminución muestra que, al modificarse el asfalto M-1904-16, se requiere una menor temperatura para que el material empiece a generar vapores potencialmente inflamables. Esta condición debe considerarse en las especificaciones de seguridad de transporte y almacenamiento de la mezcla.

El resultado de penetración, tanto para la muestra modificada como para la envejecida en RTFO, es menor que la del asfalto original. Esto indica que la adición de polímero causa que el asfalto presente una consistencia más dura. El valor de recuperación elástica del asfalto modificado fue mayor al del original debido a las propiedades elásticas que aporta el plástico a la mezcla mejorando su elasticidad. Asimismo, el punto de ablandamiento fue mayor ya que el polímero provoca que el asfalto presente una mayor resistencia a fluir al aumentar temperatura del pavimento en comparación con el asfalto original.

Según la norma ASTM D113, la ductilidad normal se obtiene si el material se rompe en el centro de la muestra o, en su defecto, si se alcanza la capacidad máxima de elongación del ductilímetro. A pesar de que el envejecimiento en el TFO tiende a endurecer el asfalto, la

muestra modificada presentó ductilidad normal al alcanzar la capacidad máxima de la máquina del LANAMME.

En el análisis del diseño factorial, se determinó la temperatura superior de grado de desempeño, 82 °C, por medio de la medición con el reómetro de corte dinámico del módulo complejo y del ángulo de fase del asfalto modificado. Esto, se complementó con el análisis del módulo complejo y del ángulo de fase de los residuos de RTFO y de PAV, así como la medición de rigidez con vigas de flexión en el BBR. En el Cuadro 6.11 se muestra la caracterización completa por grado de desempeño PG de la muestra de asfalto modificado.

Cuadro 6. 11 Caracterización por PG del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Ensayo	Temperatura (°C)	Parámetro	Valor	Unidades
Módulo de deformabilidad	82	G*/sen(δ)	1,30302	kPa
Módulo de deformabilidad a residuo de RTFO	82	G*/sen(δ)	1,33777	kPa
Módulo de fatiga a residuo de PAV	25	G*sen(δ)	3 929,681	kPa
Módulo de rigidez	-6	Rigidez	107,8635	MPa

Con los datos del asfalto original y la muestra envejecida con el RTFO, se determina 82 °C como la temperatura superior de grado de desempeño. Además, se obtuvo una temperatura intermedia de 25 °C con el análisis de la muestra envejecida en el PAV y una temperatura inferior de -6 °C mediante el estudio del valor de rigidez con el BBR.

Es así como el asfalto modificado M-1904-16 recibe una clasificación PG 82-6. Lo anterior sugiere que, para que el asfalto tenga un desempeño adecuado en su tiempo de servicio, éste debe estar expuesto a una temperatura de pavimento no mayor a los 82 °C y no inferior a los -6 °C. La clasificación por grado de desempeño mejora considerablemente al adicionarse el polímero en comparación con la clasificación obtenida para el asfalto original, lo que aumenta el rango de temperaturas altas a las cuales el asfalto se puede

desempeñar de manera adecuada. Según los mapas de zonificación climática del LANAMME, mostrados en el Anexo 3, en Costa Rica las temperaturas promedio de los pavimentos no bajan de los 8 °C por lo que el valor de -6 °C obtenido se adecúa sin problemas a las condiciones climatológicas del país.

Para la caracterización por grado de desempeño PG Plus, se analizó la variable respuesta $J_{nr\ 3,2}$ correspondiente a la deformación no permanente. En el Cuadro 6.12 se observa el valor obtenido para la muestra de asfalto modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C, así como su correspondiente clasificación PG Plus.

Cuadro 6. 12 Caracterización por PG Plus del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Parámetro	Resultado	Unidades	Clasificación PG Plus
$J_{nr\ 3,2}$	0,58	kPa ⁻¹	<i>VH</i>

Es así como el asfalto modificado obtuvo una clasificación *VH* referida a un tránsito muy pesado entre los 10 y 30 millones de ejes equivalentes. Así, se complementa la clasificación anterior del asfalto como PG 82-6 *VH*. Esta clasificación PG Plus supera a la del asfalto original resultando en un asfalto, no sólo capaz de presentar un mejor desempeño adecuado a mayores temperaturas de pavimento, sino, también, capaz de presentar una mayor resistencia a cargas vehiculares más pesadas.

Para cuantificar la estabilidad y evaluar la homogeneidad de la mezcla durante el tiempo de almacenamiento, se colocó una muestra de asfalto contenida en una columna dentro de un horno a 163 °C. Con el paso del tiempo en estado líquido, se empezó a observar una separación entre las dos fases con el asfalto depositado en el fondo y un mayor contenido de plástico en la parte superior en forma de grumos.

Se tomaron muestras en las partes inferior, medio y superior de la columna de estabilidad en dos momentos distintos del ensayo de estabilidad manteniendo el asfalto a una temperatura constante de 163 °C. El Cuadro 6.13 muestra el punto de ablandamiento de la

muestra a 48 horas y a 6 días en los tres puntos de la columna.

Cuadro 6. 13 Punto de ablandamiento del residuo de estabilidad a 163 °C del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Tiempo	Residuo	Punto de ablandamiento (°C)
48 horas	Inferior	49,6
	Medio	49,2
	Superior	48,9
6 días	Inferior	49,2
	Medio	49,6
	Superior	49,1

Conforme pasó el tiempo de 48 horas a 6 días, el punto de ablandamiento aumentó en la parte superior de la columna y fue disminuyendo en la parte inferior. Se observa un cambio en la consistencia del asfalto debido a la altura de la columna y al tiempo transcurrido de almacenamiento. El aumento del punto de ablandamiento se debe a un mayor contenido de plástico en la parte superior de la columna causada por la mala homogenización de la mezcla, la falta de compatibilidad entre los materiales en estado líquido y la diferencia de densidades entre ambos.

Todos los residuos de la prueba de estabilidad obtuvieron menores puntos de ablandamiento en comparación con la muestra de asfalto modificado inicial. Esto indica que, al ser expuesta la muestra a una temperatura elevada por un largo periodo, la matriz asfáltica se envejece y deteriora aumentando la tendencia del material a fluir. A pesar de que el asfalto tiende a endurecerse con el envejecimiento, el polímero, bajo las condiciones del ensayo, provoca una disminución en el punto de ablandamiento de la mezcla.

Para el ensayo de fatiga, primero se realizó un barrido de frecuencias con el cual se midieron las propiedades reológicas del material en un rango de frecuencias que no provoca daño en el material (0,1 Hz a 30 Hz). Las Figuras 6.17 y 6.18 muestran la recta de mejor ajuste de los valores de frecuencia contra el módulo de almacenamiento en ejes logarítmicos para las dos corridas realizadas.

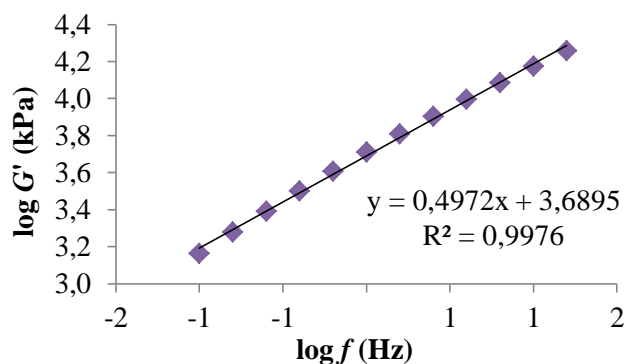


Figura 6. 17 Recta de mejor ajuste de la primera corrida de barrido de frecuencia para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C (Zúñiga, 2016).

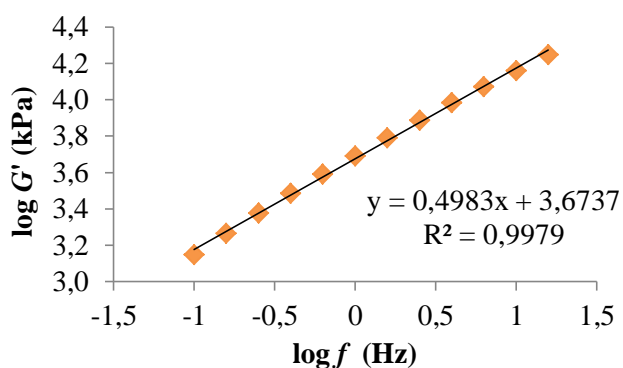


Figura 6. 18 Recta de mejor ajuste de la segunda corrida de barrido de frecuencia para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C (Zúñiga, 2016).

Las figuras anteriores demuestran que los datos presentan un comportamiento ajustado a la recta, el cual es normal a bajas frecuencias que no causan daño al material. La pendiente de estas rectas permite determinar el parámetro α del material que se relaciona con la razón de progreso del daño. En promedio, el valor de α para el asfalto modificado M-1904-16 es de 2,0090. Este valor se emplea en el barrido de amplitudes para determinar los coeficientes de la ley de fatiga.

Con el barrido de amplitud a una frecuencia de 10 Hz con deformación lineal (de 0,1 % hasta 30 %), se obtuvieron, por duplicado, los coeficientes a y b de la ley de fatiga. El cuadro 6.14 muestra los coeficientes promedio de las corridas realizadas.

Cuadro 6. 14 Coeficientes del modelo de vida de fatiga obtenidos del barrido de amplitud del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Coeficiente	Promedio
a	4 333 878
b	-4,0181

El coeficiente a es un valor alto lo cual indica que material posee una alta resistencia a la fatiga y menos propenso al agrietamiento. El coeficiente b , por su parte, presenta un valor bajo cercano a cero lo que indica una mayor resistencia a la fatiga.

Con estos coeficientes, se obtiene el siguiente modelo de vida de fatiga del asfalto modificado M-1904-16:

$$Nf = 4\,333\,878 \cdot (\gamma)^{-4,0181} \quad (6.1)$$

Esta ley permite determinar la vida de fatiga del material a una determinada deformación y, por ende, predecir el desempeño del asfalto a ese valor. Empleando este modelo, se puede graficar en ejes logarítmicos la vida de fatiga del asfalto modificado M-1904-16 obtenida desde 1% a 10% de deformación como se muestra en la Figura 6.19. Esta gráfica permite visualizar la clasificación que se obtiene para cada valor de vida de fatiga.

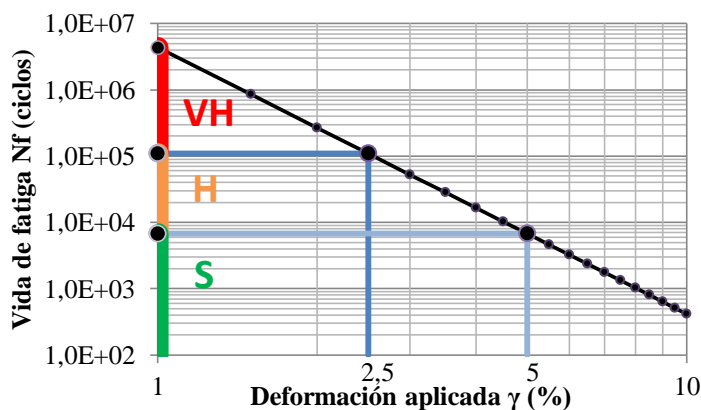


Figura 6. 19 Vida de fatiga respecto a la deformación aplicada para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75% de polímero, 4 horas y 190 °C (Propio, 2017).

El cuadro 6.15 detalla la vida de fatiga a los porcentajes 2,5 % y 5 % que son los límites de la clasificación por desempeño de fatiga.

Cuadro 6. 15 Vida de fatiga del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C para deformaciones aplicada de 2,5 % y 5 %.

Deformación aplicada γ (%)	Vida de fatiga N_f (ciclos)
2,5	109 198
5	6 743

Según el modelo, el asfalto modificado M-1904-16 va a presentar un desempeño de carga de tránsito muy pesado al aplicarse deformaciones menores a 2,5 %, mostrando valores de vida de fatiga superiores a los 109 198 ciclos. Si la deformación es mayor al 5 %, el asfalto se va a comportar de forma estándar con valores de vida de fatiga menores a 6 743 ciclos.

Con el barrido de amplitud también se obtuvo la curva de esfuerzo en función de la deformación que muestra el comportamiento del esfuerzo cortante en relación a la aplicación de una deformación lineal controlada. Las Figuras 6.20 y 6.21 exponen las curvas para las dos corridas de barrido de amplitud realizadas.

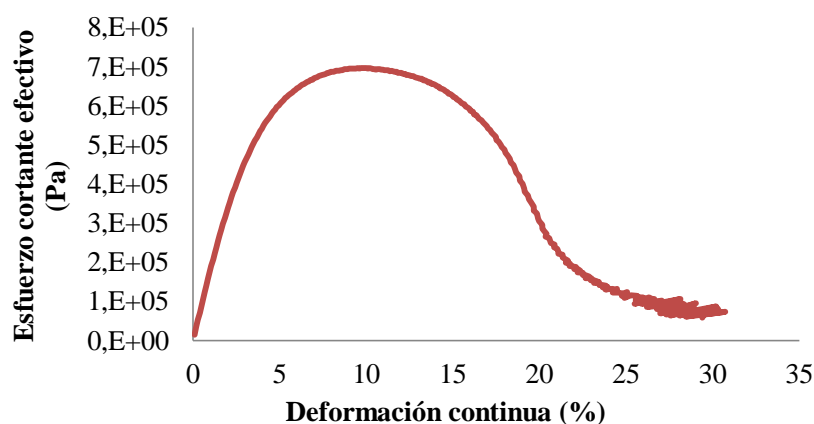


Figura 6. 20 Curva de carga-deformación obtenida de la primera corrida de barrido de amplitud para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75% de polímero, 4 horas y 190 °C (Zúñiga, 2016).

