



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas
tibias elaboradas con asfalto modificado con hule
de neumáticos pretratado y activado.

Tesis para obtener el grado de:

**Maestra en Infraestructura del Transporte
en la Rama de las Vías Terrestres**

Presenta:

Ing. Eliceth Llajaira Roa Hernández

Director:

Dr. Jorge Alarcón Ibarra

Co-director:

M.I Rey Omar Adame Hernández

Morelia, Michoacán, noviembre 2023



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas tibias
elaboradas con asfalto modificado con hule de neumáticos
pretratado y activado.
Trabajo escrito**

**Opción a titulación:
Tesis**

**Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestra
en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres**

**Presenta:
Ing. Eliceth Lljaira Roa Hernández**

**Director:
Dr. Jorge Alarcón Ibarra**

**Co-director:
M.I Rey Omar Adame Hernández**

SINODALES

**Dr. Jorge Alarcón Ibarra
Presidente**

**M.I. Omar Adame Hernández
Vocal**

**Dr. Rafael Soto Espitia
Vocal**

**Dr. Carlos Chávez Negrete
Vocal**

**Dr. Antonio Hurtado Beltrán
Vocal**

Morelia, Michoacán, noviembre 2023

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios que me permitió la vida, la oportunidad de haber llegado hasta aquí, la fortaleza y la salud tanto física como emocional para salir de mi zona de confort y crecer profesionalmente. De igual manera, debo decir que hay un grupo de personas e instituciones, que fueron parte fundamental durante este proceso, sin su apoyo el resultado no habría sido el mismo; mi más profundo agradecimiento a mis padres, hermanos y demás familiares por su apoyo incondicional, por estar siempre ahí para motivarme a continuar, así fuese a la distancia.

Agradezco, el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el financiamiento económico para la realización de mis estudios de maestría en México.

De igual forma, agradecer al Dr. Jorge Alarcón Ibarra por haberme brindado su orientación, apoyo y confianza para el desarrollo de este trabajo, asimismo, por brindarme los medios necesarios para el alcance de los objetivos propuestos en este proyecto.

De manera muy especial agradezco a mi Co-asesor M.I. Rey Omar Adame Hernández por guiarme, por motivarme, por su confianza en mí, por su disponibilidad, tiempo y dedicación para compartir sus conocimientos.

Mi agradecimiento a todo el equipo de laboratorio de Lasfalto por la oportunidad de realizar todo el proceso experimental en sus instalaciones. En especial al Ing. Enrique Villa y el Ing. Fulgencio Noh Pat, por el tiempo, esfuerzo y dedicación para instruirme en el desarrollo del trabajo experimental.

Gracias a todos mis amigos nicaragüenses que estuvieron presentes siempre de alguna manera, durante estos dos años, para brindarme su apoyo, por siempre confiar en mí, en especial a Katering Martínez, gracias, amiga; agradezco también a todos los que me brindaron su amistad en este hermoso país que es México y me ayudaron a que la nostalgia por mi familia y mi país fuese un poco más ligera: Jorge, Carla, Jessica, Misael, Edgard, Daniela, Salomón, Paty, muchas gracias.

Agradezco al Lic. Hugo Bandala por su colaboración para el desarrollo de esta investigación y el apoyo brindado para la realización de la estancia de investigación en el laboratorio Lasfalto.

Y por último y no menos importante, agradezco a todo el Núcleo Académico Básico de la Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, por el conocimiento transmitido en el transcurso de mis estudios de maestría, en especial al Dr. Eleazar Arreygue por haberme apoyado desde el proceso de admisión en la maestría.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, por enseñarme que, con Fe, esfuerzo, dedicación y disciplina las metas y los sueños se pueden cumplir.

RESUMEN

El compromiso ambiental y la necesidad de mejorar las características de físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas ha provocado en la industria de los pavimentos el desarrollo de nuevas tecnologías que promuevan el uso eficiente y económico de la energía y, con ello, la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante los procesos que involucran la construcción de una estructura de pavimento. Las mezclas asfálticas en tibio o WMA por sus siglas en inglés, se ha convertido en un tema de investigación importante, ya que ofrece una solución potencial al consumo energético y la reducción de las emisiones de GEI durante la producción y colocación de la carpeta asfáltica.

Por otro lado, desde hace más de 50 años se ha promovido la incorporación de llantas de desecho en la producción de mezclas asfálticas; con el fin de reciclar los neumáticos fuera de uso (NFU) y reducir la contaminación ambiental provocada cuando estos son descartados; de acuerdo a la literatura el hule de neumáticos mejora el desempeño de las mezclas asfálticas en cuanto a resistencia a la deformación permanente, vida a fatiga, fisuración térmica y reduce los costos de mantenimiento; no obstante, a pesar de los beneficios de desempeño que brinda a las mezclas asfálticas, requieren mayores temperaturas de producción y compactación que una mezcla convencional, ya que el hule de neumáticos otorga mayor viscosidad al ligante asfáltico.

En esta tesis se implementó la tecnología WMA con un aditivo orgánico (TB-1) a un asfalto convencional con el objetivo de emplear este asfalto para diseñar y analizar el comportamiento de mezclas tibias elaboradas con 2% de polvo de neumáticos pretratado y activado (CR-PA) con relación a la masa de la mezcla, incorporado por vía semihúmeda, reduciendo las temperaturas de mezclado y compactación por debajo de las convencionales, sin sacrificar las propiedades de desempeño del concreto asfáltico.

La evaluación se realizó a través de ensayos de desempeño para mezclas asfálticas de granulometría densa: diseño volumétrico, ensayos de sensibilidad al daño por humedad, deformación permanente, módulo resiliente, módulo dinámico y vida a fatiga. Como resultado se obtuvo que el contenido óptimo de asfalto de mezclas asfálticas tibias de granulometría densa que incorporan hule de neumáticos fue de 5.6%, el aditivo para mezcla tibia utilizado permitió la elaboración de las mezclas a 135°C y compactación hasta 115°C, asimismo, se logró diseñar una mezcla asfáltica tibia con propiedades mecánicas de una mezcla de alto desempeño pero que además de incorporar un residuo, se puede mezclar y compactar a temperaturas inferiores al de una mezcla asfáltica en caliente, lo cual reduce las emisiones de gases de efecto invernadero durante la producción, tendido y compactación de la mezcla asfáltica.

Palabras clave: mezclas asfálticas tibias, polvo de neumáticos, pretratado y activado, vía semihúmeda, aditivo orgánico.

ABSTRACT

The environmental commitment and the requirement to improve the characteristics, physicals and mechanicals of asphalt mixtures has led to the development of new technologies in the pavement industry that promote the efficient and economic use of energy and, with it, the need to reduce greenhouse gas (GHG) emissions during the processes that involve the construction of a pavement structure. Warm mix asphalt, or WMA, has become an important research topic, as it offers a potential solution to energy consumption and the reduction of GHG emissions during the production and placement of the asphalt layer.

On the other hand, for more than 50 years the incorporation of disused tires in the production of concrete and asphalt mixtures has been promoted; in order to recycle out-of-use tires (NFU) and reduce environmental pollution caused when they are discarded; in accordance with to the literature, tire rubber improves the performance of asphalt mixtures in terms of resistance to permanent deformation, fatigue life, thermal cracking and reduces maintenance costs; however, in spite of the performance benefits that it provides to asphalt mixtures, they require higher production and compaction temperatures than a conventional mixture, even tire rubber gives greater viscosity to the asphalt binder.

In this thesis, WMA technology was implemented with an organic additive (TB-1) to a conventional asphalt focus using this asphalt to design and analyze the behavior of warm mixtures made with 2% of pretreated and activated tire dust (CR -PA) in relation to the mass of the mixture incorporated semi-wet, reducing mixing and compaction temperatures below conventional ones, without sacrificing the performance properties of asphalt concrete.

The evaluation was carried out through performance tests for dense granulometry asphalt mixtures, volumetric design, sensitivity tests to moisture damage, permanent deformation, resilient modulus, dynamic modulus, and fatigue life. As a result, it was obtained that the optimal asphalt content of warm asphalt mixtures with dense granulometry that incorporate tire rubber was 5.6%, the additive for warm mixture used allowed the preparation of the mixtures at 135°C and compaction up to 115°C, likewise, it was possible to design a warm asphalt mixture with the mechanical properties of a high-performance mixture but that, in addition to incorporating waste, can be mixed and compacted at lower temperatures than that of a hot asphalt mixture, reducing gas emissions greenhouse effect during the production, placement and compaction of the asphalt mixture.

Keywords: warm mix asphalt, disused tires, pre-treated and activated, semi-wet, organic additive.

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Motivación o justificación.....	4
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Particulares	6
1.5. Estructura de la Investigación	7
II. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Clasificación de las mezclas asfálticas.....	8
2.1.1. Mezclas asfálticas tibias (MAT o Warm Mix Asphalt, WMA).....	8
2.2. Componentes de una mezcla asfáltica.....	9
2.2.1. Agregados Pétreos	9
2.2.2. Propiedades de los agregados pétreos.	10
2.2.3. Características principales de los agregados para pavimento	11
2.2.4. Ligante Asfáltico.....	12
2.2.4.1. Composición y estructura de los ligantes asfálticos	13
2.2.4.2. Propiedades reológicas del asfalto.....	14
2.2.4.3. Clasificación de asfaltos por grado de desempeño (PG)	14
2.2.4.4. Asfaltos convencionales	15
2.2.4.5. Asfaltos modificados	15
2.2.5. Hule de neumáticos fuera de uso en las mezclas asfálticas	16
2.2.5.1. Procesos de incorporación del hule de neumático en la mezcla asfáltica	16
2.2.6. Tecnologías para mezclas asfálticas tibias.....	17
2.2.6.1. Aditivos espumantes.....	17
2.2.6.2. Aditivos orgánicos.....	17
2.2.6.3. Aditivos químicos.....	18
2.2.7. Parámetros de desempeño evaluados en las mezclas asfálticas.....	19
2.2.7.1. Susceptibilidad al daño por humedad.....	19
2.2.7.2. Susceptibilidad a la deformación permanente	20
2.2.7.3. Agrietamiento por fatiga de las mezclas asfálticas.....	21

III. TRABAJOS RELACIONADOS.....22

3.1. Estudios relacionados con el análisis de las características de la mezcla dependiendo de los procesos de incorporación del polvo de NFU.	22
3.1.1. Influence of warm mix additive on internal structure of dry process crumb rubber modified mixtures.	22
3.1.2. Laboratory evaluation of dry process crumb rubber modified mixtures containing Warm Mix Asphalt Additives.	24
3.1.3. Decision support for selecting optimal method of recycling waste tire rubber into wax-based warm mix asphalt based on fuzzy comprehensive evaluation.	25
3.2. Estudios relacionados con el efecto de la reducción de las temperaturas de compactación en mezclas tibias que incorporan polvo de hule de neumáticos.	26
3.2.1. Effects of Compaction Temperature on Volumetric Properties of Rubberized Mixes Containing Warm-Mix Additives.	26
3.3. Estudios en los cuales se evaluaron características y desempeño de mezclas asfálticas tibias que incorporan polvo de neumáticos.	27
3.3.1. Performance and Aging Characteristics of Hot Mixture Asphalt with Crumb Rubber and Warm Mix Asphalt Additives.	27
3.3.2. Rutting Assessment of Crumb Rubber Modifier Modified Warm Mix Asphalt Incorporating Warm Asphalt Additive.	28
3.3.3. Asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives.	29
3.3.4. Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber.	30
3.4. Conclusiones	31

IV. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL32

4.1. Materiales	32
4.1.1. Cemento asfáltico.....	32
4.1.2. Agregados	32
4.1.3. Aditivos para mezclas tibias	32
4.1.4. Polvo de neumáticos reaccionado y activado	33
4.2. Programa experimental	34
4.3. Caracterización de los materiales	38
4.3.1. Calidad de los agregados pétreos.....	38
4.3.1.1. Muestreo de material	39
4.3.1.2. Reducción de muestra de los agregados	39
4.3.1.3. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos	40

4.3.2.	Ensayos para agregado fino	41
4.3.3.	Ensayos para agregado grueso	49
4.3.4.	Caracterización del material asfáltico	62
4.3.4.1.	Asfaltos modificados	63
4.3.4.2.	Evaluación del cemento asfáltico en fase original.....	63
4.3.4.3.	Evaluación del cemento asfáltico después de RTFO.....	68
4.3.4.4.	Envejecimiento acelerado del cemento asfáltico usando la vasija de envejecimiento presurizado (PAV).....	72
4.3.4.5.	Ensayos para determinar las temperaturas de mezclado y compactación	74
4.4.	Diseño volumétrico de la mezcla de acuerdo con el Protocolo AMAAC.....	75
4.4.1	Análisis de la estructura granulométrica.....	76
4.4.2.	Selección del contenido óptimo de asfalto.....	78
4.4.2.1.	Compactación de los especímenes de diseño	78
4.4.2.2.	Elaboración de los especímenes de diseño	79
4.4.3.	Pruebas y cálculos volumétricos de la mezcla	80
4.5.	Evaluación del desempeño de las mezclas asfálticas	86
4.5.1.	Susceptibilidad a la Humedad, Ensayo relación de esfuerzo a la tensión indirecta, TSR (AASHTO T283, ASTM D4867).....	86
4.5.2.	Resistencia a la deformación permanente mediante el ensayo Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324)	88
4.5.3.	Ensayo de Módulo Resiliente (UNE-EN 12697-26)	90
4.5.4.	Módulo Dinámico (AASHTO T 342-11)	92
4.5.5.	Número de flujo de la mezcla asfáltica usando el Probador de rendimiento de mezclas asfálticas (AMPT) (AASHTO T 378-17)	94
4.5.6.	Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas para determinar fatiga (UNE-EN 12697-24).....	95
V.	RESULTADOS.....	100
5.1.	Características de los materiales	100
5.1.1.	Calidad del cemento asfáltico	102
5.1.2.	Determinación de temperaturas de trabajo	107
5.2.	Diseño volumétrico	110
5.2.1.	Granulometría de diseño	111
5.2.2.	Compactación de diseño	112
5.2.3.	Contenido óptimo de ligante asfáltico	112

5.2.3.1.	Diseño Mezcla asfáltica en caliente con asfalto convencional (MAC Densa + PG 64S-22).....	113
5.2.3.2.	Diseño de mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado PG 82E-22..	113
5.2.3.3.	Diseño de la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64S - 22 que incorpora 2% de polvo de neumático por vía semihúmeda (MAC Densa + 2% CR-PA)	114
5.2.3.4.	Diseño de mezcla asfáltica tibia que incorpora polvo de neumáticos por vía semihúmeda (MAT Densa + CR-PA).....	115
5.3.	Evaluación de las propiedades de las mezclas asfálticas	117
5.3.1.	Resistencia al daño inducido por humedad, AASHTO T 283 (TSR)	117
5.3.2.	Resistencia a la Deformación permanente (DP)	119
5.3.2.1.	Ensayo Rueda Cargada de Hamburgo para mezclas asfálticas compactas (AASHTO T 324)	119
5.3.2.2.	Número de flujo de la mezcla asfáltica usando el Probador de rendimiento de mezclas asfálticas (AMPT) (AASHTO T 378-17)	120
5.3.3.	Módulo Resiliente (MR).....	121
5.3.4.	Módulo Dinámico (MD)	123
5.3.4.1.	Comportamiento de las mezclas a diferentes frecuencias a una temperatura de 20°C.	125
5.3.4.2.	Comportamiento de las mezclas a diferentes temperaturas a una frecuencia de 10Hz.	126
5.3.5.	Fatiga bajo carga repetida de las mezclas, utilizando el ensayo de tracción indirecta (ITT).	128
5.3.5.1.	Obtención de ecuaciones de fatiga	129
VI.	CONCLUSIONES.....	131
6.1.	Recomendaciones para trabajos futuros	135
APÉNDICE		136

Índice de Tablas

Tabla IV-1.	Tamaño de muestra de acuerdo con el tamaño nominal del agregado.....	41
Tabla IV-2.	Masa del agregado para ensayo de contenido de vacíos no compactos en agregado fino	47
Tabla IV-3.	Tamaño de muestra para ensayo de densidad y absorción del agregado grueso.	49
Tabla IV-4.	Carga abrasiva de acuerdo con el método de ensayo seleccionado.	52
Tabla IV-5.	Masa de prueba conforme la granulometría del material pétreo para ensayo Desgaste de los Ángeles.	52
Tabla IV-6.	Granulometría para ensayo Microdeval.	53
Tabla IV-7.	Tamaños de la muestra de agregado fino para ensayo de Intemperismo Acelerado.	55
Tabla IV-8.	Masa de material para ensayo Intemperismo Acelerado para agregado grueso.....	56

Tabla IV-9. Mallas por las cuales debe cribarse el material después de los 7 ciclos conforme la granulometría.	57
Tabla IV-10. Masa de la muestra para ensayo de partículas alargadas y lajeadas.....	60
Tabla IV-11. Requisitos volumétricos necesarios para el diseño óptimo de la mezcla asfáltica de granulometría densa.....	76
Tabla IV-12. Especificaciones de gráfica Fuller para un agregado de tamaño nominal de 12.5 mm.	77
Tabla V-1. Características de calidad de la fracción gruesa.	100
Tabla V-2. Características de calidad de la fracción fina.....	100
Tabla V-3. Granulometría de los materiales.	102
Tabla V-4. Características de los asfaltos en condición original.....	103
Tabla V-5. Características de los asfaltos después del envejecimiento en RTFO.	104
Tabla V-6. Características de los asfaltos después del envejecimiento en PAV.....	105
Tabla V-7. Resultados de la prueba Creep Repetido Multiesfuerzo (MSCR)	105
Tabla V-8. Clasificación por grado PG de los cementos asfálticos.	107
Tabla V-9. Viscosidades medidas de 90 a 160°C, para curva de viscosidad	108
Tabla V-10. Rango de temperaturas de mezclado y compactación del asfalto PG 64-22.....	109
Tabla V-11. Rango de temperaturas de mezclado y compactación del asfalto PG 76E-22	110
Tabla V-12. Propiedades volumétricas de la mezcla de control MAC Densa + asfalto PG 64S-22.....	113
Tabla V-13. Propiedades volumétricas de la mezcla de control MAC Densa + asfalto PG 82E-22.	113
Tabla V-14. Propiedades volumétricas de la mezcla de control MAC Densa con asfalto PG 64-22 + 2% de polvo de neumáticos pretratado y activado (CR-PA).....	114
Tabla V-15. Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas tibias (MAT) con aditivo TB-1, con 2% de polvo de neumáticos y 5.6% de contenido de asfalto a diferentes temperaturas.	115
Tabla V-16. Resultados de ensayo resistencia de la mezcla asfáltica compacta al daño inducido por humedad.	117
Tabla V-17. Resultados del ensayo rueda cargada de Hamburgo para la evaluación de la Deformación permanente de las mezclas asfálticas.	119
Tabla V-18. Lectura de módulo resiliente de cada uno de los especímenes.....	121
Tabla V-19. Coeficientes de regresión de ecuaciones de fatiga	130