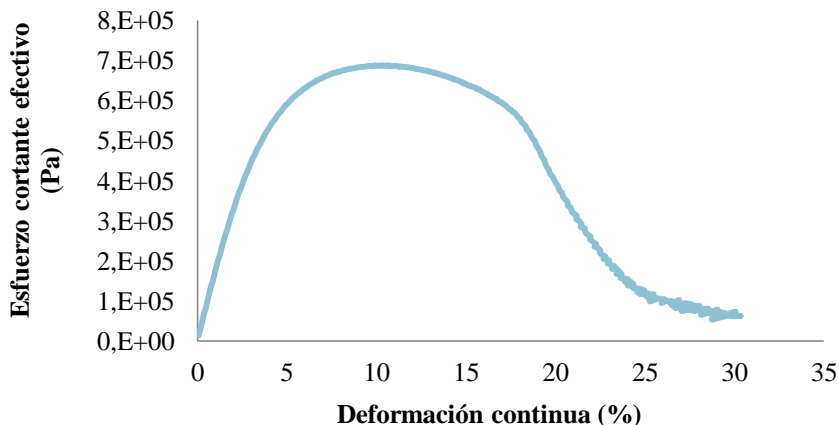


Figura 6. 21 Curva de carga-deformación obtenida de la segunda corrida de barrido de amplitud para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75% de polímero, 4 horas y 190 °C (Zúñiga, 2016).

Por la forma de las curvas, se puede determinar que el asfalto modificado M-1904-16 presenta una elevada resistencia a la fatiga, una elevada ductilidad y una alta tenacidad. La elevada resistencia a la fatiga se relaciona con el alto pico máximo de la curva que sugiere una alta resistencia a la tensión. El área bajo la curva de carga-deformación, representada por el ancho grosor de la curva, indica una alta tenacidad del asfalto. Luego del pico máximo, el esfuerzo cortante decrece de forma paulatina al ir aumentando la deformación, lo que señala una alta ductilidad del material que le permite soportar mayores valores de deformación antes de fracturarse.

En términos generales, se presentan mejoras significativas en las propiedades del asfalto M-1904-16 al modificarse con plástico de envases de agroquímicos. Esta modificación le brinda al asfalto una mayor dureza, elasticidad y elevada resistencia a la fatiga, así como una mayor resistencia a fluir al aumentar la temperatura, manteniendo siempre la ductilidad del material dentro del rango normal. La clasificación por grado de desempeño mejora de manera considerable, pasando de un PG-64-28 *H* a PG-82-6 *VH*, lo que demuestra una mayor resistencia a altas temperaturas de pavimento y a cargas vehiculares muy pesada.

En todos los ensayos realizados al asfalto modificado con envases de agroquímico, el único problema encontrado fue la inestabilidad de la mezcla en estado líquido donde, con el transcurso del tiempo, ocurre una separación entre las dos fases. Esto representa un problema en términos de almacenamiento, transporte y bombeo del material a la hora de ser puesto en la práctica.

Lo anterior indica que, para el caso del asfalto modificado con plástico de agroquímicos, la mezcla con el agregado y la colocación se debe realizar inmediatamente después de la modificación del asfalto para evitar largos periodos de almacenamiento en estado líquido que favorezcan la inestabilidad por separación de fases.

Una solución más general sería la adición de un plastificante a la mezcla. Este material plastificante suavizaría el plástico y podría permitirle una mayor incorporación y dispersión en la matriz asfáltica aumentando el tiempo en que la mezcla se mantiene estable. De esta forma, se podrían evitar problemas de estabilidad a raíz de largos periodos de almacenamiento y traslados del material en estado líquido.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- 1- El asfalto original M-1904-16 es un asfalto AC-30 con una clasificación por grado de desempeño PG Plus de PG-64-28 *H* que indica una temperatura de desempeño superior e inferior del pavimento de 64 °C y -22 °C, respectivamente, para una carga de vehículos pesada entre los 3 y 10 millones de ejes equivalentes.
- 2- Según el espectro IR, los envases de agroquímicos empleados en la modificación del asfalto M-1904-16 están compuestos por polietileno de alta densidad.
- 3- La descomposición del plástico proveniente de envases de agroquímicos empieza a los 375 °C y culmina a los 500 °C, siendo 460 °C el punto de degradación máxima del material. Como las temperaturas de mezclado son inferiores a 190 °C, el material presenta un comportamiento normal en la modificación del asfalto M-1904-16.
- 4- No hay evidencia de trazas de materiales peligrosos en los gases expedidos por el plástico al ser expuesto a altas temperaturas de acuerdo con los espectros infrarrojos en 3D de los gases provenientes del TGA. El plástico proveniente de envases de agroquímicos de la fundación “Limpiemos Nuestros Campos” se considera seguro para su uso en la modificación de asfaltos.
- 5- El diseño factorial 2^3 empleado en la modificación del asfalto M-1904-16 con plástico de envases de agroquímicos cumple, como modelo estadístico, los supuestos de distribución normal y varianza constante de la variable respuesta, así como aleatoriedad e independencia de las mediciones realizadas.

- 6- La muestra de asfalto modificado por 4 horas a 190 °C y con un 0,75 % de polímero presentó el mejor PG Plus con la menor deformación no recuperable correspondiente a 0,58 kPa⁻¹ para una clasificación *VH*.
- 7- Con un nivel de confianza del 95 %, se determina que el efecto de la temperatura es el más significativo sobre la variable respuesta en el diseño factorial 2³ utilizado para la modificación de asfaltos con plástico de envases de agroquímicos. Los siguientes efectos más significativos sobre la variable respuesta corresponden a las cuatro distintas interacciones entre los factores de temperatura, tiempo y porcentaje en masa de polímero.
- 8- Un nivel alto de temperatura es la condición más determinante en la obtención de una buena clasificación de PG Plus en la modificación de asfalto con plástico proveniente de envases de agroquímicos.
- 9- La modificación del asfalto M-1904-16 con envases de agroquímicos produce un aumento en la viscosidad, lo que puede afectar operaciones de almacenamiento, transporte y bombeo del material.
- 10- La modificación del asfalto con plástico de envases de agroquímicos le brinda al asfalto mayor dureza, elasticidad y resistencia a fluir al aumentar la temperatura, manteniendo la ductilidad del material dentro del rango normal.
- 11- El asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C obtuvo una clasificación PG Plus de PG-82-6 *VH* que indica una temperatura de desempeño superior e inferior del pavimento de 82 °C y -6 °C, respectivamente, para una carga de vehículos muy pesada entre los 10 millones y 30 millones de ejes equivalentes.
- 12- El asfalto M-1904-16 modificado con envases de agroquímicos obtuvo una mejor clasificación PG Plus que su contraparte original, lo que representa menor

susceptibilidad a la deformación permanente a altas temperaturas de pavimento y mayor resistencia a cargas vehiculares pesadas.

- 13- Con el transcurrir del tiempo, la mezcla en estado líquido se vuelve inestable y ocurre una separación entre las dos fases. El asfalto tiende a depositarse en el fondo y se observa un mayor contenido de plástico en la parte superior, ambos causados por mala incorporación en la mezcla, falta de compatibilidad entre los materiales y diferencia de densidades.
- 14- El modelo $Nf = 4\,333\,878 \cdot (\gamma)^{-4,0181}$ permite predecir la vida de fatiga a una deformación determinada y establecer los límites aceptables de desempeño del asfalto modificado M-1904-16. Los valores de los coeficientes del modelo indican que el material posee una alta resistencia a la fatiga.
- 15- El asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C presenta una elevada resistencia a la fatiga a 25 °C, una elevada ductilidad y una alta tenacidad.
- 16- En general, se presentan mejoras significativas en las propiedades del asfalto M-1904-16 al modificarse con plástico de envases de agroquímicos. El único problema encontrado fue la inestabilidad de la mezcla en estado líquido lo cual se puede evitar mediante la producción de la mezcla asfáltica inmediatamente después de realizar la modificación o mediante la adición de un plastificante a la mezcla que suavice el polímero, lo cual podría mejorar la incorporación del plástico a la matriz asfáltica.

7.2 Recomendaciones

- 1- Emplear un tamaño de partícula menor a 500 μm (malla 35) para la modificación del asfalto con plástico de envases de agroquímicos para obtener una mejor incorporación del polímero a la matriz asfáltica.
- 2- Utilizar un equipo de modificación que alcance temperaturas mayores de mezclado para realizar una evaluación más amplia del efecto de la temperatura en la modificación de asfaltos mediante el empleo de temperaturas superiores a los 190 °C.
- 3- Evaluar el uso de un plastificante para mejorar la incorporación del plástico a la matriz asfáltica y, así, asegurarla estabilidad de almacenamiento de la mezcla a lo largo del tiempo en estado líquido.
- 4- Debido al alto riesgo que conlleva el empleo de envases previamente utilizados para almacenar agroquímicos, se recomienda realizar una caracterización más exhaustiva del material para determinar la presencia de trazas de sustancias peligrosas absorbidas en el plástico y, si fuera necesario, emplear métodos de limpieza o incineración que garanticen una mayor seguridad del material.
- 5- Evaluar el desempeño y estabilidad, en estado sólido, de la muestra de asfalto modificado con plástico de envases de agroquímicos mediante la elaboración de mezcla asfáltica y la simulación de la puesta en carretera del material.
- 6- Realizar un estudio de prefactibilidad para determinar la viabilidad económica de utilizar asfalto modificado con plástico de envases de agroquímicos para la construcción de carreteras.

NOMENCLATURA

<i>A</i>	Porcentaje en masa del polímero, %
<i>B</i>	Temperatura, °C
<i>C</i>	Tiempo, h
<i>E</i>	Clasificación PG Plus referida a tránsito extremadamente pesado, adim.
<i>F</i>	Efecto de un factor de diseño sobre la variable respuesta
<i>G*</i>	Módulo complejo, kPa
<i>G'</i>	Módulo de almacenamiento, kPa
<i>H</i>	Clasificación PG Plus referida a tránsito pesado, adim.
<i>I</i>	Efecto de la interacción entre factores de diseño sobre la variable respuesta
<i>INT</i>	Intervalo de no significancia
<i>J</i>	Deformación o fluencia, kPa ⁻¹
<i>K</i>	Número de experimento, adim.
<i>L</i>	Longitud, cm
<i>M</i>	Punto de inflamación, °C
<i>N</i>	Presión atmosférica, mmHg
<i>Nf</i>	Duración o vida de fatiga del material, ciclos
<i>P</i>	Porcentaje de recuperación elástica, %
<i>S</i>	Clasificación PG Plus referida a tránsito estándar, adim.
<i>S_E</i>	Error de estimación, kPa ⁻¹
<i>S_y²</i>	Varianza muestral, kPa ⁻²
<i>R</i>	Porcentaje promedio de recuperación, %
<i>T</i>	Temperatura de grado de desempeño, °C
<i>VH</i>	Clasificación PG Plus referida a tránsito muy pesado, adim.
<i>X</i>	Porcentaje de cambio de masa del asfalto, %
<i>a</i>	Coefficiente del modelo de vida de fatiga, adim
<i>b</i>	Coefficiente del modelo de vida de fatiga, adim
<i>f</i>	Frecuencia, Hz
<i>p</i>	Niveles, adim.
<i>m</i>	Masa de asfalto, g
<i>n</i>	Pendiente de la recta, adim.
<i>s_y²</i>	Estimador de varianza, kPa ⁻²
<i>t_{student}</i>	Valor correspondiente a la distribución <i>t_{student}</i> , adim.
<i>y</i>	Dato de deformación no recuperable de cada experimento, kPa ⁻¹

\bar{y}	Promedio de datos de deformación no recuperable de cada experimento, kPa^{-1}
γ	Deformación aplicada, %
δ	Ángulo de fase, °
η	Grados de libertad, adim.
μ	Viscosidad dinámica o absoluta, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	Viscosidad cinemática, mm^2/s
ρ	Densidad, g/cm^3

Subíndices

<i>A</i>	Se refiere al factor de diseño A
<i>B</i>	Se refiere al factor de diseño B
<i>C</i>	Se refiere al factor de diseño C
<i>AB</i>	Se refiere a la interacción entre los factores A y B
<i>AC</i>	Se refiere a la interacción entre los factores A y C
<i>ABC</i>	Se refiere a la interacción entre los factores A, B y C
<i>BC</i>	Se refiere a la interacción entre los factores B y C
<i>K</i>	Se refiere al número de experimento
<i>diff</i>	Se refiere a la diferencia entre la medición a 0,100 kPa y la medición a 3,200 kPa
<i>f</i>	Se refiere al valor final
<i>i</i>	Se refiere al valor inicial
<i>inf</i>	Se refiere al valor inferior de temperatura de grado de desempeño
<i>int</i>	Se refiere al valor intermedio de temperatura de grado de desempeño
<i>n</i>	Se refiere al número de muestra
<i>nr</i>	Se refiere a la deformación no recuperable o permanente
<i>sup</i>	Se refiere al valor superior de temperatura de grado de desempeño
<i>0,1</i>	Se refiere a la medición realizada a 0,100 kPa
<i>3,2</i>	Se refiere a la medición realizada a 3,200 kPa

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2014). *AASHTO TP101-14: Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*. Recuperado el 6 de Marzo de 2017, de <https://uwmarc.wisc.edu/files/linearamplitudesweep/AASHTO-TP101-LAS-May-2013-v2.pdf>
- Aguiar Moya, J. P., & Villegas Villegas, E. (2012). *Alternativas verdes a los modificantes de asfalto comerciales: Bolsas de banano – Parte 1 (Modificación del ligante)*. Recuperado el 20 de Octubre de 2016, de Boletín Técnico PITRA: http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/boletines/boletin_pitra_24_alternativas_verdes_a_las_modificantes_de_asfalto.pdf
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (3era ed.). México D.F.: International Thomson Editores.
- ASTM International. (2008). *ASTM D113: Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/D113.32527.pdf>
- ASTM International. (2010). *ASTM D2170: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/D2170D2170M.6845.pdf>
- ASTM International. (2010). *ASTM D2171: Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/D2171D2171M.21795.pdf>
- ASTM International. (2011). *ASTM E2550: Thermal Stability by Thermogravimetry*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/E2550.4694.pdf>
- ASTM International. (2012). *ASTM D2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D2872.7479.pdf>

- ASTM International. (2013). *ASTM D5: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/E2105.39993.pdf>
- ASTM International. (2013). *ASTM D6084: Standard Test Method for Elastic Recovery of Asphalt Materials by Durometer*. Recuperado el 29 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/D6084D6084M.19356.pdf>
- ASTM International. (2013). *ASTM D6521: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D6521.18885.pdf>
- ASTM International. (2013). *ASTM D92: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D92.2773.pdf>
- ASTM International. (2014). *ASTM D1754: Standard Test Method for Effects of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)*. Recuperado el 6 de Marzo de 2017, de <http://compass.astm.org/download/D1754D1754M.25817.pdf>
- ASTM International. (2014). *ASTM D36: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. Recuperado el 14 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/D36D36M.37303.pdf>
- ASTM International. (2015). *ASTM D4402: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D4402D4402M.20029.pdf>
- ASTM International. (2015). *ASTM D7175: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. Recuperado el 15 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D7175.12575.pdf>
- ASTM International. (2015). *ASTM D7405: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. Recuperado el 9 de Octubre de 2015, de <http://compass.astm.org/download/D7405.660.pdf>

- ASTM International. (2016). *ASTM D6648: Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*. Recuperado el 21 de Marzo de 2017, de <http://compass.astm.org/download/D6648.34926.pdf>
- ASTM International. (2016). *ASTM E2105: General Techniques for Thermogravimetric Analysis (TGA) Coupled With Infrared Analysis (TGA/IR)*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://compass.astm.org/download/E2105.4995.pdf>
- Blanco Alvarez, F. (2004). *Tema 8. Materiales poliméricos de mayor interés industrial*. Recuperado el 20 de Octubre de 2015, de *Materiales Poliméricos y Compuestos*: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AP.T8.1-MPyC.Tema8.MaterialesPolimericosInteresIndustrial.pdf>
- Cardone, F., Ferrotti, G., Frigio, F., & Canestrari, F. (30 de Noviembre de 2014). Influence of polymer modification on asphalt binder dynamic and steady flow viscosities. *Construction and Building Materials*, 71, 435-443.
- CONARE. (2016). *Quinto Informe Estado de la Región en Desarrollo Humano Sostenible*. Recuperado el 20 de Octubre de 2016, de <http://www.estadonacion.or.cr/erca2016/assets/erca-2016-web.pdf>
- Craver, C., & Carraher, C. (2000). *Applied Polymer Science: 21st Century*. Oxford: Elsevier.
- Elizondo Arrieta, F., Salazar Delgado, J., & Villegas Villegas, E. (Enero/Diciembre de 2010). Caracterización de asfaltos modificados con diferentes aditivos. *Ingeniería*, 20(1-2), 81-92.
- Faraldos, M. (2011). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. Madrid: CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Figueroa, A., Fonseca, E., & Reyes, F. (2009). Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Ingeniería y Universidad*, 45-52.
- France, L. (1997). *Chemical, Physical, and Thermodynamic Properties of Neat and Polymer Modified Asphalt Binders*. Estados Unidos.

- Garnica, P., Delgado, H., Gómez, J., & González, Á. (2004). *Comportamiento de Mezclas Asfálticas Modificadas con SBR*. Recuperado el 20 de Abril de 2017, de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt254.pdf>
- Garnica, P., Gómez, J., & Delgado, H. (2003). *Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio*. Recuperado el 21 de Marzo de 2017, de <http://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt228.pdf>
- Gürü, M., Cubukb, M., Arslan, D., Farzanian, A., & Bilici, I. (30 de Agosto de 2014). An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 302-310.
- Hasan Iqbal, M. (2004). *Influence of polymer type and structure on polymer modification of Saudi asphalt*. Tesis de grado para optar por el título de Master en Ingeniería Química, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Chemical Engineering, Saudi Arabia.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2003). *Fichas Internacionales de Seguridad Química: Asfalto*. Recuperado el 25 de Octubre de 2017, de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/601a700/nspn0612.pdf>
- INVIAS. (2007). *INV E-726-07: Estabilidad al Almacenamiento de Asfaltos*. Recuperado el 1 de Abril de 2017, de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-726-07.pdf
- LANAMME. (2014). *Pavimentos verdes, mucho más que medio ambiente*. Recuperado el 21 de Octubre de 2016, de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/campa%C3%B1as-1/presentaci%C3%B3n.html>
- LANAMME. (2016). *Ficha técnica del asfalto M-1904-16*. San José: UCR.
- LANAMME. (2017). *Resumen sobre los cálculos y los resultados del LAS*. San José: UCR.
- Modarres, A., & Hamedi, H. (Setiembre de 2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials & Design*, 61, 8-15.

- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, G. (2015). *A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility*. Recuperado el 24 de Febrero de 2016, de http://ac.els-cdn.com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr:2048/S0001868615001165/1-s2.0-S0001868615001165-main.pdf?_tid=8b0f8a98-28a9-11e7-a6c9-00000aacb35d&acdnat=1493009610_f139cfba00f76cbff29905ae084f685e
- Rodriguez, E., & Salazar, J. (2015). *Ensayos en Asfalto. Presentación en Power Point*. San Pedro: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.
- Salazar Delgado, J. (2007). *Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta*. Recuperado el 26 de Enero de 2016, de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/publicaciones/ui-01-08.pdf>
- Salazar Delgado, J. (29 de Agosto de 2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano - RTCA 75.01.22:047. *Métodos & Materiales*, I(1), 25-38.
- Salazar Delgado, J. (2013). Métodos de ensayo para la determinación cualitativa y cuantitativa del contenido de polímero presente en ligantes asfálticos modificados. *Métodos y materiales*, 3, 21-28.
- Sandoval, I., & Cremades, I. (2013). *Evolución del grado PG en la caracterización de asfaltos*. Recuperado el 8 de Abril de 2017, de <http://www.ichasfalto.cl/wp-content/uploads/5.EVOLUCION-DEL-GRADO-PG-EN-LA-CARACTERIZACION-DE-ASFALTOS-SURFAX-MEXICO.pdf>
- SIECA. (2010). *Manual Centroamericano de Mantenimiento de carreteras con enfoque en gestión de riesgo y seguridad vial*. Recuperado el 21 de Octubre de 2016, de <http://fomav.gob.ni/flash/documentos/Manual%20CA%20de%20Mantenimiento%20de%20Carreteras,%20edicion%202010.pdf>
- Teymourpour, P., & Bahia, H. (20014). *Linear Amplitude Sweep Test: Binder Grading Specification and Field Validation* . Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de http://www.asphaltpavement.org/PDFs/Engineering_ETGs/Binder_201409/Teymourpour_LAS%20Test_Binder%20Grading%20Specification%20and%20Field%20Validation.pdf

- Toraldo, E., & Mariani, E. (29 de Agosto de 2014). Effects of polymer additives on bituminous mixtures. *Construction and Building Materials*, 65, 38-42.
- Vasile, C., & Pascu, M. (2005). *Practical Guide to Polyethylene*. Shropshire: iSmithers Rapra Publishing.
- Villegas, R. E., Aguiar, J. P., & Loría, L. G. (2012). Procedimientos para la caracterización de ligantes asfálticos modificados. *Asfalto y pavimentación*, 19-25.
- Vlachovicova, Z. (2006). *Rheological investigation of different asphalt binders*. Alberta: University of Calgary.
- Yut, I., & Zofka, A. (15 de Julio de 2014). Correlation between rheology and chemical composition of aged polymer-modified asphalts. *Construction and Building Materials*, 62, 109-117.
- Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (Mayo de 2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18-38.
- Zúñiga, C. (2016). *Informe LAS 0.75% 190°C 4h*. San José: UCR.

APÉNDICES

APÉNDICE A. DATOS EXPERIMENTALES

Cuadro A. 1 Punto de ablandamiento del asfalto M-1904-16 original.

Balín	Temperatura (°C)
1	48,0
2	48,2

Cuadro A. 2 Cambio de masa del asfalto M-1904-16 original en horno de película delgada rotativa vertical (RTFO).

Muestra	Masa cilindro (g)	Masa cilindro + muestra inicial (g)	Masa cilindro + muestra final (g)
1	170,723	205,740	205,714
2	169,047	204,096	204,069

Cuadro A. 3 Distancias del ensayo de recuperación elástica del asfalto M-1904-16 original.

Muestra	Distancia (cm)
1	1,5
2	2,0
3	1,8

Cuadro A. 4 Cambio de masa en horno de envejecimiento a presión (PAV) del asfalto M-1904-16 original.

Muestra	Masa plato (g)	Masa plato + muestra inicial (g)	Masa plato + muestra final (g)
1	89,189	139,301	139,611
2	89,472	139,530	139,678

Cuadro A. 5 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original.

Temperatura (°C)	58		64		70	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	84,7153	4,07846	86,1964	1,77517	87,3774	0,82973
2	84,7161	4,07955	86,2391	1,77536	87,4268	0,83108
3	84,7188	4,07799	86,2250	1,77740	87,4322	0,83116
4	84,7171	4,07447	86,2137	1,77835	87,4023	0,83119
5	84,7162	4,07169	86,1535	1,77744	87,3095	0,83107
6	84,7186	4,07006	86,2858	1,77602	87,4286	0,83090
7	84,7141	4,06818	86,1877	1,77397	87,4310	0,83114
8	84,7157	4,06457	86,1496	1,77304	87,4249	0,83114
9	84,7127	4,06255	86,1787	1,77544	87,4271	0,83088
10	84,7115	4,06135	86,2254	1,77280	87,4228	0,82994
Promedio	84,7156	4,07089	86,2055	1,77550	87,4083	0,83082

Cuadro A. 6 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original.

Temperatura (°C)	58		64		70	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	84,7130	4,06082	86,1843	1,77607	87,4456	0,83051
2	84,7188	4,06530	86,2090	1,77386	87,4146	0,82979
3	84,7160	4,07413	86,1727	1,77466	87,3972	0,82799
4	84,7151	4,06687	86,1491	1,77416	87,3963	0,82788
5	84,7170	4,07287	86,1643	1,77382	87,4186	0,82820
6	84,7151	4,06736	86,1600	1,77516	87,4422	0,82788
7	84,7141	4,07664	86,1868	1,77579	87,4444	0,82758
8	84,7156	4,07331	86,1533	1,77700	87,4057	0,83082
9	84,7142	4,06876	86,1870	1,77615	87,4245	0,82887
10	84,7129	4,06417	86,1382	1,77548	87,4185	0,82798
Promedio	84,7152	4,06902	86,1705	1,77522	87,4208	0,82875

Cuadro A. 7 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		64		70	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	82,4902	4,40163	84,4226	1,98850	
2	82,4975	4,40193	84,4230	1,98816	
3	82,5498	4,39873	84,4188	1,98809	
4	82,4872	4,40166	84,4203	1,98801	
5	82,4879	4,40216	84,4244	1,98712	
6	82,4853	4,40257	84,4221	1,98660	
7	82,4817	4,40298	84,4231	1,98633	
8	82,4821	4,39917	84,4273	1,98440	
9	82,4797	4,39701	84,4241	1,98400	
10	82,4799	4,39490	84,4250	1,98418	
Promedio	82,4921	4,40027	84,4231	1,98654	

Cuadro A. 8 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		64		70	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	82,5399	4,20350	84,3393	1,89949	
2	82,4896	4,22041	84,3281	1,90003	
3	82,4862	4,21799	84,4187	1,90032	
4	82,4933	4,21526	84,3744	1,90355	
5	82,5995	4,21423	84,3766	1,90205	
6	82,4464	4,20355	84,4943	1,89861	
7	82,4769	4,21395	84,3717	1,90149	
8	82,4883	4,21089	84,3022	1,89867	
9	82,4925	4,20952	84,3666	1,89973	
10	82,4787	4,20929	84,4073	1,89529	
Promedio	82,4991	4,21186	84,3779	1,89992	

Cuadro A. 9 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original envejecido mediante PAV.

Temperatura (°C)		22		25	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*sen(δ) (kPa)	
1	44,3327	5698,59	46,8696	4037,97	
2	44,4614	5676,99	47,0363	4011,68	
3	44,5278	5657,79	47,1058	3997,90	
4	44,5720	5642,78	47,1470	3987,85	
5	44,5750	5659,66	47,1755	3981,70	
6	44,5754	5667,92	47,1932	3978,16	
7	44,5996	5656,70	47,2082	3975,31	
8	44,6249	5645,48	47,2186	3973,29	
9	44,6297	5647,57	47,2285	3971,25	
10	44,6036	5672,00	47,2351	3970,44	
Promedio	44,5502	5662,55	47,1418	3988,56	

Cuadro A. 10 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 original envejecido mediante PAV.