Índice de Ilustraciones

Ilustración II-1. Clasificación de las Mezclas de acuerdo con la temperatura de mezclado, Adaptado de (Lesme Brun, 2015).....	9
Ilustración IV-1. Polvo de neumático predigerido y activado.	33
Ilustración IV-2. Diagrama de flujo de la caracterización de los agregados pétreos.	35
Ilustración IV-3. Diagrama de flujo de la caracterización básica del cemento asfáltico.	35
Ilustración IV-4. Diagrama de flujo de la caracterización reológica de los ligantes asfálticos.	36
Ilustración IV-5. Combinaciones de mezclas asfálticas en estudio.	37

<i>Ilustración IV-6. Diagrama de flujo de parámetros de desempeño evaluados en las mezclas en estudio.</i>	37
<i>Ilustración IV-7. Muestreo de materiales en banco Asfaltos Guadalajara.</i>	39
<i>Ilustración IV-8. Separador mecánico de materiales pétreos.</i>	40
<i>Ilustración IV-9. Procedimiento de prueba para obtener la condición SSS.</i>	42
<i>Ilustración IV-10 Condición SSS del agregado fino.</i>	42
<i>Ilustración IV-11. Probetas en reposo.</i>	45
<i>Ilustración IV-12. Lectura del ensayo equivalente de arena.</i>	45
<i>Ilustración IV-13. Equipo para realizar ensayo azul de metileno.</i>	46
<i>Ilustración IV-14. Esquema del equipo utilizado para el ensayo de angularidad de los finos.</i>	48
<i>Ilustración IV-15. Equipo y material para ensayo de contenido de vacíos no compactados en agregado fino.</i>	48
<i>Ilustración IV-16. Masa de material para ensayo desgaste microdeval.</i>	54
<i>Ilustración IV-17. Carga abrasiva para ensayo microdeval.</i>	54
<i>Ilustración IV-18. Esquema de contenedor para ensayo microdeval.</i>	54
<i>Ilustración IV-19. Muestra después de 18 horas con sulfato de sodio.</i>	57
<i>Ilustración IV-20. Esquema de dispositivo calibrador.</i>	60
<i>Ilustración IV-21. Ejecución de ensayo forma de la partícula.</i>	60
<i>Ilustración IV-22. Ejecución de prueba puto de inflamación Cleveland</i>	64
<i>Ilustración IV-23. Equipo utilizado para ensayo de reblandecimiento y separación anillo y esfera.</i>	66
<i>Ilustración IV-24. Tubo de aluminio con muestra para ensayo de separación anillo y esfera.</i>	66
<i>Ilustración IV-25. Equipo utilizado para ensayo de recuperación elástica por torsión.</i>	66
<i>Ilustración IV-26. Dimensiones de los platos de prueba utilizados para ensayos en DSR</i>	68
<i>Ilustración IV-27. Horno RTFO</i>	69
<i>Ilustración IV-28. Ejecución de ensayo de recuperación elástica en ductilómetro</i>	70
<i>Ilustración IV-29. Esquema del principio de la prueba MSCR.</i>	71
<i>Ilustración IV-30. Equipo para envejecimiento acelerado en vasija de envejecimiento a presión PAV.</i>	73
<i>Ilustración IV-31. Reómetro de viga de flexión (BBR)</i>	74
<i>Ilustración IV-32. Equipo utilizado para determinar los parámetros de cálculo del Gmb.</i>	81
<i>Ilustración IV-33. Procedimiento de acondicionamiento de los especímenes para el ensayo TSR, (a) especímenes elaborados para ensayo TSR, (b) proceso de congelamiento después de saturación 70-80%, (c) proceso de descongelamiento a 60°C, (d) acondicionamiento a 25°C, (e) ejecución de ensayo a tracción indirecta en mordaza Lottman, (f) verificación de caras fracturadas del agregado.</i>	87
<i>Ilustración IV-34 Ensayo Rueda Cargada de Hamburgo, (a) Elaboración de especímenes, (b) Colocación de especímenes en las losas, (c) Colocación de los especímenes en el equipo HWT, (d) Especímenes después de 20 mil pasadas.</i>	89
<i>Ilustración IV-35. Forma de impulso de carga, durante el ensayo de MR.</i>	91
<i>Ilustración IV-36. Gráfica esfuerzo deformación del ensayo de módulo dinámico.</i>	92
<i>Ilustración IV-37. Relación típica entre la deformación permanente y los ciclos de carga</i>	95

<i>Ilustración IV-38. Deformación por tracción en la capa de asfalto causada por la llanta en movimiento.</i>	96
<i>Ilustración IV-39. Probeta sometida a ensayo de ITT.</i>	97
<i>Ilustración V-1. Respuesta elástica en Creep repetido a 100 y 3200 Pa.</i>	106
<i>Ilustración V-2. Susceptibilidad a la deformación permanente de los cementos asfálticos.</i>	107
<i>Ilustración V-3. Curva de viscosidad para asfalto 64-22</i>	108
<i>Ilustración V-4. Grafica de Viscosidad a Corte Cero $\log(\eta_0)$ vs Temperatura.</i>	109
<i>Ilustración V-5. Curva granulométrica de diseño</i>	112
<i>Ilustración V-6. Porcentaje de vacíos de aire obtenido para las MAT + CR a diferentes temperaturas.</i>	116
<i>Ilustración V-7. Gráfica del promedio de los esfuerzos en seco y húmedo de cada mezcla en estudio</i>	118
<i>Ilustración V-8. Comparación de los resultados de TSR de las mezclas asfálticas.</i>	118
<i>Ilustración V-9. Gráfica comparativa de los resultados obtenidos del ensayo rueda cargada de Hamburgo.</i>	120
<i>Ilustración V-10. Deformación permanente acumulada determinada mediante el ensayo número de flujo.</i>	121
<i>Ilustración V-11. Módulo Resiliente promedio de cada una de las mezclas.</i>	122
<i>Ilustración V-12. Resultados de módulo dinámico a 10°C</i>	123
<i>Ilustración V-13. Resultados de módulo dinámico a 20°C</i>	124
<i>Ilustración V-14. Resultados de módulo dinámico a 30°C</i>	125
<i>Ilustración V-15. Ecuaciones de regresión de los valores de módulo a diferentes frecuencias a 20°C.</i>	126
<i>Ilustración V-16. Ecuaciones de regresión de resultados de módulo a temperatura de 10°C, 20°C y 30°C a una frecuencia de 10 Hz.</i>	127
<i>Ilustración V-17. Número de ciclos de carga hasta la rotura vs esfuerzos aplicados.</i>	128
<i>Ilustración V-18. Ecuaciones de regresión del logaritmo de ciclos de carga vs el logaritmo de esfuerzos aplicados</i>	129

CAPITULO I

I. INTRODUCCIÓN

La preocupación por la disponibilidad de los recursos como combustibles y aglutinantes, la conservación de la energía, así como la preocupación ambiental; aunado a esto el objetivo de extender la vida útil de los pavimentos conforman los factores que han impulsado desde la década de 1970 y principios de la de 1980 el desarrollo y despliegue de tecnología en la industria de la pavimentación de asfalto a nivel nacional e internacional (Epps & Johnson , 2020).

Teniendo en cuenta el impacto ambiental, los investigadores han realizado distintos trabajos en relación con la incorporación de productos reciclados en los materiales asfálticos, tales como desechos industriales y domésticos, incluido el plástico, cinta de embalaje de residuos, conchas marinas, colillas de cigarrillos, asfalto recuperado y neumáticos fuera de uso (NFU) (Yu, et al., 2019) . La implementación del polvo de neumáticos fuera de uso o caucho granulado, CR por sus siglas en inglés, se desarrolló en los años 60 o por Charles McDonald's, en los años 70 su uso se extendió a Europa, principalmente en Bélgica y Francia, En 1974 se utilizó en Barcelona, España, en 1997 en Estados Unidos se establecieron especificaciones para asfalto modificado con caucho y en el año 2006 se estandarizó en México a través de la normativa N-CMT-4-05-002-06 (Rodríguez Castro, 2016).

El utilizar CR además de contribuir a la reducción de volúmenes de estos en los vertederos aporta diferentes beneficios a la mezcla tales como: resistencia a la tracción indirecta, a la susceptibilidad a la humedad, a la formación de surcos, a la permeabilidad y al envejecimiento; aumenta la vida útil de las mezclas a la fatiga y disminuye el ruido (Hoyos Díaz, Puicon Herrera, & Muñoz Pérez, 2021); sin embargo, para que el CR pueda ser adicionado al asfalto se deben incrementar las temperaturas de fabricación en comparación con las mezclas asfálticas convencionales ya que el caucho confiere mayor viscosidad al aglutinante y, por lo tanto, se producen mayores cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Rodríguez Alloza & Gallego, 2016).

Otra tecnología desarrollada en la industria de los pavimentos a fines de la década de 1990 en Europa fueron las mezclas tibias (Warm mix asphalt, WMA) como una medida para reducir los GEI. Los aditivos de mezcla tibia se introdujeron en la industria de pavimentación de los Estados Unidos a principios de la década de 2000.

Los beneficios y ventajas que proporcionan las mezclas tibias son: la utilización de agregados pétreos húmedos y propios del sitio, la facilidad de mezclado, temperaturas de aplicación bajas, eliminación del riesgo de incendio aunado a esto contribuyen a favorecer el medio ambiente en cuanto a la reducción de problemas de degradación de la calidad del aire, la reducción de las emisiones de CO₂, reducción del uso de recursos naturales y la facilidad de ajuste de la composición de las mezclas teniendo en cuenta las condiciones y agregados propios de cada región, lo que proporciona un ahorro de energía y costos de producción menores. No obstante, los aportes mecánicos en cuanto a propiedades de desempeño son variados, ya que diferentes investigaciones realizadas a nivel internacional indican desde propiedades similares a las de una mezcla asfáltica en caliente hasta reducciones de 50% en cuanto a propiedades de desempeño (Delgado Alamilla , Téllez Gutiérrez , & San Martín Romero, 2015).

Si se reducen las temperaturas de fabricación y compactación de mezclas asfálticas, se reduce el consumo de energía, las emisiones de GEI y, por tanto, se podrían mejorar las condiciones de trabajo en las obras de pavimentación. Estos beneficios, combinados con la reutilización de los NFU convertirían las mezclas ahuladas con aditivos WMA en un material excelente y ecológico para la construcción de carreteras.

Es este trabajo de investigación se diseñó y evaluó las propiedades de una mezcla asfáltica tibia que incorpora polvo de neumático pretratado y activado, empleando un aditivo orgánico para mezclas tibias, la evaluación se realizó mediante ensayos de desempeño: diseño volumétrico, susceptibilidad al daño por humedad, deformación permanente, módulo de rigidez y vida a fatiga.

1.2.Planteamiento del problema

En los últimos años, debido al desarrollo de la industria del automóvil, cada vez hay más neumáticos fuera de uso (Chen S. , Cao, Zheng, & Guo, 2021).Cada año se venden alrededor de 1.4 billones de llantas en el mundo, las cuales se asume que pasarán a formar parte de la categoría de NFU (Alarcón Ibarra & Bocanegra Martínez, 2021).Actualmente, existen varias aplicaciones industriales que incorporan el reciclaje de llantas de desecho en sus procesos, algunas de estas aplicaciones incluyen la fabricación de neumáticos nuevos, la producción de combustibles derivados de neumáticos, aplicaciones y productos de ingeniería civil, productos de caucho moldeado, usos agrícolas, aplicaciones recreativas y deportivas y aplicaciones de aglutinante de asfalto modificado con caucho (Ahmed, Hajj, Bahzad, Piratheepan, & Warrag, 2021) . Una nueva

alternativa que permite la incorporación del hule molido de neumáticos fuera de uso en las mezclas asfálticas sin la necesidad de grandes inversiones en equipo y con la posibilidad de incorporar grandes tasas de hule, es mediante la patente conocida comercialmente como RARX®. El CR se introduce típicamente en mezclas asfálticas de acuerdo con tres métodos: (1) proceso seco, (2) proceso húmedo y (3) mezcla terminal (Yang X. , et al., 2017). De acuerdo con Ahmed, et al., (2021) independientemente del método utilizado, se ha informado que las mezclas modificadas con CR funcionan mejor o al menos igual que las mezclas asfálticas en caliente (MAC) modificadas con polímeros, en términos de formación de surcos, grietas y daños por humedad, cuando se diseñan correctamente; sin embargo, las temperaturas de mezcla y compactación de las mezclas modificadas con CR son considerablemente más altas que las del MAC tradicional; la solución a este problema podría ser la tecnología Warm Mix Asphalt (WMA), que es capaz de reducir las temperaturas de producción y compactación, de igual forma se reduce la pérdida de volátiles lo cual mejora las condiciones de trabajo tanto en los sitios de pavimentación como en las plantas de producción (Rodríguez Alloza & Gallego, 2017). Una interrogante abierta derivada de los trabajos previos y que es de suma importancia para el diseño de mezclas tibias es la siguiente: ¿Cómo diseñar una mezcla asfáltica modificada con polvo de neumático fuera de uso por medio de un proceso semihúmedo que pueda producirse y compactar a temperaturas inferiores que las de una mezcla asfáltica en caliente con el fin de disminuir el consumo de combustible sin comprometer el desempeño estructural de la mezcla asfáltica?

Esta pregunta, aunque no ha sido totalmente respondida la han tratado de responder diversos investigadores como los siguientes: Yucel, A. O., Ozturk, H. I., & Guler, M. (2021) mediante un estudio de investigación compararon las mezclas WMA con las HMA ambas modificadas con caucho de neumáticos fuera de uso adicionados vía seca; con el mismo contenido de vacíos de aire el cual mostró que el uso de aditivos WMA ayudó a mejorar la homogeneidad de la mezcla, la susceptibilidad a la humedad y deformación permanente, no obstante, los resultados se encuentran limitados al uso de un solo aditivo y a la gradación del caucho adicionado vía seca. Gui, W., Liang, L., Wang, L., Gao, X., & Zhang, F. (2021) se concentró en evaluar la influencia de varios tipos de polvo de caucho granulado (CR) y aditivos de mezcla tibia sobre el rendimiento a alta temperatura de los asfaltos CR-WMA, determinando que el polvo CR que contiene tamaños de malla mixta, de malla 40, malla 60 y malla 80 en la proporción 3: 3: 1 exhibió la influencia positiva óptima en el rendimiento a alta temperatura y la capacidad de recuperación de la deformación por fluencia

de los asfaltos modificados se correlaciona fuertemente con la temperatura y la tensión; sin embargo la deformación permanente se acumula continuamente con el aumento del número de cargas y el rendimiento elástico retardado es inestable al comienzo del progreso de la carga. Ahmed, T. A., Hajj, E. Y., Bahzad, D. S., Piratheepan, M., & Warrag, A. (2021) realizaron una investigación de las características reológicas y de unión de aglutinantes asfálticos modificados con miga de caucho mezclados con aditivo asfáltico de mezcla tibia y agente antideslizamiento, demostrando que, si bien el aumento de CR puede tener un efecto positivo en la resistencia a la formación de surcos de un aglutinante de asfalto, puede poner en peligro la resistencia al daño por humedad.

Por lo antes expuesto en este estudio se enfocó en el diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica modificada con un aditivo orgánico para mezclas tibias y con polvo de neumáticos fuera de uso pretratado y activado, mediante la adición por vía semihúmeda, que satisface los problemas de decantación del caucho en el asfalto cuando es adicionado por otros métodos, proponiendo de este modo una mezcla asfáltica resistente al daño por humedad, a la deformación permanente y por ende con mayor vida útil; por otro lado si se reducen las temperaturas durante el proceso de producción y compactación, esto se traduce a una disminución del impacto ambiental.

1.3.Motivación o justificación

La construcción de carreteras es siempre un gran consumidor de energía y recursos; en vista de esto, el desarrollo de tecnologías de pavimentación sostenibles con menos consumos de recursos y energía, así como con menos emisiones de GEI sin afectar las propiedades mecánicas de las mezclas se ha convertido en una necesidad.

En la construcción de carreteras, se han desarrollado activamente nuevas tecnologías como las mezclas asfálticas en tibio (MAT) que permiten la disminución de temperaturas en la producción y compactación de las mezclas empleando distintos aditivos, los cuales podemos clasificar como: aditivos a base de espuma, orgánicos (ceras) y aditivos químicos, en Ciudad de México desde el año 2010 se estableció por medio de un Decreto Federal el uso obligatorio de mezclas templadas (tibias) en los trabajos de pavimentación y bacheo.

Por otro parte, la incorporación de llantas de desecho en la producción de mezclas asfálticas se ha investigado desde hace más de 50 años; con el fin de reciclar los neumáticos fuera de uso y reducir

la contaminación ambiental provocada por estos al final de su vida útil, teniendo en cuenta que cada año con el desarrollo de la industria del automóvil se fabrican y se desechan más neumáticos.

Recientemente, a nivel internacional se han introducido tecnologías de MAT en las mezclas asfálticas que incorporan polvo de NFU para disminuir las temperaturas de construcción requeridas y reducir las emisiones de GEI, en la literatura podemos encontrar estudios desde el 2007 (Akisetty, Lee, & Amirkhanian, 2007) que se han realizado para evaluar el desempeño de las mezclas, propiedades reológicas del asfalto modificado con aditivos de mezcla en tibio y caucho granulado adicionado vía húmeda (Ahmed, Hajj, Bahzad, Piratheepan, & Warrag, 2021), (Chen S. , Cao, Zheng, & Guo, 2021) (Gui, Wang, Gao, & Zhang, 2021), (Reza Pouranian, Notani, Tabesh, Nazeri, & Shishehbor, 2020); las metodologías de incorporación del CR a las mezclas mediante un proceso seco (Ozturk & Kamran, 2019) , (Yu, et al., 2019), (Yucel, Ozturk, & Guler, 2021) y mediante el proceso terminal blend utilizando un aditivo químico (Evotherm) (Yang X. , et al., 2017).