Temperatura (°C)		22		25	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*sen(δ) (kPa)	
1	43,8762	5556,35	46,3412	3978,93	
2	43,9901	5547,72	46,5092	3953,80	
3	44,0468	5534,94	46,5797	3939,07	
4	44,0821	5527,74	46,6222	3929,85	
5	44,1129	5522,28	46,6502	3924,09	
6	44,1256	5522,56	46,6696	3918,41	
7	44,1136	5538,97	46,6847	3916,05	
8	44,1283	5535,33	46,6962	3913,99	
9	44,1402	5530,55	46,7047	3912,89	
10	44,1481	5530,06	46,7143	3909,73	
Promedio	44,0764	5534,65	46,6172	3929,68	

Cuadro A. 11 Datos obtenidos del reómetro BBR para el asfalto M-1904-16 original.

Temperatura (°C)	Rigidez (MPa)		Pendiente
	Medida	Estimada	
-16	60,0912	60,1003	0,4171
-22	118,5302	118,6811	0,3521
-28	241,4414	241,4909	0,2763

Cuadro A. 12 Datos del ensayo MSCR del asfalto M-1904-16 modificado a distintos porcentajes en masa de polímero para la comprobación de homogenización de la mezcla.

Variable	Porcentaje de polímero (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,75
R _{0,1} (%)	9,9	10,8	11,5	12,3
R _{3,2} (%)	2,7	3,2	3,8	4,1
R _{diff} (%)	72,3	70,5	69,2	67,1
J _{nr 0,1} (kPa ⁻¹)	2,00	1,80	1,66	1,40
J _{nr 3,2} (kPa ⁻¹)	2,40	2,23	2,02	1,70
J _{nr diff} (%)	19,7	19,9	20,1	20,5

Cuadro A. 13 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1.

Temperatura (°C)	70		76		82	
	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	83,3717	2,70360	85,1787	1,30695	86,7325	0,67856
2	83,4436	2,69346	85,1889	1,30577	86,7433	0,67770
3	83,3576	2,68638	85,1925	1,30389	86,7411	0,67725
4	83,4299	2,68108	85,2019	1,30247	86,7312	0,67699
5	83,4378	2,67486	85,1950	1,30141	86,6100	0,67713
6	83,4487	2,66955	85,2006	1,29937	86,7151	0,67628
7	83,4536	2,66526	85,1949	1,29868	86,7183	0,67555
8	83,4594	2,66068	85,2010	1,29786	86,7127	0,67541
9	83,4638	2,65656	85,1966	1,29650	86,6992	0,67513
10	83,4674	2,65366	85,1975	1,29554	86,7080	0,67445
Promedio	83,4334	2,67451	85,1948	1,30084	86,7111	0,67644

Cuadro A. 14 Punto Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1.

Temperatura (°C)	70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
1	82,2397	2,79795	82,6755	1,42665	80,5275	0,82240
2	82,5085	2,78056	82,5802	1,42480	80,3880	0,82116
3	82,4169	2,77737	82,4468	1,42473	80,0978	0,82089
4	82,4273	2,77355	82,3445	1,42531	79,9902	0,81952
5	82,4140	2,77020	82,3185	1,42471	79,8058	0,81915
6	82,4360	2,76316	82,2645	1,42450	79,7554	0,81756
7	82,4365	2,75816	82,2394	1,42400	79,5754	0,81745
8	82,4109	2,75538	82,2155	1,42327	79,5316	0,81615
9	82,3878	2,75339	82,1488	1,42360	79,5301	0,81392
10	82,4196	2,74879	82,1102	1,42397	79,4670	0,81423
Promedio	82,4097	2,76785	82,3344	1,42455	79,8669	0,81824

Cuadro A. 15 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)	70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
1	81,0284	5,0529	83,2802	2,40350
2	81,0541	5,0654	83,2920	2,40060
3	81,0609	5,0564	83,2906	2,39716
4	81,0631	5,0509	83,2911	2,39466
5	81,0560	5,0476	83,2861	2,39037
6	81,0580	5,0408	83,2857	2,38986
7	81,1998	5,0318	83,2862	2,38815
8	81,0533	5,0320	83,2752	2,38574
9	81,0490	5,0273	83,2823	2,38405
10	81,0495	5,0224	83,2851	2,38250
Promedio	81,0672	5,04274	83,2855	2,39166

Cuadro A. 16 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)	70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
1	80,4889	5,08810	82,8091	2,41011
2	80,5923	5,09743	82,6907	2,42134
3	80,5211	5,08301	82,8079	2,41489
4	80,5331	5,06917	82,8075	2,41085
5	80,6051	5,05541	82,7963	2,40936
6	80,5520	5,04722	82,8062	2,40568
7	80,5635	5,04147	82,8076	2,40192
8	80,5701	5,03269	82,8048	2,39835
9	80,5768	5,02250	82,8918	2,39350
10	80,5838	5,01384	82,8094	2,39358
Promedio	80,5587	5,05508	82,8031	2,40596

Cuadro A. 17 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2.

Temperatura (°C)	64		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
1	79,2990	4,46576	79,3836	2,36164	81,2733	1,13703
2	79,6024	4,45228	79,4239	2,37785	81,4520	1,13973
3	79,8264	4,43135	79,3896	2,37835	81,4692	1,13918
4	79,9201	4,41839	79,5256	2,36922	81,4555	1,13887
5	79,9676	4,40780	79,4716	2,37324	81,4965	1,13747
6	80,0382	4,40327	79,4148	2,37628	81,5791	1,13555
7	80,1280	4,39540	79,3518	2,37676	81,5981	1,13486
8	80,1381	4,39029	79,3860	2,37269	81,5447	1,13885
9	80,2202	4,38010	79,3754	2,37458	81,5900	1,13747
10	80,2762	4,37796	79,3438	2,37856	81,5000	1,13913
Promedio	79,9416	4,41226	79,4066	2,37392	81,4958	1,13781

Cuadro A. 18 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2.

Temperatura (°C)		64		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	80,5055	4,34179	80,8497	2,12166	80,2984	1,13071	
2	80,5919	4,32168	80,8836	2,12157	80,2057	1,13631	
3	80,6313	4,29675	80,8678	2,11910	80,1673	1,13778	
4	80,5968	4,29226	80,8179	2,11984	80,1247	1,13983	
5	80,6020	4,27932	80,8029	2,11859	80,0682	1,14175	
6	80,6051	4,27007	80,7847	2,11861	80,0888	1,14044	
7	80,6213	4,26153	80,7691	2,11851	80,1243	1,14072	
8	80,6005	4,25525	80,7215	2,11827	80,0494	1,14132	
9	80,6120	4,24888	80,7447	2,11643	80,0664	1,14053	
10	80,6099	4,24656	80,7576	2,11814	80,0278	1,14000	
Promedio	80,5976	4,28141	80,8000	2,11907	80,1221	1,13894	

Cuadro A. 19 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	82,9909	3,04151	84,6961	1,44007	
2	82,9990	3,04869	84,7068	1,44033	
3	82,9969	3,04383	84,7007	1,43950	
4	82,9961	3,04229	84,6992	1,43888	
5	82,9947	3,03758	84,7551	1,44032	
6	82,9925	3,03470	84,6932	1,43659	
7	82,9903	3,03216	84,6980	1,43599	
8	82,9938	3,02804	84,6973	1,43426	
9	82,9856	3,02527	84,6913	1,43387	
10	82,9874	3,02522	84,6875	1,43261	
Promedio	82,9927	3,03593	84,7025	1,43724	

Cuadro A. 20 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	82,9307	3,09445	84,6715	1,46799	
2	82,9388	3,09279	84,6674	1,46669	
3	82,9405	3,08878	84,6691	1,46612	
4	82,9403	3,08540	84,6713	1,46515	
5	82,9460	3,08040	84,6701	1,46430	
6	82,9470	3,07783	84,6752	1,46383	
7	82,9430	3,07629	84,6674	1,46315	
8	82,9436	3,07260	84,6658	1,46243	
9	82,9402	3,07028	84,677	1,46412	
10	82,9411	3,06786	84,6672	1,46151	
Promedio	82,9411	3,08067	84,6702	1,46453	

Cuadro A. 21 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3.

Temperatura (°C)		70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	83,9752	2,04200	85,2315	1,05493	85,7656	0,59965	
2	83,9443	2,03869	85,2059	1,05541	85,7928	0,59785	
3	84,0330	2,03167	85,1892	1,05489	85,7208	0,59790	
4	84,0276	2,02976	85,1591	1,05521	85,7047	0,59763	
5	84,0231	2,02734	85,1262	1,05526	85,6645	0,59812	
6	84,0292	2,02387	85,0921	1,05531	85,6120	0,59820	
7	84,0324	2,02169	85,0737	1,05458	85,6263	0,59809	
8	83,9608	2,01983	85,0532	1,05422	85,5226	0,59885	
9	84,0001	2,01574	85,0526	1,05418	85,5316	0,59816	
10	84,0035	2,01562	85,0329	1,05442	85,5428	0,59750	
Promedio	84,0029	2,02662	85,1216	1,05484	85,6484	0,59819	

Cuadro A. 22 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3.

Temperatura (°C)		70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	
1	82,9972	2,03908	83,2585	1,10228	82,8411	0,65041	
2	82,9421	2,03527	83,3075	1,10094	82,8470	0,64940	
3	82,9866	2,03175	83,2162	1,10059	83,0725	0,64819	
4	82,9572	2,03264	83,2274	1,10208	83,1849	0,64749	
5	82,9331	2,03238	83,1978	1,10077	83,3359	0,64792	
6	82,9106	2,03211	83,1983	1,10148	83,2971	0,64785	
7	82,8753	2,03332	83,1955	1,10107	83,3614	0,64634	
8	82,8602	2,02831	83,1905	1,10047	83,4275	0,64734	
9	82,8431	2,03161	83,1562	1,10058	83,3694	0,64840	
10	82,7015	2,03308	83,1909	1,10001	83,5179	0,64673	
Promedio	82,9007	2,03296	83,2139	1,10103	83,2255	0,64801	

Cuadro A. 23 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	
1	79,4478	3,72698	79,4394	1,78408	
2	79,6182	3,70850	79,5196	1,78585	
3	79,6804	3,69780	79,5533	1,78358	
4	79,7144	3,69350	79,5589	1,78207	
5	79,7280	3,69279	79,5617	1,78131	
6	79,7330	3,69073	79,5570	1,78064	
7	79,7393	3,69045	79,5552	1,78007	
8	79,7309	3,68679	79,5555	1,77861	
9	79,7239	3,68557	79,5555	1,77751	
10	79,7207	3,68414	79,5550	1,77597	
Promedio	79,6837	3,69573	79,5411	1,78097	

Cuadro A. 24 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	81,6573	3,77492	83,4506	1,78806	
2	81,7955	3,76448	83,5667	1,79032	
3	81,8290	3,75671	83,4650	1,79016	
4	81,8409	3,75105	83,4530	1,79045	
5	81,8482	3,74774	83,4432	1,79043	
6	81,8280	3,74630	83,4421	1,78858	
7	81,8313	3,74108	83,4382	1,78703	
8	81,8806	3,73727	83,4430	1,78553	
9	81,8298	3,73597	83,4480	1,78401	
10	81,8213	3,73137	83,4451	1,78374	
Promedio	81,8162	3,74869	83,4595	1,78783	

Cuadro A. 25 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4.

Temperatura (°C)		70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	82,8197	2,62210	83,8216	1,32895	83,7237	0,74139	
2	82,9318	2,60856	83,8332	1,32702	83,8209	0,73857	
3	82,9184	2,60025	83,7859	1,32645	83,8420	0,73743	
4	82,9131	2,59868	83,7979	1,32351	83,8781	0,73369	
5	82,9055	2,59089	83,7301	1,32147	83,8120	0,73443	
6	82,9494	2,58187	83,7480	1,31978	83,8771	0,73139	
7	82,8972	2,57884	83,7345	1,31944	83,9106	0,73045	
8	82,9108	2,57381	83,6748	1,31929	83,9136	0,72874	
9	82,9336	2,56941	83,7146	1,31555	83,9480	0,72748	
10	82,9292	2,56486	83,7166	1,31364	83,9780	0,72587	
Promedio	82,9108	2,58893	83,7557	1,32151	83,8704	0,73294	

Cuadro A. 26 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4.

Temperatura (°C)		70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	
1	82,5552	2,70879	83,4580	1,38963	83,0255	0,79017	
2	82,7073	2,68883	83,4832	1,38530	83,1785	0,78610	
3	82,6850	2,67909	83,4317	1,38365	83,2108	0,78498	
4	82,6253	2,67978	83,4557	1,37986	83,2388	0,78043	
5	82,6739	2,66944	83,3984	1,37823	83,1481	0,78182	
6	82,7022	2,65866	83,4185	1,37489	83,2009	0,77795	
7	82,6620	2,65557	83,3964	1,37514	83,2829	0,77657	
8	82,6834	2,64894	83,3165	1,37526	83,2940	0,77431	
9	82,7168	2,64461	83,3899	1,37070	83,3419	0,77269	
10	82,7105	2,63841	83,4009	1,36836	83,3897	0,77081	
Promedio	82,6722	2,66721	83,4149	1,37810	83,2311	0,77958	

Cuadro A. 27 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	
1	81,4246	4,53900	83,5292	2,08903	
2	81,4569	4,49428	83,5290	2,09102	
3	81,4621	4,47912	83,5705	2,09109	
4	81,4709	4,47240	83,5337	2,08545	
5	81,4922	4,46091	83,5289	2,08362	
6	81,5096	4,44659	83,6433	2,07947	
7	81,5258	4,43491	83,5266	2,08069	
8	81,5410	4,42519	83,5250	2,07811	
9	81,5491	4,41768	83,5216	2,07870	
10	81,5451	4,41016	83,6067	2,07602	
Promedio	81,4977	4,45802	83,5515	2,08332	

Cuadro A. 28 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	81,6547	4,43033	83,6719	2,04191	
2	81,6659	4,40216	83,6723	2,04275	
3	81,6746	4,39117	83,6767	2,03923	
4	81,6746	4,38655	83,6705	2,03866	
5	81,6749	4,38099	83,6794	2,03667	
6	81,6846	4,37603	83,6613	2,03479	
7	81,6767	4,37024	83,6752	2,03248	
8	81,6843	4,36361	83,6753	2,03124	
9	81,6725	4,35935	83,6779	2,02802	
10	81,6806	4,35470	83,6759	2,02700	
Promedio	81,6743	4,38151	83,6736	2,03528	

Cuadro A. 29 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5.

Temperatura (°C)		64		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	83,2998	3,98249	85,8260	1,64075	86,1829	0,97360	
2	83,2094	3,96671	85,8304	1,64249	86,2527	0,96784	
3	83,2813	3,95331	85,8300	1,63980	86,2497	0,96751	
4	83,2981	3,95197	85,8319	1,63850	86,3176	0,96724	
5	83,3002	3,94721	85,8271	1,63660	86,2727	0,96435	
6	83,2975	3,94160	85,8286	1,63470	86,1703	0,96460	
7	83,3064	3,93771	85,8271	1,63323	86,2402	0,96306	
8	83,2921	3,93126	85,8214	1,63191	86,2211	0,96055	
9	83,2882	3,92853	85,8109	1,63025	86,2465	0,96200	
10	83,3267	3,93104	85,8229	1,62996	86,2582	0,96183	
Promedio	83,2900	3,94718	85,8256	1,63582	86,2412	0,96526	

Cuadro A. 30 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5.

Temperatura (°C)		64		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	84,1713	3,52036	85,5971	1,704805	87,3137	0,81380	
2	84,1537	3,51194	85,5991	1,705213	87,3095	0,81450	
3	84,1613	3,50028	85,5989	1,703480	87,3066	0,81390	
4	84,1725	3,49923	85,6026	1,700935	87,3072	0,81361	
5	84,1878	3,49502	85,6044	1,698510	87,3025	0,81276	
6	84,1444	3,49007	85,6058	1,696365	87,3043	0,81208	
7	84,1813	3,48595	85,6058	1,694890	87,2980	0,81159	
8	84,1942	3,48089	85,6026	1,693030	87,3000	0,81108	
9	84,1889	3,47456	85,5996	1,691243	87,2948	0,81068	
10	84,1892	3,47208	85,6048	1,690695	87,2876	0,81027	
Promedio	84,1745	3,49304	85,6021	1,69792	87,3024	0,81243	

Cuadro A. 31 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	82,8361	3,33985	84,7904	1,60157	
2	82,8518	3,34830	84,7955	1,60194	
3	82,7515	3,34834	84,7933	1,60070	
4	82,8543	3,34212	84,7908	1,59896	
5	82,8551	3,33914	84,7858	1,59813	
6	82,8521	3,33598	84,7829	1,59698	
7	82,9535	3,33122	84,7804	1,59501	
8	82,8529	3,33133	84,7882	1,59356	
9	82,8046	3,32836	84,7410	1,59267	
10	82,8471	3,32565	84,7827	1,59150	
Promedio	82,8459	3,33703	84,7831	1,59710	

Cuadro A. 32 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	82,8633	3,25811	84,8259	1,52795	
2	82,8735	3,26348	84,8330	1,52724	
3	82,8223	3,26161	84,8048	1,52336	
4	82,8737	3,25727	84,8237	1,52472	
5	82,8725	3,25475	84,8221	1,52393	
6	82,8701	3,25161	84,8206	1,52317	
7	82,9206	3,24855	84,8175	1,52218	
8	82,8666	3,24743	84,8206	1,52041	
9	82,8398	3,24310	84,8174	1,51920	
10	82,8640	3,24189	84,8198	1,51854	
Promedio	82,8666	3,25278	84,8205	1,52307	

Cuadro A. 33 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6.

Temperatura (°C)		70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	83,5489	2,19149	84,2907	1,11862	86,8523	0,48025	
2	83,5861	2,19239	84,2315	1,11580	86,8571	0,47909	
3	83,6469	2,18027	84,1448	1,11203	86,8579	0,47854	
4	83,6470	2,17523	84,0353	1,11039	86,8713	0,47808	
5	83,6485	2,16949	84,0542	1,10652	86,7344	0,47772	
6	83,6643	2,16297	83,9575	1,10477	86,8688	0,47736	
7	83,6688	2,15587	83,9218	1,10238	86,8630	0,47683	
8	83,5564	2,15573	83,9751	1,10035	86,8402	0,47691	
9	83,6483	2,15071	83,9878	1,09868	86,8425	0,47656	
10	83,6216	2,14570	83,9889	1,09776	86,8417	0,47700	
Promedio	83,6237	2,16799	84,0588	1,10673	86,8429	0,47783	

Cuadro A. 34 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6.

Temperatura (°C)		70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	84,1593	2,79954	84,1060	1,19482	83,5662	0,61757	
2	84,1982	2,76510	84,0877	1,19312	83,6777	0,61609	
3	84,2347	2,74397	84,0866	1,18971	83,7369	0,61453	
4	84,2309	2,73145	84,0620	1,18766	83,7452	0,61431	
5	84,2227	2,72068	84,0649	1,18476	83,7660	0,61350	
6	84,2259	2,71213	84,0443	1,18277	83,8541	0,61269	
7	84,2122	2,70390	84,0365	1,18091	83,8367	0,61262	
8	84,1597	2,69923	84,0363	1,17917	83,8519	0,61231	
9	84,1858	2,69207	84,0559	1,17787	83,8431	0,61197	
10	84,1726	2,68199	84,0462	1,17612	83,8389	0,61190	
Promedio	84,2002	2,72500	84,0626	1,18469	83,7717	0,61375	

Cuadro A. 35 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	75,2971	4,26615	74,3282	2,53301	
2	73,3515	4,55482	72,5010	2,53668	
3	73,7044	4,51522	72,7067	2,53362	
4	73,8308	4,50512	72,7896	2,53147	
5	74,0344	4,48339	72,7238	2,52857	
6	74,1857	4,46738	72,7516	2,53072	
7	74,2760	4,46144	72,7579	2,52905	
8	74,3404	4,45300	72,7029	2,52971	
9	74,3928	4,45097	72,6859	2,52585	
10	74,4387	4,44077	72,6661	2,52769	
Promedio	74,1852	4,45983	72,8614	2,53064	

Cuadro A. 36 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)	76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	74,4058	4,14913	74,1709	2,54747
2	73,2429	4,33921	73,0286	2,73301
3	73,8847	4,26699	73,5164	2,67650
4	74,1867	4,23636	73,6833	2,65734
5	74,5274	4,19557	73,7692	2,65202
6	74,7691	4,16814	73,8354	2,63978
7	74,9069	4,15375	74,0033	2,63406
8	75,0187	4,13771	74,0603	2,63156
9	75,1324	4,12551	74,1390	2,62451
10	75,1965	4,10847	74,1447	2,62106
Promedio	74,5271	4,18808	73,8351	2,64173

Cuadro A. 37 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7.

Temperatura (°C)	70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
1	79,8358	4,05340	81,6099	2,07648	81,4846	1,34574
2	80,3206	3,97566	81,6704	2,05585	81,5236	1,33763
3	80,4405	3,95944	81,6112	2,05070	81,5688	1,33179
4	80,4556	3,95221	81,5867	2,04581	81,6210	1,32850
5	80,5168	3,94088	81,5481	2,04213	81,7419	1,32129
6	80,5025	3,93202	81,5416	2,03884	81,8101	1,31755
7	80,4978	3,92231	81,5028	2,03830	81,8195	1,31582
8	80,4928	3,91608	81,4896	2,03752	81,8510	1,31222
9	80,4794	3,91456	81,4884	2,03477	81,8759	1,30896
10	80,4822	3,91141	81,4639	2,03525	81,8639	1,30653
Promedio	80,4024	3,94780	81,5513	2,04557	81,7160	1,32260

Cuadro A. 38 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7.

Temperatura (°C)		70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	
1	78,1050	5,11861	80,9301	2,57325	81,4558	1,30951	
2	79,1400	5,02410	80,8909	2,58592	81,5098	1,30145	
3	79,3207	4,96766	80,9489	2,57077	81,5772	1,29458	
4	79,3765	4,94491	80,9604	2,55867	81,6508	1,28980	
5	79,4408	4,91695	80,9335	2,55945	81,7942	1,28162	
6	79,5307	4,88581	80,9554	2,55725	81,8617	1,27728	
7	79,6699	4,85777	81,0382	2,55341	81,8933	1,27524	
8	79,5987	4,85815	80,9760	2,54964	81,9330	1,27126	
9	79,6554	4,84515	80,9908	2,54398	81,9628	1,26790	
10	79,6360	4,83218	81,0401	2,54277	81,9474	1,26566	
Promedio	79,3474	4,92513	80,9664	2,55951	81,7586	1,28343	

Cuadro A. 39 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	
1	81,7951	2,74953	83,6666	1,34632	
2	81,8025	2,75620	83,6732	1,34610	
3	81,8003	2,75470	83,6684	1,34518	
4	81,7958	2,75485	83,6640	1,34465	
5	81,7652	2,74820	83,6706	1,34317	
6	81,7912	2,75010	83,6616	1,34183	
7	81,7866	2,74902	83,6672	1,34158	
8	81,7847	2,74819	83,6651	1,34080	
9	81,7792	2,74727	83,6601	1,34019	
10	81,7799	2,74501	83,6614	1,33979	
Promedio	81,7881	2,75031	83,6658	1,34296	

Cuadro A. 40 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	81,7193	2,82189	83,5258	1,33492	
2	81,7192	2,81958	83,5365	1,33560	
3	81,7275	2,81648	83,5532	1,33554	
4	81,7228	2,81465	83,5317	1,33382	
5	81,7180	2,81261	83,5292	1,33244	
6	81,7186	2,81004	83,5234	1,33175	
7	81,7175	2,80848	83,5187	1,33147	
8	81,7135	2,80630	83,5225	1,33045	
9	81,7158	2,80470	83,5206	1,32965	
10	81,7092	2,80294	83,4350	1,33009	
Promedio	81,7181	2,81177	83,5197	1,33257	

Cuadro A. 41 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #8.

Temperatura (°C)		70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	
1	82,7458	3,03424	84,2864	1,42993	85,5437	0,73021	
2	82,7698	3,01991	84,3358	1,42998	85,5135	0,72969	
3	82,7878	3,00706	84,3309	1,42721	85,5199	0,72834	
4	82,7982	2,99999	84,3388	1,42587	85,5373	0,72776	
5	82,8009	2,98976	84,3303	1,42450	85,5262	0,72676	
6	82,8053	2,98193	84,3210	1,42310	85,5381	0,72611	
7	82,8098	2,97741	84,3288	1,42130	85,5518	0,72567	
8	82,8115	2,97041	84,3293	1,41961	85,5366	0,72474	
9	82,8194	2,96632	84,3249	1,41789	85,5492	0,72430	
10	82,8137	2,96176	84,3195	1,41762	85,5642	0,72338	
Promedio	82,7962	2,99088	84,3246	1,42370	85,5381	0,72669	

Cuadro A. 42 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #8.

Temperatura (°C)		70		76		82	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	
1	82,5406	2,81370	84,2179	1,38229	85,0177	0,75400	
2	82,5823	2,77400	84,1716	1,38218	85,0138	0,75590	
3	82,5571	2,82210	84,1831	1,38440	84,8898	0,74870	
4	82,4992	2,86780	84,1606	1,38597	84,8876	0,74780	
5	82,6103	2,79240	84,1639	1,38298	84,9086	0,75930	
6	82,4381	2,86140	84,1811	1,38026	84,9091	0,75620	
7	82,5862	2,82450	84,1260	1,39064	85,0153	0,75660	
8	82,5883	2,78080	84,1375	1,39122	84,9186	0,74820	
9	82,5198	2,82220	84,2079	1,38216	84,9943	0,75740	
10	82,6080	2,78140	84,1419	1,38029	84,9483	0,76210	
Promedio	82,5530	2,81403	84,1692	1,38424	84,9503	0,75462	

Cuadro A. 43 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #8 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	
1	80,3152	5,20840	82,4798	2,40219	
2	80,3248	5,20624	82,5012	2,40971	
3	80,3328	5,19598	82,5056	2,40490	
4	80,3390	5,18875	82,3816	2,40383	
5	80,3474	5,17459	82,5017	2,40183	
6	80,3506	5,16815	82,5064	2,39954	
7	80,3329	5,16327	82,5069	2,39769	
8	80,3468	5,15498	82,5039	2,39646	
9	80,3449	5,14784	82,5007	2,39421	
10	80,3548	5,14340	82,4978	2,39151	
Promedio	80,3389	5,17516	82,4886	2,40019	

Cuadro A. 44 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado #8 envejecido mediante RTFO.

Temperatura (°C)		70		76	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	
1	80,4233	5,19971	82,6261	2,39501	
2	80,3655	5,20329	82,6421	2,40085	
3	80,4158	5,18923	82,6415	2,39648	
4	80,4432	5,18132	82,6523	2,39429	
5	80,4381	5,17502	82,6390	2,39077	
6	80,4405	5,17169	82,6466	2,38921	
7	80,4412	5,16494	82,6390	2,38858	
8	80,4389	5,15886	82,6401	2,38588	
9	80,4403	5,14905	82,6387	2,38470	
10	80,4361	5,14681	82,6421	2,38279	
Promedio	80,4283	5,17399	82,6408	2,39086	

Cuadro A. 45 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #1.