Sin embargo, a las investigaciones que se han realizado en relación a la evaluación y rendimiento de las mezclas asfálticas con incorporación de CR y tecnologías WMA son aún muy limitados, en su mayoría han evaluado solamente la influencia de los aditivos en el comportamiento reológico del asfalto y pocos han investigado la evaluación y desempeño de las mezclas; de igual forma los métodos de incorporación del polvo de neumáticos evaluados han sido vía húmeda, vía seca y terminal blend, en esta investigación se estará empleando el método semihúmedo de un hule de neumáticos pretratado y activado, el cual se puede incorporar a un silo de polvo mineral y dosificarse en la producción de la mezcla asfáltica por los medios convencionales.

El rendimiento a largo plazo del pavimento está asociado con varios factores, como la estructura del pavimento, los materiales, la carga de tráfico y las condiciones ambientales; consecuentemente, debido a la influencia que puede generar un aditivo orgánico y el polvo de neumáticos adicionado mediante vía semi – húmeda en las mezclas modificadas, es importante evaluar el desempeño de estas, la información detallada será beneficiosa para ayudar a obtener un equilibrio en el uso de estos materiales.

Extender la vida útil de la carpeta asfáltica, la gestión de los NFU y la reducción de temperaturas en el proceso de fabricación de las mezclas; significa una reducción en el uso de recursos naturales, un menor consumo de combustible y reducción de emisiones de GEI.

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Analizar el desempeño de mezclas tibias modificadas con hule de neumáticos pre -digerido y activado, incorporado mediante proceso semihúmedo, utilizando el protocolo AMAAC (Nivel IV) para la evaluación del comportamiento de sus propiedades físicas y mecánicas.

1.4.2. Objetivos Particulares

- Realizar una revisión del estado del arte de las mezclas asfálticas tibias y mezclas asfálticas en caliente modificadas con hule molido, con el fin de identificar similitudes e inconsistencias de las investigaciones realizadas por otros autores relacionadas al tema propuesto.
- Caracterizar las propiedades de los agregados y el asfalto de acuerdo con las normativas vigentes de la SCT para evaluar sus características.
- Desarrollar el diseño de una mezcla asfáltica tibia modificada con polvo de neumáticos fuera de uso pretratado y evaluarla ante ensayos de desempeño de susceptibilidad a la humedad, deformación permanente, módulo dinámico y leyes de fatiga, utilizando el protocolo AMAAC, para el análisis del comportamiento de sus propiedades físicas y mecánicas.
- Comparar los resultados obtenidos de la evaluación de las mezclas tibias ahuladas con las propiedades de una mezcla con asfalto convencional y una mezcla modificada con polímeros para comprobar si pueden ser equivalentes o mostrar superioridad en su comportamiento.

1.5.Estructura de la Investigación

La presente tesis está organizada en los siguientes capítulos:

Capítulo I: Introducción, contiene antecedentes de investigación que presenta el planteamiento del problema y cómo debe abordarse, la motivación para la realización de este estudio, los objetivos generales y específicos y finalmente la estructura de la disertación.

Capítulo II: Marco Teórico, ofrece las definiciones generales de los términos empleados en esta investigación.

Capítulo III: Trabajos relacionados, contiene una descripción general de los trabajos relacionados con el tema que se han investigado con anterioridad, asimismo, se señalan las diferencias del trabajo de investigación descrito en esta tesis.

Capítulo IV, Materiales y procedimiento experimental, presenta los materiales utilizados en este estudio, el programa experimental y explica cada uno de los ensayos realizados para la caracterización de los materiales, diseño volumétrico y las pruebas de desempeño realizadas a cada una de las mezclas en estudio.

Capítulo V: Resultados, que incluye todos los resultados y discusiones de las pruebas realizadas para evaluar los materiales pétreos, cementos asfálticos, y la evaluación del desempeño de las mezclas realizada para evaluar las características volumétricas y el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

Capítulo VI: Conclusiones, presenta las conclusiones de este estudio a partir de los resultados de la evaluación realizada, de igual forma algunas recomendaciones respecto a temáticas futuras de investigación. La disertación también incluye una lista de Referencias donde se incluye toda la bibliografía utilizada en este estudio.

CAPITULO II.

II. MARCO TEÓRICO

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación de distribución uniforme de un material asfáltico (aglutinante) en una porción de agregados pétreos seleccionados (grava, arena y material fino); el esqueleto mineral conformado por los agregados se encarga de garantizar la rigidez del material, mientras que el cemento asfáltico es el encargado de brindar la cohesión, este puede ser convencional o modificado con polímeros.

2.1. Clasificación de las mezclas asfálticas

Existen distintas clasificaciones para las mezclas asfálticas, esto depende del parámetro mediante el cual se considere establecer sus diferencias; se pueden clasificar de acuerdo con las fracciones de agregado utilizadas (mastico, mortero, macadam y concreto); en relación con el porcentaje de vacíos en la mezcla y su granulometría (densa, abierta SMA, CASAA, microaglomerados y sistema de riego) (Bocanegra Martínez , 2019) . Conforme a la temperatura de mezclado como se muestra en Ilustración II-1. temperaturas en un rango de 150 °C a 180 °C se consideran mezclas en caliente, 120 °C a 140 °C mezclas tibias, 40°C - 100 °C mezclas semitibias y por debajo de 40 °C, usualmente a temperatura ambiente se denominan mezclas en frío.

2.1.1. Mezclas asfálticas tibias (MAT o Warm Mix Asphalt, WMA)

Las mezclas asfálticas tibias son un conjunto de tecnologías desarrolladas en Europa durante el Tratado con Kyoto y la Comunidad Económica Europea en 1997, como una respuesta los gases de efecto invernadero (Loría Salazar , Matamoros Kikut , & Bolaños Barrantes , 2011).

De acuerdo al reporte 691 del programa cooperativo nacional de investigación de carreteras de Estados Unidos el objetivo de la tecnología de las WMA es producir mezclas con características de resistencia, durabilidad y rendimiento similares a las mezclas en caliente (Hot mix Asphalt, HMA) utilizando temperaturas de producción sustancialmente reducidas, lo cual se logra mediante diferentes técnicas que reducen la viscosidad del ligante asfáltico sin comprometer sus propiedades adhesivas y visco-elásticas. Existen importantes beneficios para la salud y el medio ambiente asociados con la reducción de las temperaturas de producción, que incluyen menores emisiones de gases de efecto invernadero, menor consumo de combustible y menor exposición de los trabajadores a los vapores del asfalto.

Las técnicas para producir las mezclas tibias se pueden agrupar en las siguientes categorías:

Mezclas de asfalto espumado: Consiste en añadir pequeñas cantidades de agua y aire comprimido al ligante asfáltico caliente dentro de una cámara de expansión, formando de manera controlada un efecto espumado, que permite aumentar el volumen del asfalto y reducir su viscosidad.

Aditivos orgánicos: Esta técnica consiste en alterar la curva de viscosidad del asfalto por medio de aditivos ceras, especialmente en un rango de temperatura por encima de 100 °C, donde ocurren normalmente el mezclado y la compactación.

Aditivos químicos. Este tipo de aditivos funcionan en la interfaz del asfalto/agregado como agentes tensoactivos, pueden reducir las temperaturas de mezclado y compactado alrededor de 30 a 40 °C (Delgado Alamilla , Téllez Gutiérrez , & San Martín Romero, 2015).

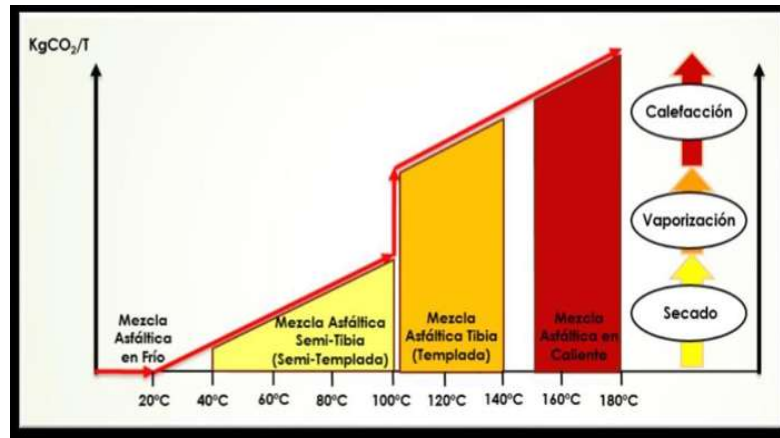


Ilustración II-1. Clasificación de las Mezclas de acuerdo con la temperatura de mezclado, Adaptado de (Lesme Brun, 2015)

2.2.Componentes de una mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica en caliente se compone de esencialmente de agregados pétreos, cemento asfáltico (convencional o modificado con polímero) y los vacíos del agregado mineral (VAM), sin embargo, las mezclas en tibio requieren la incorporación de un aditivo o proceso de espumado.

2.2.1. Agregados Pétreos

La Norma de la SCT N-CMT-4-04/17 define los agregados pétreos para mezclas asfálticas como materiales naturales producto cien (100) por ciento de trituración, cribados y en su caso lavados, que aglutinados con un material asfáltico se emplean en la elaboración de mezclas. Los agregados constituyen del 88 al 96% del peso de un pavimento bituminoso y más del 75% del volumen de

este, por lo tanto, contribuyen a la estabilidad mecánica. El agregado dentro del concreto asfáltico es responsable de transportar las cargas del tráfico que pasa y transferirlas a la subrasante debajo del pavimento. Por lo tanto, para garantizar un pavimento de calidad, debemos comenzar con áridos de calidad.

El Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de Norteamérica define el agregado mineral una mezcla de varios tipos y tamaños de roca, de acuerdo con su tamaño se dividen en: gravas, arenas, finos y polvo mineral (filler).

La grava corresponde al agregado grueso producto de la desintegración de grandes rocas y de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), corresponde a la parte del agregado grueso que se retiene en la malla N°4.

Las arenas se utilizan como agregado fino en mezclas de concreto asfáltico, se clasifica en dos grupos; arena manufacturada, que se hace triturando piedra y filtrando las partículas más gruesas, o arena natural, de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), corresponden al material que pasan la malla N°4 y se retiene en la malla N°200.

El polvo mineral (filler) de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte correspondiente del agregado que pasa el tamiz #200.

2.2.2. Propiedades de los agregados pétreos.

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

❖ Propiedades individuales.

Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: tamaño de la partícula (lajeadas y alargadas), angularidad, densidad, rugosidad, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, módulo elástico, conductividad térmica y dilatación. Asimismo, presentan unas propiedades químicas macroscópicas: solubilidad, alterabilidad y capacidad de expansión (Padilla Rodríguez , 2004).

❖ Propiedades de conjunto.

Se refiere a las propiedades que se obtienen cuando un grupo de agregados están en constante contacto, es decir, las propiedades como un solo cuerpo global. La forma de la partícula y el

desgaste de los agregados son propiedades de gran interés, ya que determinarán la influencia de rozamiento y trabazón entre agregado y agregado (Ramírez Escobar , 2021).

2.2.3. Características principales de los agregados para pavimento

Los agregados pétreos deben de cumplir con ciertas características para garantizar un buen esqueleto mineral del pavimento flexible.

- **Forma de la partícula y textura superficial:** La forma de las partículas del agregado grueso afecta fundamentalmente, al esqueleto mineral. Según su forma, las partículas pueden clasificarse en redondeadas, irregulares, angulares, lajeadas, alargadas y alargadas – lajeadas. Las partículas lajeadas y alargadas-lajeadas (agujas), pueden romperse con facilidad durante la compactación o después bajo la acción del tráfico, modificando con ello la granulometría del agregado inicial. Los agregados pétreos que se recomienda emplear en la producción de mezclas asfálticas son aquellos con una alta proporción de partículas equidimensionales, es decir, que contenga dimensiones similares en los tres sentidos direccionales (partículas cúbicas (Ramírez Escobar , 2021)).
- **Adhesividad y resistencia al desprendimiento:** La adhesividad y la resistencia al desprendimiento son dos propiedades que son directamente proporcionales, es decir, cuando se tiene una buena adhesividad (asfalto-agregado), la resistencia al desprendimiento también es buena. La adhesividad depende tanto del agregado como del aglutinante asfáltico. En los agregados se busca un material limpio y afín al material asfáltico en uso. Cuando el agregado es ácido (alto contenido de sílice) se tiene una gran afinidad por el agua y una polaridad negativa, produciendo una mala adhesividad entre el asfalto y el agregado. En este caso, se debe de emplear un aditivo promotor de adherencia para crear un enlace entre el asfalto y el agregado.

Si los agregados son básicos, son menos hidrofílicos que los silíceos y en presencia de agua presentan una carga positiva; por lo que llegan a tener mejor adherencia con los materiales asfálticos. Por consiguiente, la resistencia al desprendimiento es la capacidad del interfaz asfalto-agregado de mantenerse unido aun cuando existen factores externos (climatológicos, vehiculares, efectos de expansión de capas subyacentes, presencia de agua, etc.) comprometiendo su adhesión (Ramírez Escobar , 2021).

- **Resistencia al pulimento:** Los agregados pétreos que forman parte de la carpeta asfáltica son susceptibles al pulido o pérdida de la micro textura superficial, debido al paso de los vehículos. La resistencia al pulimento de las partículas del agregado es la resistencia para perder aspereza en su textura superficial, tiene gran importancia desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento cuando dichas partículas van a ser empleadas en una capa de rodadura; para su evaluación se han desarrollado los ensayos de pulimento acelerado (Padilla Rodríguez , 2004).
- **Resistencia al desgaste:** La resistencia que los agregados gruesos oponen a sufrir desgastes, rotura o desintegración de partículas por efecto de la abrasión, es una característica que suele considerarse como un índice de calidad en general, y en particular de su capacidad para producir pavimentos durables.
- **Granulometría y tamaño máximo del agregado:** La granulometría es la determinación de la cantidad en por ciento de los diversos tamaños de las partículas que constituyen el material, cual se tamiza a través de una serie de mallas normalizadas; siendo una característica física fundamental porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto (esqueleto mineral).

Para construir el esqueleto granular de una mezcla asfáltica, se combinan las diferentes clases granulares en cierta proporción, de manera que puede formarse una curva granulométrica continua o discontinua (se puede prescindir de una o más fracciones granulares), dependiendo del destino del agregado y las características seleccionadas para la mezcla asfáltica (Bocanegra Martínez , 2019).

2.2.4. Ligante Asfáltico

El Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de Norteamérica, describe a los ligantes asfálticos o cemento asfáltico como un material de color marrón oscuro o negro conformado principalmente de grandes cadenas de átomos de hidrógeno y carbono; es sólido o semisólido, con propiedades cementantes a temperatura ambiente. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta tener una consistencia líquida.

El cemento asfáltico puede obtenerse de dos fuentes ya sea encontrándose en depósitos naturales o se fabrica mediante la destilación del petróleo crudo, siendo la segunda fuente la forma de obtención del cemento asfáltico en México. Sin embargo, en ambos casos el asfalto es producto

de la destilación fraccionada del petróleo, ya sea durante períodos cortos como el proceso de refinería o períodos más largos como en la naturaleza.

2.2.4.1. Composición y estructura de los ligantes asfálticos

Dado que el asfalto contiene un rango continuo de moléculas, de manera común se dividen en cuatro amplias fracciones cada vez más polares para su análisis individual, estas son: saturados, aromáticos, máltenos (resinas y aceites) y asfáltenos. En el libro de texto del NCAT (Roberts et al., 1996) se definen cada uno de los componentes del asfalto como sigue:

Los saturados son líquidos a temperatura ambiente y apenas cambian con el tiempo. Tienen una contribución negativa a la susceptibilidad a la temperatura del asfalto o cómo cambian las propiedades del asfalto con los cambios de temperatura.

Los aromáticos de nafteno son líquidos a temperatura ambiente y se consideran el componente suavizante del asfalto. También son la parte que determina la fracción de envejecimiento de cómo cambian las propiedades del asfalto con el tiempo en condiciones de servicio. Los aromáticos polares son sólidos o semisólidos a temperatura ambiente y están relacionados con la ductilidad (cómo se puede estirar el asfalto antes de la fractura) del asfalto. (Bocanegra Martínez , 2019)

Los máltenos son solubles y están compuestos de resinas y aceites. Las resinas (tolueno/metanol) van de un 55% a un 75%. Proporcionan las propiedades cementantes o aglutinantes al asfalto (partículas semisólidas o sólidas a temperatura ambiente, fluidas cuando se calientan, frágiles cuando se enfrían). Proveen la ductilidad del asfalto.

Los aceites (aromáticos toluenos y saturados n-heptano) de un 5% hasta un 25% proporcionan la consistencia adecuada para hacer a los asfaltos trabajables (partículas líquidas incoloras, solubles en la mayoría de los solventes) y protegen a los asfáltenos y a las resinas de la oxidación. La consistencia de un asfalto con gran porcentaje de este componente será muy fluida.

Los asfáltenos van de un 5% hasta un 25%. Son los encargados de proporcionar la dureza a los asfaltos (partículas sólidas), proveen elasticidad, resistencia y adhesión. Los asfaltos con gran presencia de asfáltenos son aquellos que presentan una alta viscosidad. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, SCT, 2020)

2.2.4.2. Propiedades reológicas del asfalto

La reología se define como la ciencia del flujo y de la deformación de la materia, la cual estudia las relaciones constitutivas de los materiales. (Salazar Delgado, 2008) Empleamos la reología para caracterizar el comportamiento del flujo del asfalto bajo condiciones ambientales específicas.