Corrida	$R_{0,1}$ (%)	$R_{3,2}$ (%)	R_{diff} (%)	$J_{\text{nr } 0,1}$ (kPa ⁻¹)	$J_{\text{nr } 3,2}$ (kPa ⁻¹)	$J_{\text{nr diff}}$ (%)
1	97,7	8,1	91,7	0,0011	0,70	63 536,4
2	98,6	8,4	91,5	0,0073	0,74	10 037,0
Promedio	98,2	8,3	91,6	0,0042	0,72	36 786,7

Cuadro A. 46 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #2.

Corrida	$R_{0,1}$ (%)	$R_{3,2}$ (%)	R_{diff} (%)	$J_{\text{nr } 0,1}$ (kPa ⁻¹)	$J_{\text{nr } 3,2}$ (kPa ⁻¹)	$J_{\text{nr diff}}$ (%)
1	98,8	4,8	95,2	0,0031	1,10	35 383,9
2	97,9	4,6	87,8	0,0038	1,20	31 478,9
Promedio	98,4	4,7	91,5	0,0035	1,15	33 431,4

Cuadro A. 47 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #3.

Corrida	$R_{0,1}$ (%)	$R_{3,2}$ (%)	R_{diff} (%)	$J_{nr 0,1}$ (kPa^{-1})	$J_{nr 3,2}$ (kPa^{-1})	$J_{nr diff}$ (%)
1	43,2	7,0	88,3	0,44	1,00	127,3
2	48,2	5,6	84,1	0,48	0,98	104,2
Promedio	45,7	6,3	86,2	0,46	0,99	115,7

Cuadro A. 48 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #4.

Corrida	$R_{0,1}$ (%)	$R_{3,2}$ (%)	R_{diff} (%)	$J_{nr 0,1}$ (kPa^{-1})	$J_{nr 3,2}$ (kPa^{-1})	$J_{nr diff}$ (%)
1	110,5	9,3	89,7	0,00023	0,59	256 421,7
2	89,1	9,7	91,3	0,00046	0,73	158 595,7
Promedio	99,8	9,5	90,5	0,00035	0,66	207 508,7

Cuadro A. 49 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #5.

Corrida	$R_{0,1}$ (%)	$R_{3,2}$ (%)	R_{diff} (%)	$J_{nr 0,1}$ (kPa^{-1})	$J_{nr 3,2}$ (kPa^{-1})	$J_{nr diff}$ (%)
1	9,0	3,9	62,9	1,20	1,28	6,7
2	11,0	4,7	51,7	1,00	1,32	32,0
Promedio	10,0	4,3	57,3	1,10	1,30	19,3

Cuadro A. 50 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #6.

Corrida	$R_{0,1}$ (%)	$R_{3,2}$ (%)	R_{diff} (%)	$J_{nr 0,1}$ (kPa^{-1})	$J_{nr 3,2}$ (kPa^{-1})	$J_{nr diff}$ (%)
1	9,0	5,9	34,3	0,78	0,99	26,9
2	11,8	5,5	53,3	0,91	1,00	9,9
Promedio	10,4	5,7	43,8	0,85	0,995	18,4

Cuadro A. 51 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #7.

Corrida	$R_{0,1}$ (%)	$R_{3,2}$ (%)	R_{diff} (%)	$J_{nr 0,1}$ (kPa^{-1})	$J_{nr 3,2}$ (kPa^{-1})	$J_{nr diff}$ (%)
1	15,6	11,1	29,3	0,53	0,58	9,4
2	15,4	11,2	27,4	0,53	0,58	9,4
Promedio	15,5	11,15	28,4	0,53	0,58	9,4

Cuadro A. 52 Datos de prueba MSCR del asfalto M-1904-16 modificado en el experimento #8.

Corrida	$R_{0,1}$ (%)	$R_{3,2}$ (%)	R_{diff} (%)	$J_{nr 0,1}$ (kPa^{-1})	$J_{nr 3,2}$ (kPa^{-1})	$J_{nr diff}$ (%)
1	16,6	9,2	44,7	0,58	0,66	13,8
2	16,4	9,2	44,3	0,61	0,67	9,8
Promedio	16,5	9,2	44,5	0,60	0,665	11,8

Cuadro A. 53 Punto de ablandamiento del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Balín	Temperatura (°C)
1	57,0
2	57,8

Cuadro A. 54 Cambio de masa en horno de película delgada rotativa horizontal (TFO) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Masa plato (g)	Masa plato + muestra inicial (g)	Masa plato + muestra final (g)
1	89,490	140,037	140,057
2	88,460	140,563	140,536
3	89,923	140,188	140,194
4	87,529	137,747	137,769

Cuadro A. 55 Cambio de masa en horno de película delgada rotativa vertical (RTFO) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Masa cilindro (g)	Masa cilindro + muestra inicial (g)	Masa cilindro + muestra final (g)
1	171,795	206,812	206,807
2	166,268	201,307	201,303
3	168,958	203,973	203,972
4	168,780	203,847	203,844

Cuadro A. 56 Distancias del ensayo de recuperación elástica del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Distancia (cm)
1	3,5
2	3,6
3	3,4

Cuadro A. 57 Cambio de masa en horno de envejecimiento a presión (PAV) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Masa plato (g)	Masa plato + muestra inicial (g)	Masa plato + muestra final (g)
1	93,434	143,561	143,305
2	93,781	143,499	143,280

Cuadro A. 58 Punto de ablandamiento del residuo superior de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 48 horas.

Balín	Temperatura (°C)
1	48,8
2	49,0

Cuadro A. 59 Punto de ablandamiento del residuo medio de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 48 horas.

Balín	Temperatura (°C)
1	48,8
2	49,6

Cuadro A. 60 Punto de ablandamiento del residuo inferior de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 48 horas.

Balín	Temperatura (°C)
1	49,2
2	50,0

Cuadro A. 61 Punto de ablandamiento del residuo superior de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 6 días.

Balín	Temperatura (°C)
1	49,0
2	49,2

Cuadro A. 62 Punto de ablandamiento del residuo medio de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 6 días.

Balín	Temperatura (°C)
1	49,1
2	50,0

Cuadro A. 63 Punto de ablandamiento del residuo inferior de asfalto M-1904-16 modificado posterior a la prueba de estabilidad de 6 días.

Balín	Temperatura (°C)
1	49,0
2	49,4

Cuadro A. 64 Ensayo de ductilidad a 25 °C del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Distancia (cm)
1	8,4
2	9,2
3	11,3

Cuadro A. 65 Punto de inflamación del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Punto de inflamación (°C)
1	345
2	347

Cuadro A. 66 Penetración a 25 °C del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Distancia (1/10 mm)				Promedio
	1	2	3	4	
1	26,5	26,0	25,0	25,8	25,83
2	26,0	25,5	25,0	25,0	25,38
Promedio total					25,60

Cuadro A. 67 Penetración a 25 °C a residuo TFO del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Distancia (1/10 mm)				Promedio
	1	2	3	4	
1	28,5	28,5	27,5	26,5	27,75
2	26,5	27,5	27,5	26,5	27,00
Promedio total					27,38

Cuadro A. 68 Datos de la primera muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 60 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Ciclo	Velocidad (1/min)	Torque (μNm)	Viscosidad (Pa·s)
1	0,997	75 000	1 330
2	0,994	75 000	1 330
3	0,996	75 000	1 330
4	0,990	75 000	1 340
5	0,993	75 000	1 330
6	0,994	75 000	1 330
7	0,992	75 000	1 330
8	0,994	75 000	1 330
9	0,989	75 000	1 340
10	0,990	75 000	1 340
Promedio	0,993	75 000	1 333

Cuadro A. 69 Datos de la segunda muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 60 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Ciclo	Velocidad (1/min)	Torque (μNm)	Viscosidad (Pa·s)
1	0,950	75 000	1 390
2	0,954	75 000	1 390
3	0,954	75 000	1 390
4	0,962	75 000	1 370
5	0,959	75 000	1 380
6	0,957	75 000	1 380
7	0,963	75 000	1 370
8	0,958	75 000	1 380
9	0,958	75 000	1 380
10	0,956	75 000	1 380
Promedio	0,957	75 000	1 381

Cuadro A. 70 Datos de la tercera muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 60 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Ciclo	Velocidad (1/min)	Torque (μNm)	Viscosidad (Pa·s)
1	0,950	75 000	1 370
2	0,961	75 000	1 360
3	0,950	75 000	1 370
4	0,962	75 000	1 370
5	0,952	75 000	1 360
6	0,965	75 000	1 370
7	0,951	75 000	1 350
8	0,952	75 000	1 350
9	0,961	75 000	1 350
10	0,952	75 000	1 350
Promedio	0,956	75 000	1 360

Cuadro A. 71 Datos de la primera muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Ciclo	Velocidad (1/min)	Torque (μNm)	Viscosidad (Pa·s)
1	40	2 610	1,15
2	40	2 600	1,15
3	40	2 600	1,15
4	40	2 590	1,14
5	40	2 590	1,14
6	40	2 590	1,14
7	40	2 590	1,14
8	40	2 580	1,14
9	40	2 580	1,14
10	40	2 580	1,14
Promedio	40	2 591	1,14

Cuadro A. 72 Datos de la segunda muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Ciclo	Velocidad (1/min)	Torque (μNm)	Viscosidad (Pa·s)
1	40	3 120	1,38
2	40	3 120	1,37
3	40	3 110	1,37
4	40	3 110	1,37
5	40	3 110	1,37
6	40	3 110	1,37
7	40	3 100	1,37
8	40	3 100	1,37
9	40	3 100	1,37
10	40	3 100	1,37
Promedio	40	3 108	1,37

Cuadro A. 73 Datos de la tercera muestra obtenidos del viscosímetro dinámico rotacional a 135 °C para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Ciclo	Velocidad (1/min)	Torque (μNm)	Viscosidad (Pa·s)
1	40	3 140	1,39
2	40	3 140	1,38
3	40	3 120	1,38
4	40	3 120	1,37
5	40	3 120	1,37
6	40	3 110	1,37
7	40	3 110	1,37
8	40	3 100	1,37
9	40	3 100	1,37
10	40	3 100	1,37
Promedio	40	3 116	1,37

Cuadro A. 74 Datos de la primera corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C envejecido mediante PAV.

Temperatura (°C)		22	25	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
1	44,3327	5 698,59	46,8696	4 037,97
2	44,4614	5 676,99	47,0363	4 011,68
3	44,5278	5 657,79	47,1058	3 997,90
4	44,5720	5 642,78	47,1470	3 987,85
5	44,5750	5 659,66	47,1755	3 981,70
6	44,5754	5 667,92	47,1932	3 978,16
7	44,5996	5 656,70	47,2082	3 975,31
8	44,6249	5 645,48	47,2186	3 973,29
9	44,6297	5 647,57	47,2285	3 971,25
10	44,6036	5 672,00	47,2351	3 970,44
Promedio	44,5502	5 662,55	47,1418	3 988,56

Cuadro A. 75 Datos de la segunda corrida obtenidos del reómetro de corte dinámico para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C envejecido mediante PAV.

Temperatura (°C)		22	25	
Ciclo	Ángulo de fase δ (°)	$G^*\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)
1	43,8762	5 556,35	46,3412	3 978,93
2	43,9901	5 547,72	46,5092	3 953,80
3	44,0468	5 534,94	46,5797	3 939,07
4	44,0821	5 527,74	46,6222	3 929,85
5	44,1129	5 522,28	46,6502	3 924,09
6	44,1256	5 522,56	46,6696	3 918,41
7	44,1136	5 538,97	46,6847	3 916,05
8	44,1283	5 535,33	46,6962	3 913,99
9	44,1402	5 530,55	46,7047	3 912,89
10	44,1481	5 530,06	46,7143	3 909,73
Promedio	44,0764	5 534,65	46,6172	3 929,68

Cuadro A. 76 Datos obtenidos del reómetro BBR para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Temperatura (°C)	Rigidez (MPa)		Pendiente
	Medida	Estimada	
0	44,8506	44,9921	0,3543
-6	107,8635	107,9635	0,3156
-12	245,0835	244,7330	0,2886

Cuadro A. 77 Datos de la primera corrida de barrido de frecuencia para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Frecuencia f (Hz)	Módulo Complejo G* (kPa)	Ángulo de fase (°)	Módulo de almacenamiento G' (kPa)	log f (Hz)	log G' (kPa)
0,1	2 168,59	47,979	1 451,67	-1	3,1619
0,16	2 767,51	46,655	1 899,60	-0,8000009	3,2787
0,25	3 509,72	45,372	2 465,59	-0,5999994	3,3919
0,40	4 407,58	44,151	3 162,45	-0,4000002	3,5000
0,63	5 515,44	42,950	4 037,05	-0,2000009	3,6061
1	6 861,15	41,780	5 116,39	0	3,7090
1,58	8 456,60	40,667	6 414,46	0,1999999	3,8072
2,51	10 375,40	39,582	7 996,43	0,4000002	3,9029
3,98	12 662,60	38,534	9 905,20	0,6000002	3,9959
6,31	15 366,40	37,524	12 187,00	0,7999999	4,0859
10	18 555,00	36,554	14 905,20	1	4,1733
15,85	22 305,10	35,618	18 132,10	1,199988	4,2584
25,12	26 703,60	34,720	21 948,80	1,400030	4,3414
30,00	28 591,40	34,387	21 948,80	1,477149	4,3414

Cuadro A. 78 Datos de la segunda corrida de barrido de frecuencia para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Frecuencia f (Hz)	Módulo Complejo G* (kPa)	Ángulo de fase (°)	Módulo de almacenamiento G' (kPa)	log f (Hz)	log G' (kPa)
0,1	2 096,07	48,008	1 402,34	-1	3,1469
0,16	2 672,05	46,701	1 832,51	-0,8000009	3,2630
0,25	3 378,25	45,449	2 370,02	-0,5999994	3,3748
0,40	4 251,54	44,227	3 046,59	-0,4000002	3,4838
0,63	5 310,93	43,048	3 881,15	-0,2000009	3,5890
1	6 593,34	41,907	4 906,99	0	3,6908
1,58	8 150,74	40,788	6 171,20	0,1999999	3,7904
2,51	10 023,4	39,698	7 712,23	0,4000002	3,8872
3,98	12 258,6	38,646	9 574,25	0,6000002	3,9811
6,31	14 888,3	37,638	11 789,80	0,7999999	4,0715
10	17 991,5	36,667	14 431,30	1	4,1593
15,85	21 648,1	35,726	17 574,30	1,1999882	4,2449
25,12	25 939,2	34,822	21 294,40	1,4000300	4,3283
30,00	27 785,6	34,479	22 904,60	1,4771488	4,3599

Cuadro A. 79 Coeficientes del barrido de amplitud para dos corridas con el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75% de polímero, 4 horas y 190 °C.

Coeficiente	Corrida		Promedio
	1	2	
<i>a</i>	3 625 421	5 042 335	4 333 878
<i>b</i>	-4,0225	-4,0137	-4,0181

APÉNDICE B. DATOS INTERMEDIOS

Cuadro B. 1 Porcentaje de recuperación elástica del asfalto M-1904-16 original.

Muestra	Distancia (cm)	% recuperación
1	1,5	7,5
2	2,0	10,0
3	1,8	9,0
Promedio	1,77	8,8

Cuadro B. 2 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1904-16 original en horno de película delgada rotativa vertical (RTFO).

Muestra	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Cambio de masa (%)
1	35,017	34,991	-0,074
2	35,049	35,022	-0,077
Promedio	35,033	35,007	-0,076

Cuadro B. 3 Porcentaje de cambio de masa del asfalto M-1904-16 original en horno de envejecimiento a presión (PAV).

Muestra	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Cambio de masa (%)
1	50,112	50,422	0,619
2	50,058	50,206	0,296
Promedio	50,085	50,314	0,457

Cuadro B. 4 Datos de promedio y varianza muestral de los distintos experimentos del diseño factorial 2^3 .

K	A	B	C	$J_{nr3,2}(\text{kPa}^{-1})$		Promedio	S_y^2
				1	2		
1	-1	-1	-1	0,70	0,74	0,72	0,0008
2	1	-1	-1	1,10	1,20	1,15	0,0050
3	-1	1	-1	1,00	0,98	0,99	0,0002
4	1	1	-1	0,59	0,73	0,66	0,0098
5	-1	-1	1	1,28	1,32	1,30	0,0008
6	1	-1	1	0,99	1,00	1,00	0,0001
7	-1	1	1	0,58	0,58	0,58	0,0000
8	1	1	1	0,66	0,67	0,67	0,0001

Cuadro B. 5 Parámetros para la determinación del intervalo de no significancia.

Parámetro	Valor	Unidades
s_y^2	0,00209	kPa^{-2}
S_E	0,02284	kPa^{-1}
η	8	adim.

Cuadro B. 6 Efectos e interacciones de las distintas variables del diseño factorial 2^3 .

K	Efecto			Interacción			
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-0,72	-0,72	-0,72	0,72	0,72	0,72	-0,72
2	1,15	-1,15	-1,15	-1,15	-1,15	1,15	1,15
3	-0,99	0,99	-0,99	-0,99	0,99	-0,99	0,99
4	0,66	0,66	-0,66	0,66	-0,66	-0,66	-0,66
5	-1,30	-1,30	1,30	1,30	-1,30	-1,30	1,30
6	1,00	-1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	-1,00
7	-0,58	0,58	0,58	-0,58	-0,58	0,58	-0,58
8	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Promedio	-0,01	-0,16	0,004	-0,05	-0,04	-0,10	0,14

Cuadro B. 7 Corrección de punto de inflamación por presión atmosférica

Muestra	Punto de inflamación (°C)	Punto de inflamación con corrección por presión (°C)
1	345	348
2	347	350
Promedio	346	349

Cuadro B. 8 Porcentaje de recuperación elástica del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Distancia (cm)	% recuperación
1	3,5	17,5
2	3,6	18,0
3	3,4	17,0
Promedio	3,50	17,5

Cuadro B. 9 Porcentaje de cambio de masa en horno de película delgada horizontal (TFO) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Cambio de masa (%)
1	50,547	50,567	0,0396
2	52,103	52,076	-0,0518
3	50,265	50,271	0,0119
4	50,218	50,24	0,0438
Promedio	50,783	50,789	0,0109

Cuadro B. 10 Porcentaje de cambio de masa en horno de película delgada rotativa vertical (RTFO) del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Cambio de masa (%)
1	35,017	35,012	-0,0143
2	35,039	35,035	-0,0114
3	35,015	35,014	-0,0029
4	35,067	35,064	-0,0086
Promedio	35,035	35,031	-0,0093

Cuadro B. 11 Porcentaje de cambio de masa en horno de envejecimiento a presión (PAV) del asfalto M-1904-16 16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Muestra	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Cambio de masa (%)
1	50,127	49,871	-0,5107
2	49,718	49,499	-0,4405
Promedio	49,923	49,685	-0,4756

Cuadro B. 12 Parámetro α obtenido del barrido de frecuencia del asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Parámetro	Corrida		Promedio
	1	2	
α	2,0112	2,0068	2,0090

Cuadro B. 13 Vida de fatiga obtenida con el modelo de ley de fatiga para deformaciones aplicadas de 1 % hasta 10 % para el asfalto M-1904-16 modificado a 0,75 % de polímero, 4 horas y 190 °C.

Deformación aplicada γ (%)	Vida de fatiga N_f (ciclos)
1	4 333 878
1,5	850 075
2	267 631
2,5	109 198
3	52 495
3,5	28 260
4	16 527
4,5	10 297
5	6 743
5,5	4 598
6	3 242
6,5	2 350
7	1 745
7,5	1 323
8	1 021
8,5	800
9	636
9,5	512
10	416

APÉNDICE C. MUESTRA DE CÁLCULO

C.1 Conversión viscosidad cinemática a viscosidad dinámica

Se realiza la conversión de viscosidad cinemática a viscosidad dinámica, esto empleando la siguiente relación:

$$\mu = \nu \cdot \rho \quad (C.27)$$

Con una densidad del fluido de $\rho = 1,031 \text{ g/cm}^3$, utilizando el dato del Cuadro 6.1, columna 2, fila 3:

$$\mu = \frac{520 \text{ mm}^2}{\text{s}} \cdot \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right)^2 \cdot \left(\frac{1,031 \text{ g}}{\text{cm}^3}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}\right) \cdot \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}\right)^3 = 0,5361 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

$$\mu = 0,5361 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Este resultado se encuentra tabulado en el Cuadro 6.1, columna 2, fila 4.

C.2 Porcentaje de recuperación elástica

Para calcular el porcentaje de recuperación elástica de cada muestra, se emplea la siguiente fórmula:

$$P_n = \frac{L_{f,n}}{L_{I,n}} \times 100 \quad (C.1)$$

Para la muestra 1, utilizando datos del Cuadro A.3, columna 2, fila 2:

$$P_1 = \frac{1,5 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} \times 100 = 7,5\%$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.1, columna 3, fila 2.

El porcentaje de recuperación elástica total se obtiene del promedio de los porcentajes obtenidos para las muestras:

$$P = \frac{\sum_{n=1}^3 P_n}{3} \quad (C.2)$$

Promediando los datos del Cuadro B.1, columna 2, de la fila 2 hasta la fila 4, se obtiene para porcentaje de recuperación elástica:

$$P = \frac{26,5\%}{3} = 8,8\%$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.1, columna 3, fila 5.

C.3 Cambio de masa del asfalto envejecido

Para calcular el porcentaje de cambio de masa del asfalto para una muestra envejecida en un horno RTFO, PAV o TFO, se emplea la siguiente fórmula:

$$X_n = \frac{m_{f,n} - m_{i,n}}{m_{i,n}} \times 100 \quad (C.3)$$

Para la muestra 1 de asfalto original M-1904-16 envejecida en el horno RTFO, utilizando datos del Cuadro B.2, columna 2, fila 2:

$$X_1 = \frac{34,991\text{ g} - 35,017\text{ g}}{35,017\text{ g}} \times 100 = -0,074\%$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.2, columna 4, fila 2.

El porcentaje de cambio de masa del asfalto envejecido se obtiene del promedio de los porcentajes obtenidos para las muestras:

$$X = \frac{\sum_{n=1}^3 X_n}{2} \quad (C.4)$$

Para la muestra de asfalto original M-1904-16 envejecido en el horno RTFO, promediando los datos del Cuadro B.2, columna 4, de la fila 2 y la fila 3, se obtiene para porcentaje de cambio de masa:

$$X = \frac{-0,151\%}{3} = -0,076\%$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.2, columna 4, fila 4.

C.4 Determinación del intervalo de no significancia del diseño factorial

Para realizar el análisis estadístico del diseño factorial, se obtiene el intervalo de no significancia por medio del cálculo de la varianza, el error de estimación y los grados de libertad del diseño. Este intervalo permite delimitar los efectos e interacciones significativos en la modificación de asfaltos con plástico reciclado proveniente de envases de agroquímicos.

Promedio aritmético

Primero, se calcula el promedio de los datos de deformación no recuperable de las dos corridas para cada experimento mediante la siguiente relación:

$$\bar{y}_K = \frac{y_{K,1} + y_{K,2}}{2} \quad (C.5)$$

Utilizando los datos del Cuadro 6.7 fila 2, columnas 5 y 6 respectivamente:

$$\bar{y}_1 = \frac{(0,70 \text{ kPa}^{-1}) + (0,74 \text{ kPa}^{-1})}{2} = 0,72 \text{ kPa}^{-1}$$

Este resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.4, columna 7, fila 2. El mismo cálculo se lleva a cabo para cada uno de los experimentos del diseño factorial.

Varianza muestral

Luego, se calcula la varianza muestral de los datos de deformación no recuperable de cada experimento de la siguiente manera:

$$S_{y_K}^2 = \frac{(y_{K,1} - \bar{y}_K)^2}{(p-1)} + \frac{(y_{K,2} - \bar{y}_K)^2}{(p-1)} \quad (C.6)$$

Utilizando $p = 2$ por el número de niveles del diseño factorial y los datos del Cuadro 6.7 fila 2, columnas 5 y 6:

$$S_{y_1}^2 = \frac{[(0,70 \text{ kPa}^{-1}) - (0,72 \text{ kPa}^{-1})]^2}{(2-1)} + \frac{[(0,74 \text{ kPa}^{-1}) - (0,72 \text{ kPa}^{-1})]^2}{(2-1)}$$

$$S_{y_1}^2 = 0,0008 \text{ kPa}^{-2}$$

El resultado obtenido se encuentra tabulado en el Cuadro B.4, columna 8, fila 2. Este mismo cálculo se realiza para cada uno de los experimentos del diseño.

Estimador de varianza

Con los resultados anteriores, se calcula el estimador de varianza con la siguiente fórmula:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{K=1}^8 S_{y_K}^2}{K} \quad (C.7)$$

Utilizando $K = 8$ como número de experimentos y la suma de los datos del Cuadro B.4, columna 5, de la fila 2 hasta la fila 9, se obtiene:

$$s_y^2 = \frac{0,0167 \text{ kPa}^{-2}}{8} = 0,00209 \text{ kPa}^{-2}$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.5, columna 2, fila 2.

Error de estimación

El error de estimación del diseño factorial se calcula mediante la siguiente relación:

$$S_E^2 = (s_y^2) \cdot \frac{4}{K \cdot p} \quad (C.8)$$

Utilizando $K = 8$ como número de experimentos y $p = 2$ por el número de niveles:

$$S_E^2 = (0,00209 \text{ kPa}^{-2}) \cdot \frac{4}{8 \cdot 2} = 0,00052 \text{ kPa}^{-2}$$

Así, despejando, se obtiene el error de estimación:

$$S_E = \sqrt{(0,00052 \text{ kPa}^{-2})} = 0,02284 \text{ kPa}^{-1}$$

Este resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.5, columna 2, fila 3.

Grados de libertad

Para la determinación de los grados de libertad del diseño factorial, se emplea el siguiente modelo:

$$\eta = K \cdot (p - 1) \quad (C.9)$$

Utilizando $K = 8$ como cantidad de experimentos y $p = 2$ por el número de niveles:

$$\eta = 8 \cdot (2 - 1) = 8$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.5, columna 2, fila 4.

Intervalo de no significancia

El intervalo de no significancia:

$$Int = [-t_{student} * S_E; t_{student} * S_E] \quad (C.10)$$

Para $\eta = 8$ grados de libertad y una confianza del 95%, se utiliza un $t_{student} = 1,746$

$$Int = [-1,746 * 0,02284; 1,746 * 0,02284]$$

Así, se obtiene el siguiente intervalo de no significancia:

$$Int = [-0,0399; 0,0399]$$

C.5 Cálculo de efectos e interacciones del diseño factorial

Se realiza el cálculo de los efectos y las interacciones de los distintos factores para poder compararlos con el intervalo de no significancia y determinar su nivel de influencia sobre la variable respuesta.