Las propiedades reológicas cambian significativamente durante el proceso de producción y con el tiempo. Estas características son:

- ☞ Viscosidad: Propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. Es importante mencionar que la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura; a mayor temperatura, menor viscosidad.
- ☞ Rigidez: es la relación entre el esfuerzo y la deformación en función de la temperatura y la frecuencia de carga.
- ☞ Ductilidad: Es la capacidad de disipación de energía que tiene un material dentro de su rango plástico. La rotura del material es dependiente de la deformación de este. En el caso del asfalto, la ductilidad le permite normalmente tener mejores propiedades aglomerantes, y los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura.
- ☞ Penetración: es una propiedad empírica que se suele utilizar para medir la consistencia de los cementos asfálticos.
- ☞ Susceptibilidad de corte: Es la capacidad de resistencia a altas temperaturas, la cual se determina con un “reómetro de corte dinámico”, que es el aparato que imprime una fuerza cortante cosenoidal con la que se miden dichas resistencias. (de la Fuente Utrilla, 2007)
- ☞ Envejecimiento: Durante los procesos de fabricación y de puesta en obra de la mezcla bituminosa, así como en su posterior vida de servicio, se va produciendo el progresivo envejecimiento del ligante. Los mecanismos que intervienen en el proceso de envejecimiento se asocian a cambios químicos, físicos, mecánicos y reológicos. Los cambios químicos son principalmente la volatilización y la oxidación, y son irreversibles.

2.2.4.3. Clasificación de asfaltos por grado de desempeño (PG)

La selección del asfalto de acuerdo con el grado de desempeño (PG, Performance Grading) se aplicó en Estados Unidos a partir de las pruebas realizadas por el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP, Strategic Highway Research Program) por parte de la

Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA, Federal Highway Administration). Uno de los objetivos principales de este programa fue medir las propiedades reológicas del asfalto en función de la temperatura de prueba (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, SCT, 2020).

En México, en 2018 entró en vigor la actualización de la norma para la clasificación del asfalto grado PG N·CMT·4·05·004/18 *Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, de la Normativa para la Infraestructura del Transporte (NIT) de la SCT, la cual define el grado de desempeño (PG por sus siglas en inglés, Performance Grade) como el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico convencional o modificado se desempeña satisfactoriamente. El grado de desempeño (PG) permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante, de la intensidad del tránsito esperada y de la velocidad de operación a que estará sujeta la carretera durante su vida útil. Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-16 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como sesenta y cuatro (64) grados Celsius y tan bajas como menos dieciséis (-16) grados Celsius. Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de seis (6) grados.

Para la selección del cemento asfáltico según su grado de desempeño (PG) considerará las temperaturas máxima y mínima de la zona donde se ubicará la obra, realizando un ajuste debido a la intensidad del tránsito y a la velocidad de operación de la carretera.

2.2.4.4. Asfaltos convencionales

Los asfaltos convencionales son aquellos que se producen y se extraen directamente del proceso de destilación del petróleo. Es decir, son asfaltos que no contienen aditivos modificadores de sus propiedades físicas, químicas y reológicas. La clasificación de los asfaltos convencionales por grado de desempeño (grado PG), principalmente depende de la zona geográfica donde se ubica la refinería productora. Sin embargo, el grado de desempeño más común en México y Estados Unidos es el PG 64-22. (Ramírez Escobar , 2021)

2.2.4.5. Asfaltos modificados

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero (tipo I, tipo II y tipo III) o de hule molido de neumáticos, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, disminuir su

susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. (Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transporte , 2006)

Los polímeros son utilizados para la modificación de las mezclas asfálticas en busca de mejorar sus propiedades y así cumplir con los requerimientos para un proyecto de calidad, en donde se pretende principalmente optimizar la elasticidad y flexibilidad, la consistencia y la durabilidad para evitar que una mezcla asfáltica presente agrietamiento, deformaciones o desprendimiento de agregados (Díaz Claros & Castro Celis , 2017).

2.2.5. Hule de neumáticos fuera de uso en las mezclas asfálticas

En México, la Norma N-CMT-4-05-002-06 “Calidad de Materiales Asfálticos Modificados” contempla la utilización del hule molido de neumáticos para la modificación de asfaltos desde el año 2006, sin embargo, su uso no se ha generalizado por la dificultad de su manejo con las tecnologías tradicionales (Alarcón Ibarra & Bocanegra Martínez, 2021).

El polvo de neumático como modificador tiene un efecto beneficioso sobre las propiedades reológicas del asfalto de caucho. Sus componentes pueden mejorar el rendimiento a altas temperaturas y el rendimiento antienviejamiento del asfalto y mejorar el efecto de unión del asfalto y los materiales minerales (Chen S. , Cao, Zheng, & Guo, 2021).

Durante la interacción asfalto-caucho, las partículas de caucho absorben las fracciones aromáticas, por lo que aumentan de volumen. Alrededor del caucho se forma una capa blanda o gel que se desprende por el efecto de la agitación. Durante este mismo proceso el caucho se integra con el asfalto. Si la energía aplicada (agitación o temperatura) es muy alta o prolongada, la partícula de caucho desaparece en el seno de la matriz asfáltica (Rodríguez Castro, 2016).

2.2.5.1. Procesos de incorporación del hule de neumático en la mezcla asfáltica

La incorporación del polvo de neumáticos (CR) en la mezcla asfáltica se divide en cuatro categorías: proceso húmedo, terminal blend, seco y proceso semihúmedo.

En el **proceso húmedo**, las partículas de CR se agregan al aglutinante de asfalto para formar mezclas de CR-asfalto, que luego se mezclan con el agregado para hacer una mezcla de asfalto.

El asfalto modificado CR por medio del proceso **terminal blend** se produce en el proceso de refinación de aglutinante de asfalto. Las partículas de CR en la mezcla terminal son completamente digeridas por aglutinantes de asfalto, por lo que en realidad no hay partículas de CR reales en la

mezcla terminal. Debido a este carácter, el asfalto modificado con CR en mezcla terminal se puede aplicar como otro asfalto modificado con polímero (Yang X. , et al., 2017).

En el **proceso seco**, las partículas de CR se agregan a la mezcla de asfalto durante la mezcla de aglutinante de asfalto y agregados.

Proceso semihúmedo: En este procedimiento se dosifica por vía seca un polvo de caucho pretratado en origen con otros componentes, y cuya finalidad es facilitar la incorporación de dicho polvo de caucho a la mezcla asfáltica sin necesidad de los tiempos de espera requeridos para la vía seca con polvo de neumático convencional. Al igual que para la vía seca el caucho pretratado se incorpora directamente al mezclador de la planta de fabricación de la mezcla asfáltica, como uno más de sus componentes.

Nota. el polvo de caucho pretratado con asfalto, (en adelante CR-PA) se fabrica en una planta industrial independiente mediante un proceso de vía húmeda. El CR-PA se incorporan directamente al mezclador consiguiendo las mismas prestaciones en la mezcla asfáltica que los incorpora que las obtenidas por la vía húmeda anteriormente definida (Direcció Insular d'Infraestructures, Departament de Mobilitat i Infraestructures, 2020).

2.2.6. Tecnologías para mezclas asfálticas tibias

2.2.6.1. Aditivos espumantes

Esta tecnología consiste en la adición de pequeñas cantidades de agua inyectadas en el ligante caliente o directamente en la cámara de mezcla. El agua se evapora rápidamente y se encapsula en el aglutinante (Rodríguez Alloza & Gallego, 2017).

2.2.6.2. Aditivos orgánicos.

Esta tecnología utiliza aditivos orgánicos, que son ceras que se agregan a la mezcla. Es posible reducir la viscosidad cuando la temperatura sube por encima del punto de fusión de las ceras. A medida que la mezcla se enfría, estos aditivos se solidifican en partículas microscópicamente pequeñas y uniformemente distribuidas, que aumentan la rigidez del aglutinante de la misma manera que los materiales reforzados con fibra.

Las ceras en esta tecnología modifican las propiedades del asfalto y típicamente están formadas por una larga cadena de átomos de hidrocarburo que es sólida a temperatura ambiente y tiene un punto de fusión generalmente entre 80 a 120°C. La cantidad de cera añadida es generalmente del

2 al 4% de la masa total y la reducción de temperatura en base a la literatura revisada es de unos 20-30°C. Existen diferentes tipos de ceras propuestas y comercializadas como mejoradores de la fluidez del asfalto: cera Fischer-Tropsch (FT), cera montana y amida de ácido graso.

Fischer-Tropsch: Las ceras FT se producen mediante un proceso de síntesis y se caracterizan por una distribución de alto peso molecular y una estructura microcristalina fina a baja temperatura. Gracias a esta estructura cristalina más pequeña, las ceras FT se caracterizaron por una fragilidad reducida a bajas temperaturas. El punto de fusión está por encima de los 98°C, con alta viscosidad a temperaturas más bajas y baja viscosidad a temperaturas más altas. El producto más comercial es denominado Sasobit.

La cera montana es una combinación de ácidos orgánicos de cadena larga sin glicéridos, alcoholes de cadena larga y otros compuestos orgánicos con estructuras complejas. Las ceras montanas se obtienen a partir de vegetales fosilizados por extracción con solventes de ciertos tipos de lignito y lignito. Los nombres comerciales del producto son: Asphaltan A, Asphaltan B y Romonta N. Su punto de fusión está entre 82 y 125°C.

Las Amidas de ácidos grasos: se producen por reacción de aminas con ácidos grasos. El punto de fusión típico está entre 141 y 146°C. Durante varios años, productos similares han sido modificadores de la viscosidad en el asfalto y se han utilizado en el asfalto para techos desde finales de la década de 1970 hasta principios de la de 1980. A medida que las amidas de ácidos grasos se enfrían, forman cristalitas en el asfalto, lo que aumenta la estabilidad del asfalto y la resistencia a la deformación, un nombre comercial utilizado es Licomont (Rodríguez Alloza , 2015).

2.2.6.3. Aditivos químicos

Los aditivos químicos son el tercer tipo de tecnología WMA que se usa comúnmente. Se utiliza una variedad de paquetes químicos para diferentes productos; usualmente incluyen una combinación de agentes emulsionantes, agentes tensioactivos, polímeros y aditivos para mejorar el recubrimiento, la trabajabilidad de la mezcla y la compactación. Estos productos generalmente mejoran la adhesión de aglutinantes y agregados eliminando así la necesidad para aditivo de adherencia adicional. Los aditivos químicos pueden reducir la temperatura de producción y mezcla del asfalto hasta en 30°C (Gopalakrishnan, JvdM Steyn, & Harvey, 2014).

El primer proceso de aditivos químicos utilizado en los Estados Unidos fue el proceso Evotherm desarrollado por MeadWestvaco e introducido en 2005. Evotherm se suministró como una emulsión de alto residuo, actualmente denominada Evotherm ET (tecnología de emulsión).

Posteriormente se introdujo un proceso en el que los aditivos químicos se inyectan como una solución directamente en la línea de asfalto en la planta. Este proceso se conoce como Evotherm DAT (Tecnología de aditivos dispersos) y luego se desarrolló un proceso de tercera generación denominado Evotherm 3G, que es una tecnología de mezcla tibia sin agua desarrollada conjuntamente por Ergon Asphalt and Emulsions, Inc. y Mathy Construction Company.

Rediset WMX es un proceso químico que se introdujo en los Estados Unidos en 2007, es producido por Akzo Nobel y se comercializa como un aditivo de mezcla tibia con propiedades que promueven la adhesión. Los gránulos se pueden agregar al aglutinante en la terminal de asfalto o en el tanque de suministro de la planta, o se pueden agregar a la mezcla soplándolos en el tambor de una manera similar a la adición de fibras al SMA (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2011).

2.2.7. Parámetros de desempeño evaluados en las mezclas asfálticas

2.2.7.1. Susceptibilidad al daño por humedad

El daño por humedad está muy relacionado con el enlace por cohesión, que involucra la fuerza de cohesión del asfalto y con el enlace por adhesión, que más bien tiene que ver con la fuerza de interacción entre el agregado y el asfalto. Según Aguiar Moya (2014), seis mecanismos de falla diferentes pueden ser asociados con el daño por humedad y los desprendimientos de agregado, los cuales pueden ocurrir individual o simultáneamente. Estos mecanismos son: separación, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro, socavación hidráulica y efectos ambientales.

El agua no fluye fácilmente a través de pavimentos de MAC adecuadamente contruidos, pero fluiría muy lentamente incluso a través de material bien compactado. El agua puede abrirse camino entre el agregado superficies y ligante asfáltico en una mezcla, debilitando o incluso destruyendo totalmente la unión entre estos dos materiales. Este daño por humedad a veces se denomina desprendimiento, puede ocurrir rápidamente cuando hay agua debajo de un pavimento, como cuando se construyen pavimentos sobre áreas mal drenadas y no están diseñadas o contruidas apropiadamente para remover el agua de la estructura del pavimento, incluso la exposición

ocasional al agua puede causar daños por humedad en las mezclas asfálticas, son propensas a ello debido a un diseño o construcción defectuosos o a una mala selección de materiales.

Los procesos fisicoquímicos que controlan el daño por humedad son complejos y solo ahora son empezando a entenderse. Es muy difícil predecir la resistencia al daño por humedad de una combinación particular de asfalto y agregado, aunque las MAC producidas con agregados que contienen una gran cantidad de sílice, como arenisca, cuarcita, pedernal y algunos granitos, tienden a ser más susceptibles al daño por humedad. Una construcción y compactación adecuada, puede ayudar a reducir la permeabilidad de los pavimentos asfálticos y así reducir significativamente la probabilidad de daños por humedad. Se pueden agregar aditivos promotores de adherencia a las MAC para mejorar su resistencia a la humedad.

2.2.7.2. Susceptibilidad a la deformación permanente

La formación de roderas o ahuellamiento (a menudo denominada deformación permanente) es una forma común de deterioro en estructuras flexibles pavimentos. Cuando las llantas de un camión se mueven sobre un pavimento de concreto asfáltico, el pavimento desvía una cantidad muy pequeña. Estas deflexiones van desde mucho menos de una décima de milímetro en climas fríos, cuando el pavimento y la subrasante son muy rígidos, hasta un milímetro o menos más en clima cálido, cuando la superficie del pavimento está caliente y muy blanda. Después del neumático del camión pasa sobre un punto dado en el pavimento, el pavimento tiende a volver a su estado original posición. A menudo, sin embargo, la superficie del pavimento no se recuperará por completo. En cambio, habrá una cantidad muy pequeña de deformación permanente en la trayectoria de la rueda.

Después de que muchas ruedas han pasado cargas sobre el pavimento, tal vez solo unos pocos miles en un mal construido pavimento, a 10 millones o más por uno debidamente diseñado y construido para tráfico pesado cargas, esta formación de roderas puede volverse significativa. Los pavimentos con ahuellamiento severo pueden tener surcos de 20 mm o más en profundidad. La formación de surcos es un problema grave porque los surcos contribuyen a una conducción irregular superficie y puede llenarse de agua durante eventos de lluvia, lo que puede hacer que los vehículos que viajan en el camino al hidroplaneo y perder el control. Las profundidades de las roderas de unos 10 mm o más suelen ser considerado excesivo y un peligro significativo para la seguridad.

La deformación permanente (rodera), es una de las degradaciones más importantes de los pavimentos flexibles en México. Este problema está asociado a la estructura misma de la mezcla asfáltica, las condiciones de tránsito en el pavimento y el pobre control de calidad durante la construcción del pavimento. Las roderas son deformaciones plásticas que surgen en la superficie de rodamiento de un pavimento flexible, se presentan en la zona de mayor incidencia de los neumáticos de vehículos pesados. Comúnmente aparecen como una depresión longitudinal con ligero levantamiento lateral de la mezcla asfáltica. En los últimos años estas degradaciones se han presentado de forma prematura. (AMAAC, 2017).

La resistencia a la rodera se puede evaluar en el AMPT usando la prueba de módulo dinámico, la prueba de número de flujo o la prueba de tiempo de flujo.

En el reporte NHRCP 673 se recomiendan cuatro pruebas de rendimiento como candidatas para la evaluación de la deformación permanente de las mezclas:

- La prueba de corte repetido a altura constante (RSCH) realizada con el probador de corte Superpave (SST).
- La prueba de resistencia a la tensión indirecta a alta temperatura (IDT).
- El analizador de pavimentos asfálticos (APA).
- Ensayo Rueda Cargada de Hamburgo (HWT).

2.2.7.3. Agrietamiento por fatiga de las mezclas asfálticas

El agrietamiento por fatiga es llamado coloquialmente “piel de cocodrilo” debido a que el patrón de espaciamiento entre las grietas es muy similar a la forma exterior de la piel de cocodrilo. Es el resultado de la aplicación de un esfuerzo de tensión mayor a la resistencia a la tensión de la mezcla. Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo prematuro de agrietamiento por fatiga. Este tipo de falla generalmente ocurre cuando el pavimento ha sido esforzado hasta el límite, por la repetición de aplicaciones de carga. El agrietamiento por fatiga es comúnmente asociado con las cargas, las cuales son mucho más pesadas para la estructura del pavimento, o a que el número de repeticiones de carga fue mayor a las consideradas en el diseño (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005)

CAPITULO III

III. TRABAJOS RELACIONADOS

Las propiedades de una mezcla asfáltica se ven afectadas por cada uno de sus componentes, es por ello que para determinar los beneficios de la combinación de tecnologías de mezclas tibias con polvo de hule de neumáticos fuera de uso, los investigadores han realizado diferentes estudios para evaluar la influencia de las tecnologías WMA en el desempeño tanto del asfalto como de la mezcla asfáltica que contiene hule de neumático, evaluando diferentes variables tales como: método de incorporación del polvo de NFU, procedimiento para la producción de la mezcla, metodología de diseño y desempeño de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas.

A continuación, se muestra la revisión del estado del arte, en la cual se seleccionaron ocho artículos que sirvieron de base para el desarrollo de esta investigación. Posteriormente se describe de manera resumida la relación y diferencia de cada trabajo con la investigación a realizar.

3.1. Estudios relacionados con el análisis de las características de la mezcla dependiendo de los procesos de incorporación del polvo de NFU.

3.1.1. Influence of warm mix additive on internal structure of dry process crumb rubber modified mixtures.

Ayhan Oner Yucel, Hande Isik Ozturk, Murat Guler

En este trabajo, se estudió la estructura interna de una mezcla asfáltica tibia con 3% de Sasobit e incorporando hule de neumáticos por vía seca (Dry-WMA), las mezclas se produjeron a varias temperaturas reducidas en comparación con una mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho granulado de proceso seco (DryMAC), basado en imágenes transversales 2D de muestras. Se llevaron a cabo análisis detallados para probar las relaciones entre los niveles de homogeneidad y las propiedades de la zona de contacto de las mezclas Dry-WMA y DryMAC, el diseño de las mezclas se realizó con metodología Marshall y los ensayos de evaluación fueron: estabilidad y flujo, deformación permanente mediante el ensayo de compresión axial cíclica y la susceptibilidad al agrietamiento se evaluó con ensayo de tracción indirecta (IDT). Se descubrieron fuertes tendencias entre las características de la estructura interna y los indicadores de desempeño que

también estaban relacionados con las temperaturas de producción de la mezcla y los esfuerzos de compactación.