Efectos de los factores del diseño factorial

Primero, se calcula el efecto de cada factor de diseño en cada uno de los experimentos mediante las siguientes relaciones:

$$F_{A,K} = A_K \cdot \bar{y}_K \quad (C.11)$$

$$F_{B,K} = B_K \cdot \bar{y}_K \quad (C.12)$$

$$F_{C,K} = C_K \cdot \bar{y}_K \quad (C.13)$$

Para el efecto de A, utilizando datos del Cuadro B.4, columna 2, fila 2 y de la columna 7, fila 2:

$$F_{A,1} = (-1) \cdot (0,72) = -0,72$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.6, columna 2, fila 2.

El efecto principal de cada factor en el diseño factorial se obtiene del promedio de los efectos de ese factor en los experimentos:

$$F_A = \frac{\sum_{K=1}^8 F_{A,K}}{8} \quad (C.14)$$

$$F_B = \frac{\sum_{K=1}^8 F_{B,K}}{8} \quad (C.15)$$

$$F_C = \frac{\sum_{K=1}^8 F_{C,K}}{8} \quad (C.16)$$

Promediando los datos del Cuadro B.6, columna 2, de la fila 2 hasta la fila 9, se obtiene para el efecto total de A:

$$F_A = -0,01$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.6, columna 2, fila 10.

Interacciones entre los factores del diseño factorial

Se calcula el efecto de la interacción entre los distintos factores en cada uno de los experimentos mediante los siguientes modelos:

$$I_{AB,K} = A_K \cdot B_K \cdot \bar{y}_K \quad (C.17)$$

$$I_{AC,K} = A_K \cdot C_K \cdot \bar{y}_K \quad (C.18)$$

$$I_{BC,K} = B_K \cdot C_K \cdot \bar{y}_K \quad (C.19)$$

$$I_{ABC,K} = A_K \cdot B_K \cdot C_K \cdot \bar{y}_K \quad (C.20)$$

Para la interacción entre A y B, utilizando los datos del Cuadro B.4, columna 2, fila 2, de la columna 3, fila 2 y de la columna 7, fila 2:

$$I_{AB,1} = (-1) \cdot (-1) \cdot (0,72) = 0,72$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.6, columna 5, fila 2.

La interacción principal entre los distintos factores del diseño se obtiene del promedio de los efectos de las interacciones:

$$I_{AB} = \frac{\sum_{K=1}^8 I_{AB,K}}{8} \quad (C.21)$$

$$I_{AC} = \frac{\sum_{K=1}^8 I_{AC,K}}{8} \quad (C.22)$$

$$I_{BC} = \frac{\sum_{K=1}^8 I_{BC,K}}{8} \quad (C.23)$$

$$I_{ABC} = \frac{\sum_{K=1}^8 I_{ABC,K}}{8} \quad (C. 24)$$

Promediando los datos del Cuadro B.6, columna 5, de la fila 2 hasta la fila 9, se obtiene para el efecto total de la interacción entre A y B:

$$I_{AB} = -0,05$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.6, columna 5, fila 10.

C.6 Corrección de punto de inflamación por presión atmosférica

Se realiza una corrección al punto de inflamación de cada muestra considerando el valor de presión atmosférica al momento de realizar la prueba, esto empleando la siguiente fórmula:

$$M_{\text{corregido},n} = M_n + 0,033 \cdot (760 - N) \quad (C. 25)$$

Con una presión atmosférica de 660 mmHg y el dato del Cuadro A.65, columna2, fila 2

$$M_{\text{corregido},1} = 345 \text{ }^\circ\text{C} + 0,033 \cdot (760 \text{ mmHg} - 660 \text{ mmHg}) = 348 \text{ }^\circ\text{C}$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.7, columna 3, fila 2.

El punto de inflamación del asfalto se obtiene del promedio de las temperaturas de inflamación obtenidas para las muestras:

$$M_{\text{corregido}} = \frac{\sum_{n=1}^2 M_{\text{corregido},n}}{2} \quad (C. 26)$$

Promediando los datos del Cuadro B.7, columna 3, fila 2 y la fila 3, se obtiene el punto de inflamación del asfalto modificado:

$$M_{\text{corregido}} = \frac{348 \text{ }^\circ\text{C} + 350 \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 349 \text{ }^\circ\text{C}$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.7, columna 3, fila 4.

C.7 Cálculo del parámetro α

Utilizando la pendiente de la recta obtenida de los datos de barrido de frecuencia, se realiza el cálculo del parámetro α a partir de la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{1}{n} \quad (C. 28)$$

Con la pendiente $n = 0,4972$ de la Figura 6.17,

$$\alpha = \frac{1}{0,4972} = 2,0112$$

Este resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.12, columna 2, fila 3.

C.8 Cálculo de vida de fatiga

Para calcular la vida de fatiga de una muestra de asfalto empleando los coeficientes generados por el barrido de amplitud, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Nf = a(\gamma)^b \quad (C. 29)$$

Para un $\gamma = 2,5\%$, utilizando los datos del Cuadro A.79, columna 4, de la fila 2 y columna 4, de la fila 3:

$$Nf = 4333878 \cdot (2,5\%)^{-4,0181} = 109198 \text{ ciclos}$$

Este resultado se encuentra tabulado en el Cuadro 6.16, columna 2, fila 2.

APÉNDICE D. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

D.1 MODIFICACIÓN DE ASFALTO CON PLÁSTICO DE ENVASES DE AGROQUÍMICOS

Previo a iniciar la modificación del asfalto, se deben definir las condiciones de tiempo, temperatura y porcentaje en masa de polímero a las cuales se va a modificar.

- 1- Precalentar asfalto en un horno hasta que esté fluido.
- 2- Montar el equipo de modificación que incluye el recipiente de mezclado, el controlador de temperatura y el agitador con aspa de dispersión.
- 3- Precalentar recipiente a 140 °C aproximadamente.
- 4- Pesar aproximadamente 600 g de asfalto y la dosis requerida del polímero molido para alcanzar el porcentaje seleccionado.
- 5- Colocar el asfalto previamente calentado dentro del recipiente y subir la temperatura con el controlador a la temperatura de modificación del proyecto.
- 6- Encender el agitador a una velocidad de 500 rpm cuando se alcance una temperatura cercana a los 150 °C.
- 7- Continuar calentando el asfalto hasta la temperatura de modificación deseada.
- 8- Una vez alcanzada la temperatura, agregar el polímero molido poco a poco para evitar acumulaciones.
- 9- Mantener la temperatura y la agitación constante durante todo el tiempo de modificación.
- 10- Una vez pasado este tiempo, detener la agitación, apagar el controlador y desconectar el recipiente.
- 11- Trasvasar todo el asfalto modificado a un beaker debidamente rotulado.
- 12- Lavar bien el recipiente de mezclado y el agitador con queroseno (canfín).
- 13- Desechar el canfín en el recipiente adecuado.
- 14- Guardar el equipo y dejar el lugar de trabajo limpio y ordenado.

ANEXOS

Anexo 1. Caracterización por viscosidad y penetración del asfalto original M-1904-16 realizada por el LANAMME.

Tabla N° 1: Ensayos al ligante asfáltico
Clasificado por viscosidad
Muestra: M-1904-16

Método de ensayo ^(A)	Ensayo	Resultado	Unidades	Límites de especificación	Criterio de aceptación
IT-LA-02 (ASTM D2171; AASHTO T202)	Viscosidad a 60 °C	3 166 ± 12	Poises	2400- 3600	Cumple
IT-LA-03 (AASHTO T 202/ ASTM 2170)	Viscosidad a 135 °C	520 ± 3	mm ² /s	350 mín.	Cumple
IT-LA-01 (ASTM D5; AASHTO T49)	Penetración a 25 °C (100 g, 5 s)	55 ± 2	1/10 mm	50 mín.	Cumple
IT-LA-05 (ASTM D92; AASHTO T48)	Punto de Inflamación Cleveland Copa Abierta	354 ± 7	°C	232 mín.	Cumple
IT-LA-13 (ASTM D2042; AASHTO T44)	Solubilidad en tricloroetileno	99,98 ± 0,02	%	99,0 mín.	Cumple
IT-LA-04 (ASTM D1754; AASHTO T179)	Cambio de masa por calentamiento, TFO	-0,03 ± 0,02	%	1,0 máx. ⁽²⁾	Cumple
IT-LA-02 (ASTM D2171; AASHTO T202)	Viscosidad post-pérdida a 60 °C	7 614 ± 25	Poises	15000 máx.	Cumple
IT-LA-24 (ASTM D113; AASHTO T51)	Ductilidad post-pérdida a 25 °C (5 cm/min) ⁽¹⁾	100,0 ± 0,2	cm	40 mín.	Cumple
IT-LA-11 (ASTM D 70)	Densidad a 25 °C ⁽²⁾	1,031 ± 0,001	g/cm ³	No aplica	-
Cálculo	Índice de Susceptibilidad Térmica, VTS	3,45	No aplica	3,3 - 3,9 ⁽²⁾	Cumple
Cálculo	Razón de viscosidades	2,41	No aplica	máx 3 ⁽²⁾	Cumple
Clasificación por grado de viscosidad		AC-30			
Clasificación por grado de penetración		50-60			

Notas:

(A) Método del LanammeUCR. Entre paréntesis se especifica el método internacional.

(1) La capacidad de elongación máxima del ductilómetro es de 100 cm.

(2) No se especifica en la normativa nacional

Figura A. 1 Análisis del asfalto M-1904-16 según la clasificación por grado de viscosidad (LANAMME, 2016).

Anexo 2. Ensayos agrupados según clasificación empleada por el LANAMME.

Grado de Viscosidad (ASTM D3381)

1. Punto de inflamación (ASTM D92)
2. Viscosidad cinemática a 135 °C (ASTM D2170)
3. Viscosidad absoluta a 60 °C (ASTM D2171)
4. Solubilidad (ASTM D2042)
5. Penetración (ASTM D5)
6. Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada (TFO) (ASTM D1754)
7. Viscosidad absoluta a 60 °C a residuo del RTFO (ASTM D2171)
8. Ductilidad a 25 °C (ASTM D113)

Grado de Desempeño PG (ASTM D6393)

1. Punto de inflamación (ASTM D92)
2. Viscosidad cinemática a 135 °C (ASTM D2170)
3. Módulo de deformabilidad y módulo de fatiga con reómetro de corte dinámico (ASTM D7175)
4. Efecto de calentamiento y ventilación en una película delgada rotativa (RTFO) (ASTM D2872)
5. Efecto de envejecimiento a presión (PAV) (ASTM D6521)
6. Módulo de rigidez con reómetro de vigas flexible (BBR) (ASTM D6648)

Grado de Desempeño PG Plus (AAHTO M320)

1. Fluencia y recuperación de esfuerzo múltiple (MSCR) (ASTM D7405)

Anexo 3. Zonificación climática de temperatura

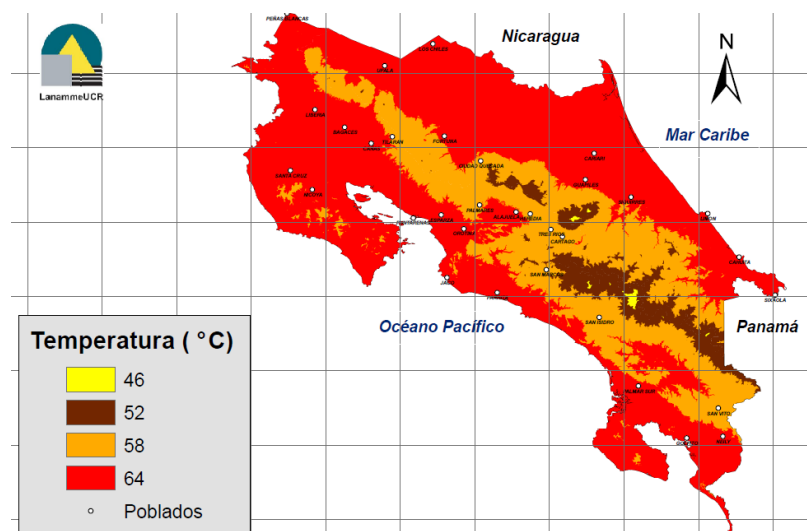


Figura A. 2 Mapa de zonificación climática de temperatura superior (Rodríguez & Salazar, 2015).

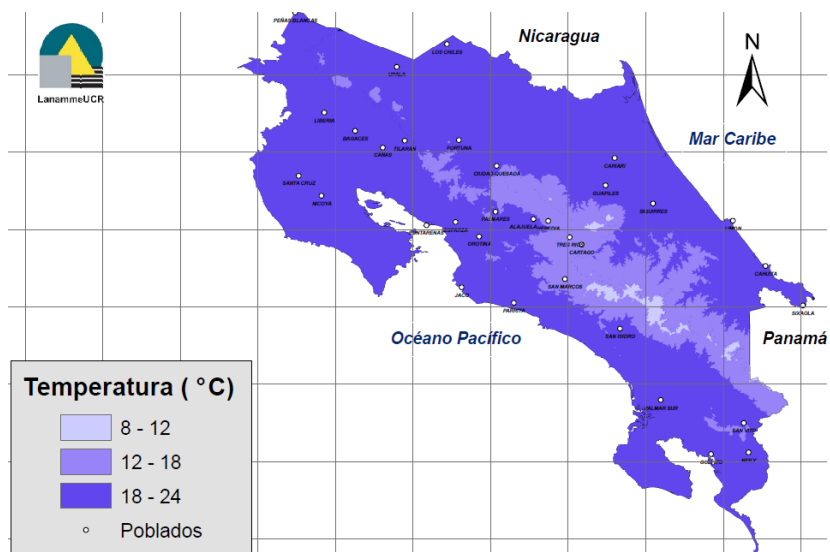


Figura A. 3 Mapa de zonificación climática de temperatura inferior (Rodríguez & Salazar, 2015).