En este estudio también evaluaron las estructuras internas de las muestras compactadas se determinaron utilizando imágenes de sección transversal horizontal 2D capturadas de ambos lados de las muestras para estudiar el efecto del aditivo WMA, imágenes con las cuales evaluaron las propiedades de los contactos (el número de contactos y la longitud total de los contactos) apoyándose con el software iPas (Yucel, Ozturk, & Guler, 2021).

En contraste con el autor previamente mencionado, esta investigación propone:

- En este estudio se propone la incorporación del polvo de neumáticos por vía semihúmeda a diferencia del autor que empleo la vía seca, además se propone un diseño con protocolo AMAAC, el autor empleo metodología Marshall.
- Comparar la mezcla asfáltica tibia no solamente con una mezcla asfáltica en caliente que incorpora polvo de neumáticos, sino también comparar su desempeño con una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado diferencia de solo utilizar un solo tipo de asfalto (Grado de penetración 50/70).
- Determinar la susceptibilidad a la humedad, mediante la prueba TSR (Tensile Strength Ratio).
- Evaluación de la deformación permanente con el ensayo Rueda cargada de Hamburgo y Ensayo de compresión axial cíclica.
- Determinar el módulo resiliente de las mezclas utilizando la normativa española UNE-EN 12697-26 (Anexo C).
- Determinar el módulo de rigidez (módulo dinámico) de las mezclas asfálticas, utilizando la normativa americana AASHTO T 342.
- Determinar las leyes de fatiga, para cuantificar el número de ciclos de carga al utilizar una tecnología en tibio. Las leyes de fatiga se obtienen mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas conforme la normativa UNE – EN 12697-24 (Anexo E).
- Por otro lado, aunque el autor también empleo un aditivo orgánico para la fabricación de las mezclas tibias, las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas fueron superiores a las evaluadas en esta tesis.

3.1.2. Laboratory evaluation of dry process crumb rubber modified mixtures containing Warm Mix Asphalt Additives.

Hande Isik Ozturk, Farshad Kamran

En este estudio, se investigó la utilización de aditivos WMA en mezclas modificadas de caucho granulado de proceso seco. El estudio se dividió en dos fases principales. En la primera fase, se estudiaron las propiedades volumétricas de las mezclas de HMA modificado con caucho granulado de proceso seco (DryMAC) y WMA modificado con caucho granulado de proceso seco (DryWMA). En la segunda fase del estudio, se evaluó el rendimiento de las mezclas DryMAC y DryWMA y se comparó de acuerdo con su potencial de agrietamiento y roderas mediante la ejecución de pruebas de resistencia a la tracción indirecta y fluencia dinámica (FN) a 25°C, 40°C y 55 °C.

Las mezclas se diseñaron con metodología Marshall, el autor empleo 2% de polvo de neumático con relación al peso total de la mezcla, las temperaturas de mezclado y compactación se determinaron como 160°C y 150°C respectivamente, el aditivo para mezcla tibia empleado en este trabajo fue 1.5% de Sasobit con relación al peso del aglutinante (Ozturk & Kamran, 2019).

En contraste con el autor previamente mencionado, esta investigación propone:

- En este estudio se propone la incorporación del polvo de neumáticos por vía semihúmeda a diferencia del autor que empleo la vía seca, además se propone un diseño con protocolo AMAAC, el autor empleo metodología Marshall.
- Comparar la mezcla asfáltica tibia no solamente con una mezcla asfáltica en caliente que incorpora polvo de neumáticos, sino también comparar su desempeño con una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado.
- Determinar la susceptibilidad a la humedad, mediante la prueba TSR (Tensile Strength Ratio).
- Evaluación de la deformación permanente con el ensayo Rueda cargada de Hamburgo.
- Determinar el módulo resiliente de las mezclas utilizando la normativa española UNE-EN 12697-26 (Anexo C).
- Determinar el módulo de rigidez (módulo dinámico) de las mezclas asfálticas, utilizando la normativa americana AASHTO T 342.

- Por otro lado, aunque el autor también empleo un aditivo orgánico para la fabricación de las mezclas tibias, las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas fueron superiores a las evaluadas en esta tesis.

3.1.3. Decision support for selecting optimal method of recycling waste tire rubber into wax-based warm mix asphalt based on fuzzy comprehensive evaluation.

Huayang Yu, Yanlin Chen, Qi Wu, Litian Zhang, Zeyu Zhang, Junhui Zhang, Miomir Miljkovic, Markus Oeser.

En este estudio, se prepararon en el laboratorio muestras de mezcla de asfalto con seis métodos diferentes de reciclaje de CR incorporado por vía seca y vía húmeda. Se realizaron experimentos en estas muestras para evaluar el efecto de los métodos de reciclaje sobre la resistencia a la formación de roderas, la susceptibilidad a la humedad, la resistencia a la fatiga, estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas. Con base en los resultados experimentales, se empleó lógica difusa para evaluar cuantitativamente los grados de desempeño de todas las muestras. La matriz ponderada de todas las propiedades se estableció utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) con la consideración de las condiciones ambientales en el sur de China. Se utilizó el método de evaluación integral difusa (FCE) para evaluar los métodos de reciclaje.

El aditivo para mezcla tibia utilizado en este estudio fue el Sasobit y la metodología de diseño de las mezclas fue Superpave, todas las mezclas se fabricaron a 160°C y se compactaron a temperaturas superiores a los 150°C (Yu, et al., 2020).

En contraste con el autor previamente mencionado, esta investigación propone:

- En este estudio se propone la incorporación del polvo de neumáticos por vía semihúmeda a diferencia del autor que evalúa las incorporaciones por vía húmeda y vía seca.
- Determinar el módulo resiliente de las mezclas utilizando la normativa española UNE-EN 12697-26 (Anexo C).
- Determinar el módulo de rigidez (módulo dinámico) de las mezclas asfálticas, utilizando la normativa americana AASHTO T 342.

Por otro lado, aunque el autor también empleo un aditivo orgánico para la fabricación de las mezclas tibias, las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas fueron superiores a las evaluadas en esta tesis

3.2. Estudios relacionados con el efecto de la reducción de las temperaturas de compactación en mezclas tibias que incorporan polvo de hule de neumáticos.

3.2.1. *Effects of Compaction Temperature on Volumetric Properties of Rubberized Mixes Containing Warm-Mix Additives.*

Chandra K. Akisetty; Soon-Jae Lee; and Serji N. Amirkhanian

Este estudio investigó las propiedades volumétricas de mezclas asfálticas modificadas con caucho granulado (CR) que contienen aditivos de mezcla tibia en función de la temperatura de compactación utilizando el compactador giratorio Superpave (SGC). Se diseñaron cuatro mezclas, incluido el control con asfalto PG 64-22 y asfaltos modificados con caucho al 10% y dos fuentes de agregados, utilizando las especificaciones de Superpave. Las mezclas se compactaron a cuatro temperaturas de 97, 116, 135 y 154 ° C. Se evaluaron las propiedades volumétricas de estas mezclas. Los aditivos para mezcla asfáltica tibia que se emplearon fueron Aspha – min y Sasobit (Akisetty, Lee, & Amirkhanian, 2009).

En contraste con el autor previamente mencionado, esta investigación propone:

- En este estudio se propone la incorporación del polvo de neumáticos por vía semihúmeda a diferencia del autor que empleo la vía húmeda.
- Comparar la mezcla asfáltica tibia no solamente con una mezcla asfáltica en caliente que incorpora polvo de neumáticos, sino también comparar su desempeño con una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado.
- Determinar la susceptibilidad a la humedad, mediante la prueba TSR (Tensile Strength Ratio).
- Evaluación de la deformación permanente con el ensayo Rueda cargada de Hamburgo y Ensayo de compresión axial cíclica.
- Determinar el módulo resiliente de las mezclas utilizando la normativa española UNE-EN 12697-26 (Anexo C).
- Determinar el módulo de rigidez (módulo dinámico) de las mezclas asfálticas, utilizando la normativa americana AASHTO T 342.
- Determinar las leyes de fatiga, para cuantificar el número de ciclos de carga al utilizar una tecnología en tibio. Las leyes de fatiga se obtienen mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas conforme la normativa UNE – EN 12697-24, anexo E.

3.3. Estudios en los cuales se evaluaron características y desempeño de mezclas asfálticas tibias que incorporan polvo de neumáticos.

3.3.1. *Performance and Aging Characteristics of Hot Mixture Asphalt with Crumb Rubber and Warm Mix Asphalt Additives.*

Mustafa Akpolat, Ph.D.; Baha Vural K  k, Ph.D.; and Mehmet Yilmaz, Ph.D.

En este estudio, se examinaron los efectos de los distintos periodos de envejecimiento en el laboratorio y el campo, así como los métodos de envejecimiento estándar en las mezclas puras y modificadas. El caucho granulado (CR) y los aditivos de mezcla tibia Sasobit y Evotherm se utilizaron como modificador. Al mismo tiempo que se mejoraba el rendimiento de la mezcla mediante la modificación CR de manera económica, el objetivo era adquirir los ligantes y mezclas con temperaturas de mezcla-compactación más bajas aumentando su trabajabilidad utilizando los aditivos asfálticos calientes.

Este estudio empleo asfalto clasificado por penetración como 50/70, la metodología de diseño fue Marshall y las mezclas se realizaron con 10% de CR con relación a la masa del asfalto por vía húmeda, las temperaturas de fabricación de las mezclas estuvieron en un rango de 160 y 170  C (Akpolat, Vural K  k, & Yilmaz , 2020).

En contraste con el autor previamente mencionado, este trabajo de tesis propone:

- En este estudio se propone la incorporación del polvo de neumáticos por vía semihúmeda a diferencia del autor que empleo la vía húmeda, además se propone un diseño con protocolo AMAAC, el autor empleo metodología Marshall.
- Comparar la mezcla asfáltica tibia no solamente con una mezcla asfáltica en caliente que incorpora polvo de neumáticos, sino también comparar su desempeño con una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado diferencia de solo utilizar un solo tipo de asfalto (Grado de penetración 50/70).
- Determinar la susceptibilidad a la humedad, mediante la prueba TSR (Tensile Strength Ratio).
- Evaluación de la deformación permanente con el ensayo Rueda cargada de Hamburgo y Ensayo de compresión axial cíclica.
- Determinar el módulo de rigidez (módulo dinámico) de las mezclas asfálticas, utilizando la normativa americana AASHTO T 342, el autor solamente evaluó módulo resiliente.

- Determinar las leyes de fatiga, para cuantificar el número de ciclos de carga al utilizar una tecnología en tibio. Las leyes de fatiga se obtienen mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas conforme la normativa UNE – EN 12697-24 (Anexo E), el autor empleo el mismo ensayo, pero no determinó leyes de fatiga.
- Las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas fueron superiores a las evaluadas en esta tesis.

3.3.2. Rutting Assessment of Crumb Rubber Modifier Modified Warm Mix Asphalt Incorporating Warm Asphalt Additive.

Ahmad Batari, Mohamad Y. Aman, Saeed M. Saeed, TY Ahmed, AU Chinade.

El objetivo de este estudio fue realizar un estudio de laboratorio para evaluar el efecto del caucho granulado procesado en húmedo sobre la resistencia a la formación de roderas de mezclas asfálticas tibias que incorporan aditivo de mezcla tibia a través del ensayo pista española. La metodología de diseño volumétrico fue Superpave y se elaboraron con asfalto PG 64 al cual se le añadió porcentajes de 0%,5%,10% y 15% de polvo de neumáticos, el aditivo para mezcla tibia utilizado fue 2.5% de Sasobit y las temperaturas de trabajo fueron 145°C de mezclado y 135° de compactación (Batari, Aman, Saeed, Ahmed, & Chinade, 2017).

En contraste con el autor previamente mencionado, esta investigación propone:

- En este estudio se propone la incorporación del polvo de neumáticos por vía semihúmeda a diferencia del autor que empleo la vía húmeda.
- Comparar la mezcla asfáltica tibia no solamente con una mezcla asfáltica en caliente que incorpora polvo de neumáticos, sino también comparar su desempeño con una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado.
- Determinar la susceptibilidad a la humedad, mediante la prueba TSR (Tensile Strength Ratio).
- Evaluación de la deformación permanente con el ensayo Rueda cargada de Hamburgo y Ensayo de compresión axial cíclica.
- Determinar el módulo resiliente de las mezclas utilizando la normativa española UNE-EN 12697-26 (Anexo C).
- Determinar el módulo de rigidez (módulo dinámico) de las mezclas asfálticas, utilizando la normativa americana AASHTO T 342.

- Determinar las leyes de fatiga mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas conforme la normativa UNE – EN 12697-24 (Anexo E).
- Por otro lado, aunque el autor también empleo un aditivo orgánico para la fabricación de las mezclas tibias, las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas fueron superiores a las evaluadas en esta tesis.

3.3.3. *Asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives.*

Ana María Rodríguez Alloza

Es estudio evaluó el desempeño de mezclas asfálticas tibias con asfalto modificado con polvo de neumáticos. Los aditivos para mezcla asfáltica tibia utilizados fueron Sasobit- y Licomont BS. Las mezclas asfálticas elaboradas se evaluaron y comparados para analizar el efecto de los aditivos cuando las temperaturas de producción / compactación se reducen durante las siguientes pruebas: deformación permanente con el ensayo pista española, sensibilidad al agua con el ensayo de relación de esfuerzo a tensión indirecta, módulo dinámico a 20°C y resistencia a la fatiga con ensayo viga de flexión de cuatro puntos. En este sentido, los aditivos orgánicos elegidos redujeron la viscosidad de un aglutinante (20% en peso de caucho agregado a un asfalto 50/70) y consecuentemente redujeron la temperatura de producción de una mezcla asfáltica que incorpora hule de neumáticos. Se evaluaron temperaturas de mezclado de 170,160 y 150 °C, las temperaturas de compactación fueron 160, 150 y 140°C respectivamente (Rodríguez Alloza & Gallego, 2017).

En contraste con el autor previamente mencionado, esta investigación propone:

- En este estudio se propone la incorporación del polvo de neumáticos por vía semihúmeda a diferencia del autor que empleo la vía húmeda.
- Comparar la mezcla asfáltica tibia no solamente con una mezcla asfáltica en caliente que incorpora polvo de neumáticos, sino también comparar su desempeño con una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado.
- Evaluación de la deformación permanente con el ensayo Rueda cargada de Hamburgo y Ensayo de compresión axial cíclica.
- Por otro lado, aunque el autor también empleo un aditivo orgánico para la fabricación de las mezclas tibias, las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas fueron superiores a las evaluadas en esta tesis.

3.3.4. Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber.

Farshad Saberi.K, Mansour Fakhri, Ahmad Azami

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar tres tecnologías verdes, incluyendo asfalto engomado, pavimento de asfalto recuperado y mezcla asfálticas tibias para desarrollar un pavimento con mínimos impactos sobre el medio ambiente; siete mezclas diferentes fueron seleccionados, incluyendo una muestra de control y otras seis muestras modificadas por los diferentes porcentajes de RAP y polvo de neumáticos fuera de uso. La metodología de diseño empleada fue metodología Marshall, el aditivo orgánico para las mezclas asfálticas tibias fue Sasobit 4% y 5.5% con relación al peso del asfalto. Los ensayos de evaluación realizados fueron Susceptibilidad al daño por humedad, mediante el ensayo de inmersión Marshall, el agrietamiento por fatiga se evaluó con el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas y finalmente se realizó en ensayo de fluencia dinámica para evaluar la deformación permanente a través de cargas repetidas (Saberi.K, Fakhri, & Azami, 2017).

En contraste con el autor previamente mencionado, esta investigación propone:

- En este estudio se propone la incorporación del polvo de neumáticos por vía semihúmeda a diferencia del autor que empleo la vía húmeda, además se propone un diseño con protocolo AMAAC, el autor empleo metodología Marshall.
- Comparar la mezcla asfáltica tibia no solamente con una mezcla asfáltica en caliente que incorpora polvo de neumáticos, sino también comparar su desempeño con una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado.
- Determinar la susceptibilidad a la humedad, mediante la prueba TSR (Tensile Strength Ratio).
- Evaluación de la deformación permanente con el ensayo Rueda cargada de Hamburgo.
- Determinar el módulo resiliente de las mezclas utilizando la normativa española UNE-EN 12697-26 (Anexo C).
- Determinar el módulo de rigidez (módulo dinámico) de las mezclas asfálticas, utilizando la normativa americana AASHTO T 342.
- Por otro lado, aunque el autor también empleo un aditivo orgánico para la fabricación de las mezclas tibias, se emplearon porcentajes mayores al utilizado en esta tesis.

3.4.Conclusiones

El desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con caucho granulado y aditivos para WMA ha sido evaluado con el empleo de distintas tecnologías WMA, metodologías de diseño, procedimientos de incorporación del CR, así como porcentajes y granulometrías del caucho de neumáticos, de acuerdo a la revisión de literatura se ha demostrado que la combinación de CR con tecnologías WMA pueden ser de beneficio para el desempeño y comportamiento de las mezclas; sin embargo, la variación de resultados obtenidos sugiere realizar más estudios con diferentes aglutinantes y tecnologías WMA.

Teniendo en cuenta que Ahmed, et al., (2021) manifiestan en su investigación que un aumento del de caucho en el aglutinante modificado con aditivos orgánicos WMA pone en peligro la resistencia al daño por humedad y agrietamiento por fatiga y Yucel, et al., (2021) determinaron en su investigación que el potencial de deformación permanente en las mezclas ahuladas mediante el proceso seco es ligeramente mayor que las fabricadas mediante proceso húmedo; lo cual abre una brecha de investigación con relación a la evaluación de estos parámetros.

Dado que el aditivo más utilizado para evaluar mezclas asfálticas con polvo de neumático y tecnologías WMA ha sido el aditivo orgánico Sasobit, en trabajos futuros se pueden realizar evaluaciones empleando otro tipo de aditivos.

La metodología para construcción de pavimentos flexibles que más se ha empleado para diseñar y evaluar las mezclas asfálticas que emplean aditivos de mezclas tibias para reducir la viscosidad y polvo de neumáticos fuera de uso para mejorar las características físicas y mecánicas de la mezcla es la metodología Marshall, por lo cual, evaluar otras metodologías de diseño tal como Protocolo AMAAC y evaluación a través de ensayos de desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con aditivos WMA y CR se convierte en un área de oportunidad de investigación.

CAPITULO IV

IV. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se proporciona información sobre los materiales utilizados y se detalla el programa experimental que se siguió para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

4.1. Materiales

4.1.1. Cemento asfáltico

El asfalto base utilizado en este trabajo corresponde a un asfalto clasificado por grado de desempeño como PG 64-22, procedente de la refinería de Salamanca, Guanajuato, México, el cual también se utilizó como base para ser modificado con un ter polímero RET, asimismo el asfalto base se modificó con un aditivo orgánico auxiliar de compactación; por lo tanto, los asfaltos utilizados fueron los siguientes:

- i. Asfalto convencional base, PG 64-22
- ii. Asfalto modificado con un aditivo auxiliar de compactación, PG 70S-22
- iii. Asfalto modificado con polímero, PG 76E-22
- iv. Asfalto modificado con polvo de neumático, PG 76E-22

4.1.2. Agregados

Para esta investigación, se utiliza un agregado pétreo triturado de origen basáltico proveniente del banco “Asfaltos Guadalajara” Tonalá, Jalisco.

4.1.3. Aditivos para mezclas tibias

En este estudio se empleó un aditivo fabricado y utilizado en México para la elaboración de mezclas asfálticas tibias que en lo sucesivo denominaremos aditivo TB-1, el cual, es un aditivo orgánico cuyas propiedades permiten reducir a la viscosidad del cemento asfáltico, por lo tanto, funciona como un auxiliar de compactación. Conforme las recomendaciones de fábrica, se empleó un 2% del aditivo con relación a la masa del cemento asfáltico.

De acuerdo con su ficha técnica, el TB-1 es un producto diseñado y fabricado para la producción de mezclas asfálticas tibias, permite reducir la temperatura de producción y tendido de la mezcla,

ampliando los tiempos de pavimentación, la distancia de transportación entre la planta de producción de mezcla y el punto de aplicación.

Características físicas:

- ☞ Aspecto a 25°C Sólido (escama)
- ☞ Olor característico Amoniacal
- ☞ Color Café oscuro

4.1.4. Polvo de neumáticos reaccionado y activado

El polvo de neumáticos utilizado para el estudio es un aditivo elastomérico compuesto por caucho reciclado proveniente de NFU, el polvo de neumático se encuentra predigerido y activado, el cual es procesado y tratado bajo una tecnología patentada.

Se le denomina predigerido porque el polvo de neumático ha sido previamente procesado en una planta con asfalto y por productos minerales, lo cual permite que realice el proceso de digestión previamente para lograr ser añadido directamente al mezclador de la planta para la producción de mezcla asfáltica junto a los áridos antes de incorporar el cemento asfáltico, usando los silos o dosificadores de polvo de polvo mineral y mineral o aditivos existentes en la planta, lo que denominamos vía semihúmeda, (ver Ilustración IV-1).

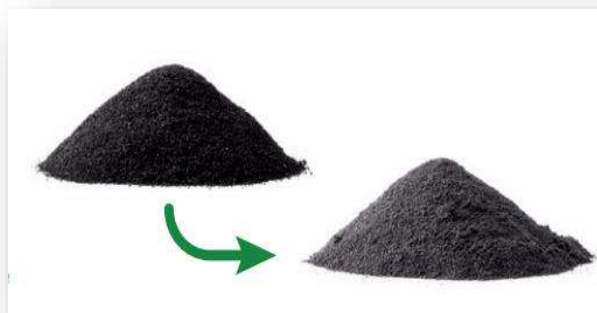


Ilustración IV-1. Polvo de neumático predigerido y activado.

⊗ **Características Generales conforme ficha técnica.**

- ☞ Estado físico: Sólido, polvo gris oscuro.
- ☞ Olor y apariencia: Grano fino, gránulos grisáceos.
- ☞ Humedad: 300 (grados centígrados).
- ☞ Solubilidad: Insoluble en agua.
- ☞ Estabilidad química: Incompatible como oxidante fuerte.

⊗ **Composición del hule de neumáticos predigerido y activado.**

- ☞ Contenido en polvo de NFU: 60%
- ☞ Contenido en asfalto: 16% ($\pm 3\%$)
- ☞ Filler calizo y aditivos: 24% ($\pm 3\%$)

El porcentaje de hule de neumáticos utilizado es de 2% con relación a la masa total de la mezcla.

El hule de neumáticos se incorpora a la mezcla a temperatura ambiente durante el proceso de mezclado de los agregados con el ligante, por lo cual su granulometría se encuentra considerada dentro del esqueleto mineral que conforma la mezcla asfáltica.

4.2. Programa experimental

La parte experimental de esta tesis se divide en cuatro etapas principales de investigación:

- ⊗ Caracterización de los agregados pétreos
- ⊗ Caracterización de los ligantes asfálticos
- ⊗ Diseño volumétrico de las mezclas asfálticas.
- ⊗ Evaluación del desempeño de las mezclas.

Para los agregados pétreos se evaluaron las propiedades de consenso y origen que se enlistan en la Ilustración IV-2; las cuales son recomendadas por el protocolo para diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño de la Asociación Mexicana del Asfalto, A.C (AMAAC).

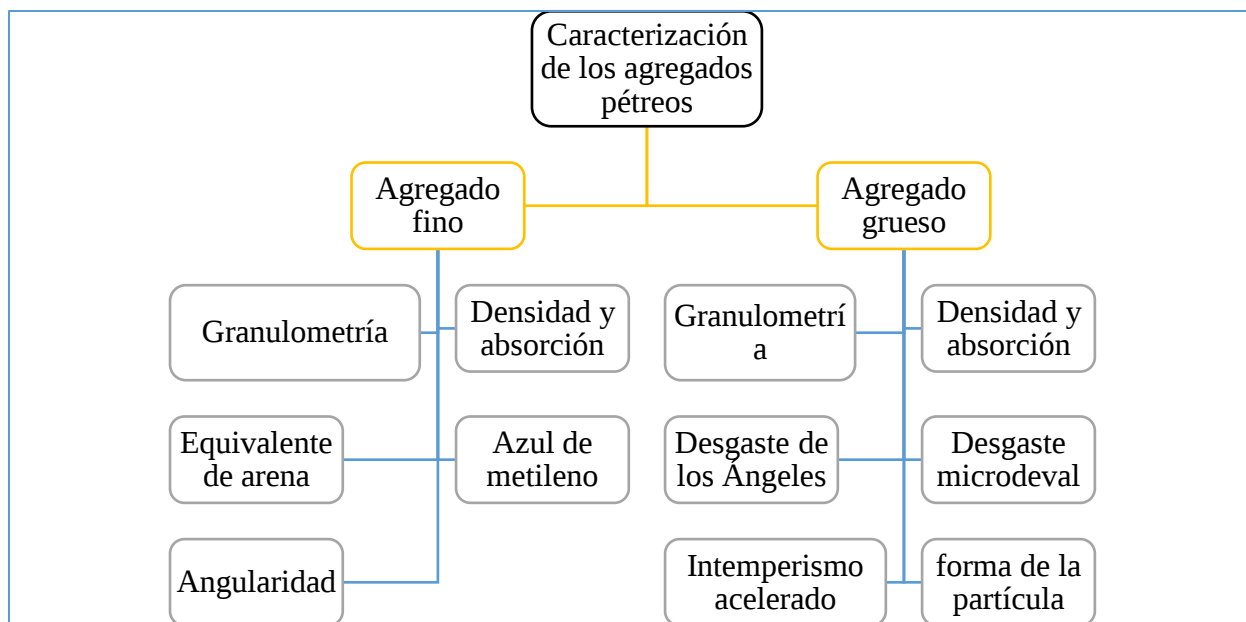


Ilustración IV-2. Diagrama de flujo de la caracterización de los agregados pétreos.

Durante **la segunda** etapa se realizó la caracterización básica de los cementos asfálticos con los ensayos que se indican a continuación en la Ilustración IV-3.

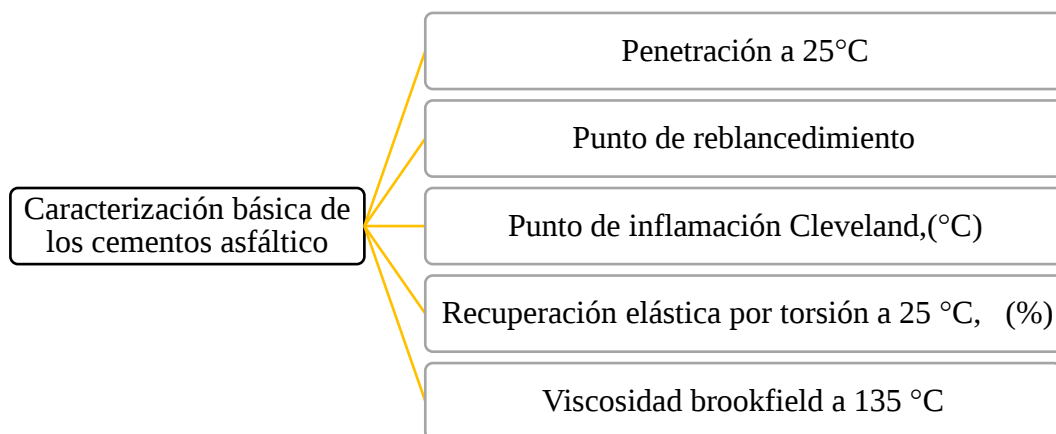


Ilustración IV-3. Diagrama de flujo de la caracterización básica del cemento asfáltico.

En la segunda etapa también se evaluaron las propiedades viscoelásticas de cada uno de los ligantes asfálticos en fase original, después de RTFO que representa el envejecimiento a corto plazo durante producción, tendido y compactación de la mezcla y por último después del PAV que representa el envejecimiento a largo plazo una vez que la vía se ha puesto en servicio, en la

Ilustración IV-4, se observan los ensayos llevados a cabo para la caracterización de los cementos asfálticos mencionados en el acápite 4.1.1.

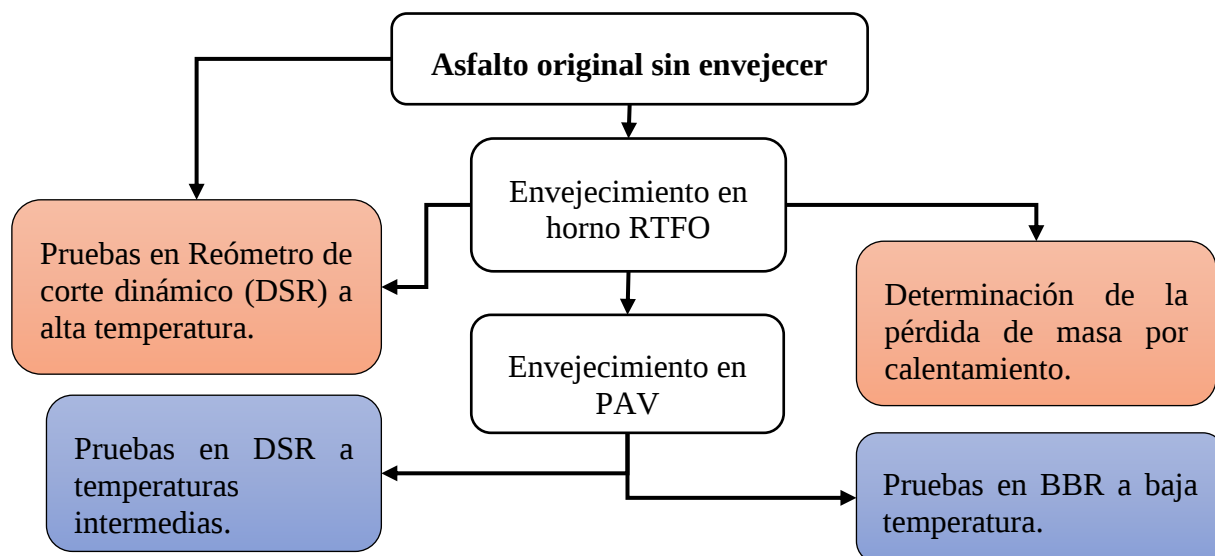


Ilustración IV-4. Diagrama de flujo de la caracterización reológica de los ligantes asfálticos.

Es importante mencionar que, los métodos de ensayo para la caracterización del material pétreo al igual que para ligantes asfálticos, se encuentran en la normativa internacional ASTM, AASHTO y también en la normativa vigente de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte (SICT).

Para llevar a cabo este estudio se fabricaron mezclas asfálticas de granulometría densa. Se diseñaron y evaluaron cinco mezclas asfálticas, las cuales se describen en la Ilustración IV-5, se realizaron tres mezclas en calientes (MAC), establecidas como mezclas de control para comparar el desempeño de las mezclas asfálticas tibias.

Los ensayos de curva de viscosidad para asfalto convencional y viscosidad corte cero (VCC) se realizaron para determinar el rango de temperaturas práctico permisible para la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente.

Asfalto convencional (64-22) • Mezcla asfáltica en caliente con asfalto convencional. • Mezcla asfáltica en caliente con asfalto convencional + 2% de CR.
Asfalto modificado con polímero (64-22 + Terpolímero RET) • Mezcla asfáltica en caliente modificada con polímero.
Asfalto modificado con aditivo para mezcla tibia (64-22 + TB1) • Mezcla asfáltica tibia + 2% de CR (135 °C - 125 °C). • Mezcla asfáltica tibia + 2% de CR (135 °C - 115 °C).

Ilustración IV-5. Combinaciones de mezclas asfálticas en estudio.

La **cuarta** etapa experimental consistió en realizar el diseño volumétrico de las mezclas y evaluación del desempeño conforme los parámetros establecidos en el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 Diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño, en la Ilustración IV-6 se indican los parámetros de desempeño evaluados para cada una de las mezclas en estudio.



Ilustración IV-6. Diagrama de flujo de parámetros de desempeño evaluados en las mezclas en estudio.

El diseño volumétrico se realizó conforme la metodología establecida en el PA-MA 01/2013. La resistencia de la mezcla compactada al daño inducido por humedad se determinó por medio de la Relación de Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR), conforme la norma AASHTO T 283-14(2018), la susceptibilidad a la deformación permanente se evaluó mediante los ensayos Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324-19), y ensayo de Compresión Axial Cíclica (AASHTO T 378) , el módulo resiliente se determinó conforme la normativa española UNE-EN 12697-26, Anexo C, el ensayo Módulo Dinámico se realizó conforme la norma AASHTO T 342 y la vida fatiga se evaluó a través del ensayo de Tracción Indirecta Sobre Probetas Cilíndrica siguiendo los lineamientos de la norma UNE-EN 12697-24, Anexo E.

4.3. Caracterización de los materiales

Los componentes de una mezcla asfáltica son uno de los principales factores que determinaran el desempeño de la mezcla durante su vida útil, por lo cual es necesario conocer las propiedades de cada uno de ellos desde la realización del diseño. En este apartado se describirán de forma general las características con las cuales deben cumplir los agregados pétreos y ligante asfáltico, de igual forma los procedimientos de ensayo que se siguieron para su caracterización.

4.3.1. Calidad de los agregados pétreos

Los agregados deben tener características específicas de acuerdo con el uso y rendimiento esperado de la estructura de pavimento; debido a que sus propiedades influyen en gran medida en la resistencia a la deformación permanente de la mezclas, fricción, textura y durabilidad.

La absorción, forma y textura determinan en parte importante el contenido de asfalto en la mezcla; la resistencia a tracción, fatiga y flexibilidad también dependen en cierta medida por el agregado mineral. Los agregados de mayor densidad, que son más resistentes y sólidos son deseables por su durabilidad y resistencia a la descomposición durante las aplicaciones de carga.

El material pétreo fue caracterizado de acuerdo con lo establecido en el protocolo AMAAC PA MA 01/2013, Diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño. Este protocolo considera 10 ensayos para la caracterización física del material pétreo.



Ilustración IV-7. Muestreo de materiales en banco Asfaltos Guadalajara, Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.1. Muestreo de material

Para la elaboración de mezclas asfálticas en esta tesis, se utiliza agregado pétreo triturado de origen basáltico proveniente del banco “Asfaltos Guadalajara” Guadalajara, Jalisco. El banco de material localiza en la Prolongación Independencia 901, El Recodo, CP 45414, Tonalá, Jalisco. El material fue muestreado el día 31 de agosto del 2022 por la cantidad total de 30 cubetas de grava y 30 cubetas de arena (ver Ilustración IV-7).

4.3.1.2. Reducción de muestra de los agregados

Actualmente existen tres métodos para la reducción de grandes muestras de agregado al tamaño apropiado para ensayos: (1) separador mecánico (método A), (2) cuarteo (método B) y (3) pila cónica (método C, solo para agregado fino húmedo. (Ayala del Toro , Delgado Alamilla , Cuellar Pérez , & Salazar Rivera , 2019)

En esta tesis, para la reducción de muestra de los agregados tanto gruesos como finos, se utilizó el método A; el separador mecánico es un equipo con un número para de canaletas (aberturas) de anchura igual, equipado con dos recipientes o receptáculos para alojar las dos mitades de la muestra después de la separación; así como una tolva para la alimentación de material (ver Ilustración IV-8).

El procedimiento de prueba consiste en colocar la muestra total en la tolva y distribuirla uniformemente de un borde a otro, de manera que cuando pase por las canaletas, fluyan cantidades aproximadamente iguales por las mismas, obteniendo de este modo la primera división de la muestra.



Ilustración IV-8. Separador mecánico de materiales pétreos.

Posteriormente se retira el material de uno de los receptáculos y se almacena; el material restante del otro recipiente se reintroduce en la tolva para obtener una segunda división de la muestra. Este procedimiento se repite cuantas veces sea necesario, hasta obtener el tamaño de muestra requerido por los ensayos de caracterización de los agregados.

4.3.1.3. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos

El análisis granulométrico tiene como objeto determinar la distribución de tamaños de las partículas de agregados finos y gruesos por medio de tamices. La distribución de tamaños se utiliza para el diseño volumétrico, ya que, en dependencia de la granulometría de mezcla requerida, se deben cumplir con límites especificados.

El procedimiento de prueba consiste en registrar la masa inicial de la muestra (**A**) con una aproximación de 0.1g (1 decimal), colocar la muestra en la malla superior y posteriormente agitar los tamices manualmente o con el vibrador mecánico, en este caso se realizó de forma manual.

Para el agregado grueso el tamaño de la muestra depende del tamaño nominal (ver Tabla IV-1) y para el agregado fino, según la normativa deberá ser de 300 g mínimo

Tabla IV-1. Tamaño de muestra de acuerdo con el tamaño nominal del agregado.

Tamaño nominal, mm [pulgadas]	Tamaño mínimo de la muestra [g]
9.5 [3/8]	1 000
12.5 [1/2]	2000
19.0[3/4]	5 000
25.0 [1]	10 000
37.5 [1 ½]	15 000

Consecutivamente se realiza los cálculos de las masas retenidas parcialmente en cada tamiz respecto a la masa total antes del cribado, porcentaje de material que pasa por cada tamiz.

$$\text{Retenido parcial [\%]} = \frac{\text{Masa retenida en cada tamiz}}{A} * 100 \quad (1)$$

Donde:

[A]: Masa inicial de la muestra con una aproximación de 0.1g (1 decimal)

$$\text{Material que pasa [\%]} = \% \text{ que pasa el tamiz superior} - \% \text{ masa parcial} \quad (2)$$

Una vez realizados los cálculos se procede a graficar la curva granulométrica en función de la abertura del tamiz.

4.3.2. Ensayos para agregado fino

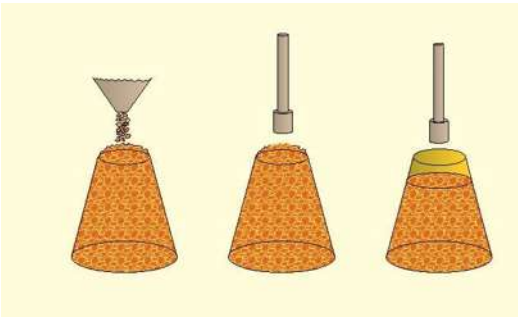
Gravedad específica y absorción del agregado fino (ASTM C128-15)

La gravedad específica es la relación de la masa del agregado respecto a la masa de un volumen de agua igual al volumen del agregado. La gravedad específica (adimensional), se puede expresar como gravedad específica bruta (Gsb) y gravedad específica aparente (Gsa). El método de prueba ASTM C128 involucra la determinación de la densidad del agregado fino por dos métodos: gravimétrico y volumétrico; el método utilizado en esta tesis fue el gravimétrico.

El procedimiento para la ejecución de la prueba consiste en, primeramente, quitar el retenido de la malla No. 4 del material fino, la masa de la muestra deberá ser mínimo 1 kg. Posteriormente se

seca el material a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar una masa constante. Una vez que el material está seco se satura la muestra con al menos 6 % de agua y se permite reposar en un recipiente hermético por 24 ± 4 horas para evitar la pérdida de humedad. Después del tiempo transcurrido, se extiende la muestra en una superficie plana y se deja secar hasta que la muestra se aproxime a la condición saturada superficialmente seca (SSS).

La condición SSS se mide con la ayuda de un molde en forma de cono truncado y un pisón con dimensiones y pesos normados. Se sostiene el molde firmemente sobre la superficie lisa con el diámetro mayor hacia abajo y se vacía la muestra del agregado fino en el cono, hasta que sobresalga el nivel del molde. Con la ayuda del pisón se compacta el material fino dejándolo caer desde una altura de 5 mm con un total de 25 golpes, los cuales son equitativamente distribuidos en toda la superficie, se limpia el material suelto de la base del cono y se levanta el molde verticalmente. La condición saturada superficialmente seca (SSS) ocurre cuando existe una ligera caída de agregado de uno de los lados, conservando la altura inicial del molde (ver Ilustración IV-9 e Ilustración IV-10).

	
<i>Ilustración IV-9. Procedimiento de prueba para obtener la condición SSS.</i>	<i>Ilustración IV-10 Condición SSS del agregado fino. Fuente: Imagen capturada por el autor.</i>

Si no se obtiene una caída de material, se tiene exceso de humedad y se debe continuar secando. En cambio, si se obtiene una caída excesiva se debe agregar unos pocos mililitros de agua. Una vez obtenida la condición SSS, se toma una muestra de 500 ± 10 g y se coloca en el picnómetro. Se tapa el picnómetro y se agita por 20 minutos para eliminar burbujas de aire. Una vez eliminadas las burbujas, se llena el picnómetro con agua destilada hasta la marca de aforo y se registra el peso. Es necesario obtener el peso seco de la muestra, por lo cual, se retira la muestra del picnómetro en una charola y se coloca en el horno para ser secada a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar

una masa constante. Asimismo, se determina la masa del picnómetro lleno hasta la marca de calibración con agua destilada a una temperatura de 23 ± 2 °C.

Una vez obtenido los datos de la prueba se procede a realizar los cálculos para determinar la gravedad específica bruta, aparente y el porcentaje de absorción del agregado:

$$G_{sb} = \frac{A}{B + S - C} \quad (3)$$

Donde:

G_{sb} [adimensional] = Gravedad específica bruta. Reportar este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

S [g] = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

A [g] = Masa de la muestra seca al horno, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

B [g] = Masa del picnómetro con agua, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

C [g] = Masa del picnómetro con agua y muestra, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

$$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C} \quad (4)$$

Donde:

G_{sa} [adimensional] = Gravedad específica aparente. Reportar este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

$$Absorción (\%) = \frac{S - A}{A} * 100 \quad (5)$$

Equivalente de arena en el agregado fino (ASTM D2419)

El propósito de este método de prueba es para indicar bajo condiciones estándar las proporciones relativas de arcilla o finos plásticos respecto a polvos de suelos granulares en agregados finos que pasan la malla de 4.75 mm [No. 4].

Para la preparación de la muestra, se obtienen al menos 1500 g de material que pasa la malla 4.75 mm [No. 4], posteriormente se humedece el material lo suficiente hasta obtener la condición de humedad óptima, la cual se verifica haciendo un rollito en la mano, de tal manera que se permita su manejo sin romperse. Una vez obtenida la condición óptima, el material se cuarteo y con la ayuda de un medidor cilíndrico se recoge el material de lados opuestos y cruzados del cuarteo.

El procedimiento de ejecución de la prueba consiste en vaciar $4 \pm 0,1$ pulgadas de solución de trabajo por medio de un sifón a una probeta graduada. Seguidamente, se agrega la muestra en la probeta con la ayuda de un embudo, se debe golpear base de la probeta con movimientos energéticos para retirar las burbujas de aire atrapadas en la parte de abajo. La muestra se deja reposar durante 10 ± 1 minuto y a continuación se coloca en el agitador mecánico por 45 ± 1 segundo. Después, se inserta el tubo irrigador lentamente lavando el material de las paredes mientras el irrigador desciende, una vez que entra en contacto con el material se realizan ligeras punzadas girando el irrigador hasta tocar el fondo de la probeta. Lo anterior, se realiza para que el material arcilloso entre en suspensión con las partículas gruesas de arena. Se continúa lavando hasta que la probeta se llene a 15 pulgadas (38 cm) de la graduación. Una vez llenada, se toma el tiempo y se deja reposar por 20 minutos $\pm$ 15 segundos, transcurrido el tiempo se reposo se registra la lectura del nivel de arcilla (nivel superior) y de arena (nivel inferior) como se muestra en la Ilustración IV-12.

Para obtener el porcentaje del equivalente de arena se realiza de la siguiente manera:

Obtenidas las lecturas de nivel superior e inferior se calcula el valor de equivalente de arena con la siguiente ecuación:

$$E.A(\%) = \frac{A}{B} * 100 \quad (6)$$

Donde:

E.A [%] = Equivalente de arena. Reportar este valor como un número entero, redondeado al siguiente valor superior.

A [pulg] = Lectura de arena, con aproximación de 0.1 pulg (1 decimal).

B [pulg] = Lectura de arcilla, con aproximación de 0.1 pulg (1 decimal).



Ilustración IV-11. Probetas en reposo.



Ilustración IV-12. Lectura del ensayo equivalente de arena.

Azul de metileno en una arcilla (RA-05/2010)

Esta prueba determina la absorción de azul de metileno por una arcilla, la cual se calcula como el valor de azul de metileno (MBV). El índice de azul de metileno determina el grado de reactividad del material filler (pasa No. 200) que es utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas, el cual puede tener una influencia nociva en su desempeño.

Para la realización del ensayo se debe obtener material que pasa la malla de 0.075 mm [No. 200], se coloca $1.0 \pm 0.05 \text{ g}$ de la muestra en un vaso de precipitado de 100 ml y se añaden $30 \pm 0.1 \text{ g}$ de agua destilada en el vaso de precipitado, consecutivamente se agrega una barra magnética en el vaso que se coloca sobre la barra magnética por 5 minutos aproximadamente (ver Ilustración IV-13).

Transcurrido los 5 minutos, con la suspensión aún en agitación, se añade 1.0 ml de la solución de azul de metileno a la suspensión y se deja agitar durante 1 min , sin detener la agitación, se retira una gota de la suspensión con la punta de la varilla de vidrio y se coloca en el papel de filtro.

Se debe observar de la gota sobre el papel de filtro. Si la formación de un halo color azul claro alrededor de la gota no se observa, continuar agregando la solución de azul de metileno a la suspensión en incrementos de 1.0 ml con 1 min de agitación, y retirando una gota de la suspensión por cada incremento. La prueba terminará cuando se observe el halo azul alrededor de la gota.

El valor de azul de metileno (MBV) es equivalente a la cantidad de mililitros de solución de azul de metileno utilizados hasta su saturación (aparición del halo), y se reporta en miligramos de azul de metileno por gramo del material evaluado.

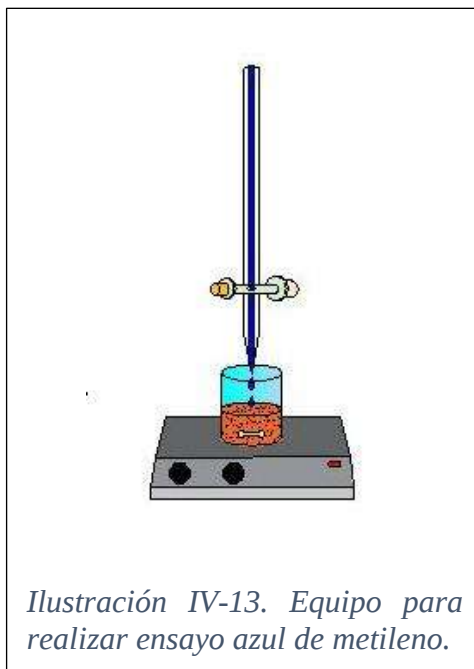
$$MBV = \frac{C_{sol}}{C_{filler}} \quad (7)$$

Donde: MBV [mg/g] = Valor de azul de metileno, con aproximación de 0.1 mg/g.

C_{sol} [mg] = Cantidad de azul de metileno necesario para alcanzar el punto final del ensayo.

C_{filler} [g] = Cantidad de material contenido en la suspensión.

Nota: El valor de azul de metileno se reporta en mg/g debido a que la solución se prepara con 1 g de azul de metileno por 1000 ml de agua, lo que equivale a 1 mg de azul de metileno por cada ml de agua. Por lo anterior, cada ml de solución contiene 1 mg de azul de metileno.



Contenido de vacíos no compactados en agregado fino (ASTM C1252-17)

Para la determinación del contenido de vacíos no compactados en una muestra de agregado fino se utilizó la metodología descrita en la normativa ASTM C1252. El contenido de vacíos provee un indicio de la angularidad, esfericidad y textura del agregado fino, comparado con otros a los mismos tamaños.

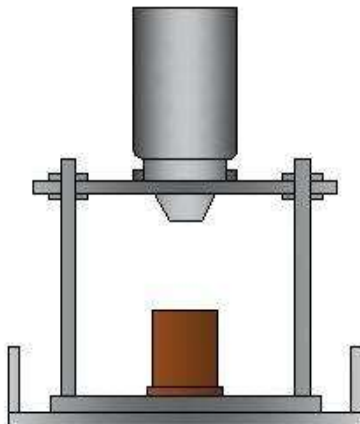
Para la selección de la muestra, existen tres métodos con tamaños y cantidades de masa diferentes. Cualquier método puede ser empleado, sin embargo, para la elaboración de esta tesis se utilizó el método A, por consiguiente, se utilizó la distribución que se muestra en la Tabla IV-2.

Tabla IV-2. Masa del agregado para ensayo de contenido de vacíos no compactos en agregado fino.

Tamaño de la fracción individual	Masa [g]
2.36 mm [No. 8] a 1.18 mm [No. 16]	44 ± 0.2
1.18 mm [No. 16] a 600 µm [No. 30]	57 ± 0.2
600 µm [No 30] a 300 µm [No. 50]	72 ± 0.2
300 µm [No. 50] a 150 µm [No. 100]	17 ± 0.2
Total	190 ± 0.2

Cabe mencionar que el material utilizado para la prueba debe ser lavado y secado en el horno por $4 \pm 0,5$ horas, para eliminar la posibilidad de perder material en el lavado y secado, se recomienda pesar aproximadamente 500 g de material que pasa la malla No. 8 y realizar el lavado y secado de dicho material; posteriormente se criba por las mallas requeridas y se procede a ejecutar la prueba.

Para la ejecución de la prueba se utiliza un medidor cilíndrico de cobre de aproximadamente 100 ml de capacidad con diámetro interior y altura de 39 mm y 86 mm, respectivamente. Asimismo, el dispositivo de medición cuenta con un embudo fijado a la placa base del equipo, como se muestra en Ilustración IV-14 e Ilustración IV-15. Posteriormente, se coloca el agregado en el embudo cubriendo la abertura de la parte inferior del mismo y el medidor cilíndrico se posiciona debajo del embudo para la libre caída del material. Después, se enrasa el exceso de agregado en un solo movimiento con la ayuda de una espátula. Se registra el peso del medidor con el material pétreo y el peso del medidor sin material. De la misma manera, se llena el medidor cilíndrico completamente con agua y se registra el peso de agua en el medidor.

 <i>Ilustración IV-14. Esquema del equipo utilizado para el ensayo de angularidad de los finos.</i>	 <i>Ilustración IV-15. Equipo y material para ensayo de contenido de vacíos no compactados en agregado fino.</i>
---	---

Para determinar el volumen del medidor cilíndrico se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1000 * M}{D} \quad (8)$$

Donde:

V [ml] = Volumen del medidor cilíndrico, con aproximación de 0.1 mL (1 decimal).

M [g] = Masa de agua neta, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

D [kg/m³] = Densidad del agua a la temperatura de prueba con aproximación de 0.1 kg/m³.

El cálculo del contenido de vacíos no compactados en el material (U) por medición se realiza haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$U_1 = \frac{V - (F/G)}{V} * 100 \quad (9)$$

Donde:

U [%] = Vacíos no compactados en el material, con aproximación de 0.1% (1 decimal).

V [mL] = Volumen del medidor cilíndrico, con aproximación de 0.1 mL (1 decimal).

F [g] = Masa del agregado fino, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

G = Gravedad específica del agregado fino, con aproximación de 0.1 (1 decimal).

Cabe mencionar que el método A requiere que la prueba se haga por duplicado y se realice un promedio de los vacíos no compactados en el material como se muestra a continuación:

$$U_s = \frac{U_1 + U_2}{V} * 100 \quad (10)$$

Donde:

Us [%] = Vacíos no compactados en el material, con aproximación de 0.1%.

U1 [%] = Medición #1 de los vacíos no compactados.

U2 [%] = Medición #2 de los vacíos no compactados

4.3.3. Ensayos para agregado grueso

Gravedad específica y absorción del agregado grueso (ASTM C127-15)

La gravedad específica (adimensional), se puede expresar como gravedad específica bruta (Gsb) y gravedad específica aparente (Gsa). La gravedad específica de agregado es la relación de la masa del agregado respecto a la masa de un volumen de agua igual al volumen del agregado.

El tamaño mínimo de la muestra depende del tamaño nominal del agregado, como se muestra en la Tabla IV-3. Tamaño de muestra para ensayo de densidad y absorción del agregado grueso., es importante mencionar que, mediante un procedimiento de tamizado se desecha el porcentaje de material que pasa la malla No. 4 de la muestra.

Tabla IV-3. Tamaño de muestra para ensayo de densidad y absorción del agregado grueso.

Tamaño nominal, mm [pulg]	Masa mínima de la muestra, g
12.5 [½]	2 000
19.0 [¾]	3 000
25.0 [1]	4 000
25.0 [1]	5 000

Una vez obtenida la muestra, se debe lavar para eliminar el polvo adherido al agregado grueso y se seca en un horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar una masa constante. Una vez seca, se deja enfriar por una hora a temperatura ambiente y se rectifica que la masa de la muestra siga cumpliendo con la masa mínima especificada en la tabla anterior.

Para la ejecución de la prueba se sumerge la muestra en agua por un periodo de 24 ± 4 horas con la finalidad de saturar los poros del agregado. Transcurrido el tiempo de saturación, se retira la muestra y se seca hasta lograr la condición saturada superficialmente seca (SSS). Para lograr la condición SSS, envolver la muestra en una franela grande, girándola, hasta que toda la película de agua exterior sea removida y secar las partículas grandes individualmente. Cabe señalar que hay que tener cuidado de evitar la evaporación del agua de los poros del agregado durante el proceso de secado superficial. Una vez obtenida la condición SSS, se coloca el agregado sobre la balanza y se registra la masa de la muestra. Para determinar la masa aparente del agregado, se coloca la muestra en una canastilla y se sumerge en un baño de agua a una temperatura de 23 ± 2 °C y se registra la masa aparente del agregado saturado en agua (sumergido).

Finalmente se debe secar la muestra en un horno a masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C. Una vez seca la muestra, dejar enfriar a temperatura ambiente de 1 a 3 horas, hasta alcanzar una temperatura que sea manejable (aproximadamente 50 °C), para registrar el peso seco del agregado.

A continuación, se muestran las fórmulas para determinar la gravedad específica bruta, aparente y absorción del agregado:

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C} \quad (11)$$

Donde: G_{sb} [adimensional] = Gravedad específica bruta. Reportar este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

A [g] = Masa de la muestra seca al horno, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

B [g] = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

C [g] = Masa de la muestra sumergida en agua, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C} \quad (12)$$

Donde:

Gsa [adimensional] = Gravedad específica aparente. Reportar este valor con aproximación de 0.001 (3 decimales).

$$Absorción (\%) = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (13)$$

Resistencia a la degradación del agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles (ASTM C131-14)

El ensayo en la máquina de Los Ángeles es un procedimiento para ensayar partículas de agregado gruesos con un tamaño máximo menor a 37.5 mm [1 1/2"], para evaluar su resistencia a la degradación utilizando la Máquina de Los Ángeles. Se utiliza como un indicador de la tenacidad del material para resistir el impacto de las cargas durante la fabricación, tendido y compactación de la mezcla.

La máquina de Los Ángeles consta de un cilindro montado en ejes cortos, de tal manera que le permita girar sobre el eje en una posición horizontal dentro de una tolerancia de 1 en 100 sobre la pendiente. Cuenta con una tapa hermética para contener el polvo y con tornillos para asegurar la tapa. La tapa está diseñada de tal manera que se mantenga el contorno cilíndrico de la superficie interior. Todas las dimensiones para el diseño de la máquina vienen estipuladas en la norma ASTM C131-14.

Es importante mencionar que la degradación del agregado grueso se realiza mediante una carga abrasiva, que consiste en esferas de acero con un diámetro de 46 a 48 mm y cada una con una masa de 390 a 445 g. La masa de la carga abrasiva dependerá de la granulometría elegida a ensayar de acuerdo con Tabla IV-4.

En la siguiente tabla, se muestra el número de esferas y masa de la carga abrasiva que corresponde utilizar de acuerdo con la granulometría que se ensayará:

Tabla IV-4. Carga abrasiva de acuerdo con el método de ensayo seleccionado.

Granulometría	Número de esferas	Masa de la carga abrasiva [g]
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2 500 ± 15

El procedimiento de prueba consiste en obtener la muestra conforme y separar las fracciones individuales por tamaño, y recombinar de acuerdo con la granulometría elegida de la Tabla IV-5. Cabe mencionar que, se recomienda utilizar las granulometrías “A” y “B” para mezclas asfálticas estructurales; y las granulometrías “C” y “D” para tratamientos superficiales.

Tabla IV-5. Masa de prueba conforme la granulometría del material pétreo para ensayo Desgaste de los Ángeles.

Abertura de malla		Masa de cada fracción [g] Granulometría			
Pasa	Retenido	A	B	C	D
37.5 mm [1 1/2"]	25.0 mm [1"]	1 250 ± 25			
25.0 mm [1"]	19.0 mm [3/4"]	1 250 ± 25			
19.0 mm [3/4"]	12.5 mm [1/2"]	1 250 ± 25	2 500 ± 10		
12.5 mm [1/2"]	9.5 mm [3/8"]	1 250 ± 25	2 500 ± 10		
9.5 mm [3/8"]	6.3 mm [1/4"]			2 500 ± 10	
6.3 mm [1/4"]	4.75 mm [No. 4]			2 500 ± 10	
4.75 mm [No. 4]	2.36 mm [No. 8]				5 000 ± 10
	Total	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Una vez seleccionado elegida la granulometría de prueba, se lava y se seca el agregado a masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C, subsiguientemente se coloca la muestra de ensayo y la carga abrasiva en la máquina de Los Ángeles y se hace girar el tambor a una velocidad de 30 a 33 rpm durante 500 revoluciones. Una vez que la prueba es concluida, se retira el material del tambor

y se criba por la malla No. 12. Todo el material que pasa por la malla No. 12 se desecha, en cambio, el que se retiene se lava y se seca a masa constante en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C. Finalmente se registra la masa de la muestra final.

El cálculo del desgaste por abrasión en la máquina de Los Ángeles se realiza aplicando la siguiente formula:

$$\text{Desgaste de Los Angeles (\%)} = \frac{C - Y}{C} * 100 \quad (14)$$

Donde:

Desgaste de Los Ángeles [%] = Desgaste por abrasión en Maquina de Los Ángeles, con aproximación de 1 % (sin decimales).

C [g] = Masa de la muestra inicial, con aproximación de 1.0 g (sin decimales).

Y [g] = Masa de la muestra final, con una aproximación de 1.0 g (sin decimales).

Resistencia a la degradación del agregado grueso por abrasión en la máquina Micro-Deval (ASTM D6928-17)

Este método de prueba cubre un procedimiento que tiene como objetivo determinar la resistencia por abrasión y durabilidad del agregado pétreo en presencia de agua utilizando la máquina Micro-Deval. También es útil para detectar cambios en las propiedades del agregado como parte de control o garantía de calidad del agregado.

Para el procedimiento de prueba se debe obtener una muestra del material, la cual se lava y seca a masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C. El arreglo granulométrico de la muestra está en función del tamaño nominal del agregado grueso (ver Tabla IV-6), para el trabajo en estudio se tiene un tamaño nominal de 12.5 mm [1/2"], por lo cual la muestra deberá consistir en material que pasa el tamiz de 12.5 mm [1/2"] y se retiene en el tamiz de 4.75 mm [No. 4]. Una muestra seca al horno de 1500 ± 5 g deberá ser separada como sigue:

Tabla IV-6. Granulometría para ensayo Microdeval.

Pasa	Retiene	Masa
9.5 mm [3 /8"]	6.3 mm [1 /4"]	750 g

Pasa	Retiene	Masa
6.3 mm [1 /4"]	4.75 mm [No. 4]	750 g
	Total	1 500 ± 5 g

La ejecución de la prueba consiste en registrar la masa seca inicial de la muestra (A), posteriormente sumergirla en el contenedor con 2.0 ± 0.05 L de agua a una temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ por un mínimo de 1 hora, se coloca la carga abrasiva de $5\,000 \pm 5$ g dentro del contenedor con la muestra y el agua (ver Ilustración IV-16, Ilustración IV-17 e Ilustración IV-18). Transcurrido el tiempo antes mencionado se procede a colocar los contenedores en la Máquina Micro-Deval a 100 ± 5 rpm un tiempo de 105 ± 1 min para la combinación del punto de agregados con tamaño nominal de 12.5 mm [1/2"].



Al finalizar el ensayo, se vierte el agregado y la carga abrasiva, sobre las mallas No. 4.75 mm [No. 4] superpuesta sobre el tamiz de 1.18 mm [No. 16]. Posteriormente se lavan ambas mallas con una manguera hasta que se observe el agua totalmente clara. Se retiran los balines con apoyo de un imán; el material retenido en ambas mallas se combina y se pone a secar a masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y se registra la masa final (B).

Para el cálculo del desgaste por abrasión en presencia de agua en la Máquina Micro - Deval, se hace con la siguiente ecuación:

$$\text{Desgaste Microdeval (\%)} = \frac{A - B}{A} \quad (15)$$

Donde:

Desgaste Micro-Deval [%] = Desgaste por abrasión en agua en la Máquina Micro - Deval, con aproximación de 0.1 % (1 decimal).

A [g] = Masa inicial de la muestra, con aproximación de 1.0 g (sin decimales).

B [g] = Masa final de la muestra, con aproximación de 1.0 g (sin decimales).

Resistencia al intemperismo acelerado de los agregados (ASTM C88-17)

El objetivo de este método es determinar la degradación esperada por Intemperismo en materiales pétreos por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

El método ASTM C88 involucra la determinación del porcentaje de Intemperismo por dos métodos: determinación por masa (examinación cuantitativa) y determinación por inspección de fallas (examinación cualitativa). En el procedimiento aplicado para la caracterización de los materiales en estudio, únicamente se hace referencia a la examinación cuantitativa.

En esta investigación para la evaluación de resistencia al intemperismo acelerado de los agregados se utilizó sulfato de sodio. Para ello, se prepara la solución con 48 horas de anticipación agregando 350 g de sal anhidra (Na₂SO₄) y 1 litro de agua.

La prueba se puede llevar a cabo con agregado fino o agregado grueso como se muestra en la Tabla IV-7 y Tabla IV-8.

Tabla IV-7. Tamaños de la muestra de agregado fino para ensayo de Intemperismo Acelerado.

Pasa el tamiz	Retenido en el tamiz
9.50 mm [3 /8"]	4.75 mm [No. 4]
4.75 mm [No. 4]	2.36 mm [No. 8]
2.36 mm [No. 8]	1.18 mm [No. 16]
1.18 mm [No. 16]	600 µm [No. 30]
600 µm [No. 30]	300 µm [No. 50]

Tabla IV-8. Masa de material para ensayo Intemperismo Acelerado para agregado grueso.

Granulometría	Pasa	Retiene	Masa [g]
A	63.0 mm [2 1/2"]	50.0 mm [2"]	3 000 ± 300
	50.0 mm [2"]	37.5 mm [1 1/2"]	2 000 ± 200
		Total	5 000 ± 300
B	37.5 mm [1 1/2"]	25.0 mm [1"]	1 000 ± 50
	25.0 mm [1"]	19.0 mm [3/4"]	500 ± 30
		Total	1 500 ± 50
C	19.0 mm [3/4"]	12.5 mm [1/2"]	670 ± 10
	12.5 mm [1/2"]	9.5 mm [3/8"]	330 ± 5
		Total	1 000 ± 10
D	9.5 mm [3/8"]	4.75 mm [No. 4]	330 ± 5
		Total	330 ± 5

La fracción de material seleccionada debe ser representativa del banco de material en uso. Una vez seleccionado el agregado y las fracciones de este, se lava y se seca a masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C. Posteriormente, se sumergen las muestras en la solución preparada de sulfato de sodio o magnesio por un mínimo de 16 horas y no más de 18 horas (ver Ilustración IV-19. Muestra después de 18 horas con sulfato de sodio. , de tal manera que la solución cubra el agregado al menos 13 mm a una temperatura de 21 ± 1 °C.

Después del periodo de inmersión, se retiran las muestras de agregado de la solución y se escurren por 15 ± 5 min. Se secan a masa constante en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C y posteriormente se dejan enfriar las muestras a temperatura ambiente. Se repite el proceso de inmersión y secado hasta completar 5 ciclos. Un ciclo se considera como la inmersión del agregado en la solución de saturación y su posterior secado a masa constante.

Al finalizar el quinto ciclo y que las muestras se han enfriado, se lava el material dentro de los contenedores con agua circulando a una temperatura de 43 ± 6 °C, para eliminar la solución de saturación (sulfato de sodio o de magnesio); consecutivamente se secan las muestras en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta obtener una masa constante.

Una vez que el material se ha secado a masa constante se criba por las mallas descritas en la Tabla IV-9 en función del tamaño del agregado seleccionado para la prueba.



Ilustración IV-19. Muestra después de 18 horas con sulfato de sodio.

Tabla IV-9. Mallas por las cuales debe cribarse el material después de los 7 ciclos conforme la granulometría.

Tamaño del agregado	Tamiz utilizado
63.0mm a 37.5mm	31.5mm [1 1/4"]
37.5mm a 19.0mm	16.0mm [5/8"]
19.0mm a 9.5mm	8.0mm [5/16"]
9.5mm a 4.75mm	4.0mm [No. 5]

Una vez concluida la prueba el valor de intemperismo acelerado se obtiene con siguiente cálculo:

$$I (\%) = \frac{A - B}{A} \quad (16)$$

Donde:

I [%] = Porcentaje de intemperismo acelerado. Reportar con una precisión de 1.0 % (sin decimales).

A [g] = Masa de la muestra inicial, con aproximación de 1.0 g (1 decimal).

B [g] = Masa de la muestra final, con aproximación de 1.0 g (1 decimal).

Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso (ASTM D5821-13)

Este método tiene el objetivo de determinación, por masa, del porcentaje de partículas fracturadas en una muestra de agregado grueso. contar con un alto contenido de partículas fracturadas es de gran importancia ya que maximiza la resistencia al corte incrementando la fricción interna entre partículas en mezclas de agregados ligados o no ligados.

El procedimiento de prueba consiste primeramente en tamizar una muestra del material por la malla de 4.75 mm [No. 4], la cantidad de material retenido será el utilizado para la evaluación de caras fracturadas. El tamaño de la muestra depende del tamaño nominal del material, en estudio el tamaño nominal del agregado grueso corresponde a 12.5 mm [1/2"], por lo tanto, la masa mínima requerida es de 500 g que comprenden tamaños de 4.75 mm a 12.5 mm.

Habiéndose obtenido la muestra se procede a la ejecución de la prueba, se lava la muestra sobre el tamiz designado para retirar cualquier material fino y se deja secar a masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C, posteriormente se registra la masa de la muestra seca (A), luego se procede a extender la muestra seca sobre una superficie plana, limpia y suficientemente grande para permitir una inspección cuidadosa de cada una de las partículas. Para verificar que la partícula cumple con los criterios de fractura, sostener la partícula de manera que la cara sea vista directamente. Si la cara constituye al menos un cuarto (25 %) del área de la sección transversal máxima de la partícula del agregado, considerarla una cara fracturada.

Se inspecciona cada cara de cada partícula para determinar si cada cara cumple con el criterio de cada fracturada, subsiguientemente las partículas se separan en tres categorías: partículas con dos o más caras fracturadas, partículas con una cara fracturada y partículas sin caras fracturadas. De las cuales se debe determinar la masa, de las partículas que tengan dos o más caras fracturadas (F) y de las partículas que tengan una cara fracturada (U).

Finalmente se procede a la realización de cálculos, para las partículas con dos o más caras fracturadas y las partículas que tengan una cara fracturada, con las siguientes formulas:

$$P_2 = \frac{F}{F + U + N} * 100 \quad (17)$$

$$P_1 = \frac{U}{F + U + N} * 100 \quad (18)$$

Donde:

P2 [%] = Porcentaje de partículas con dos o más caras fracturadas. Reportar este valor con aproximación de 1 % (entero).

P1 [%] = Porcentaje de partículas con una cara fracturada. Reportar este valor con aproximación de 1 % (entero).

F [g] = Masa de las partículas con dos o más caras fracturadas, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

U [g] = Masa de las partículas con una cara fracturada, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

N [g] = Masa de las partículas sin caras fracturadas, con aproximación de 0.1 g (1 decimal).

Porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso (ASTM D4791-10)

La forma de la partícula es un parámetro que influencia las propiedades de desempeño de la mezcla asfáltica, por lo que, para un comportamiento adecuado, se busca contar con partículas esféricas y evitar las partículas planas y alargadas debido a que pudieran presentar tendencia a fracturarse durante la construcción y bajo la acción del tránsito.

El método de prueba descrito en la normativa internacional **ASTM D4791** se basa en el uso de un dispositivo proporcional calibrados, el cual consiste en una placa base con dos postes fijos y un brazo libre montado entre ellos, de tal manera que, las aberturas entre los brazos y los postes mantengan una relación constante (ver Ilustración IV-20. Esquema de dispositivo calibrador. La posición del eje se puede ajustar para proporcionar la relación deseada de dimensiones de apertura, las relaciones que se pueden considerar son: 1:2, 1:3 y 1:5.

La masa mínima de la muestra de ensayo deberá ser conforme al tamaño nominal del agregado como se indica en la Tabla IV-10.

Tabla IV-10. Masa de la muestra para ensayo de partículas alargadas y lajeadas.

Tamaño nominal	Masa mínima de ensayo [g]
99.5 mm [3 /8 "]	1 000
12.5 mm [½"]	2 000
19.0 mm [¾"]	5 000
25.0 mm [1"]	10 000
37.5 mm [1 ½"]	15 000

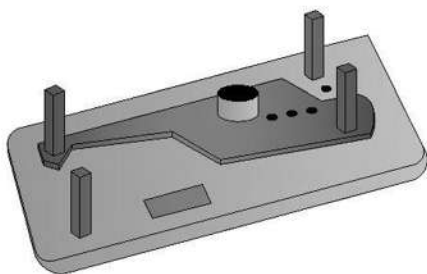


Ilustración IV-20. Esquema de dispositivo calibrador.



Ilustración IV-21. Ejecución de ensayo forma de la partícula.

Una vez obtenida la muestra se lava y se seca en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante, registrándose la masa de la muestra total (A) con aproximación de 0.1 g. Posteriormente, se tamiza la muestra por los tamaños: 37.5 mm [1 1 /2"], 25.0 mm [1"], 19.0 mm [3 /4"], 12.5 mm [1 /2"], 9.5 mm [3 /8"] y 4.75 mm [No. 4]. Se registra la masa retenida en cada tamiz (B) con aproximación de 0.1 g; consecuentemente se calcula el porcentaje retenido parcial de cada fracción (C) con aproximación de 0.1 %. Si el porcentaje retenido parcial de alguna fracción es menor al 10%, ésta se puede descartar para ser ensayada.

Para la ejecución de la prueba se evalúa cada una de las partículas por fracción y se identifican sus dimensiones: largo (la mayor dimensión de la partícula), ancho (la dimensión intermedia de la partícula) y espesor (la menor dimensión de la partícula). Seleccionamos la relación que se desea utilizar (1:2, 1:3 o 1:5), una vez seleccionada, se coloca el largo de la partícula en la abertura más

grande del calibrador y después se pasa el espesor de la misma partícula por la abertura más pequeña. La partícula se considera plana y alargada si el espesor pasa completamente a través de la abertura más pequeña del calibrador

Posteriormente, se separan las partículas por fracción en dos grupos: (1) planas y alargadas o (2) ni planas ni alargadas y se determina la masa de cada grupo. Después de que las partículas han sido clasificadas dentro de los grupos descritos como: (1) plana y alargada o (2) ni plana ni alargada, determinamos la masa de cada grupo, por fracción.

Desprendimiento por fricción (Recomendación AMAAC RA 08/2010)

El objetivo de esta prueba es determinar la pérdida de la película asfáltica en los materiales pétreos. En ensayo consiste en someter una muestra de mezcla asfáltica a la acción del agua y a varios ciclos de agitado dentro de un frasco de vidrio. Por otro lado, esta prueba permite evaluar la efectividad y beneficio de los aditivos promotores de adherencia.

Para la preparación de la muestra, se separa el material que pasa la malla 9.5 mm [3/8"] y retiene la malla 6.3 mm [1/4"], se lava y se pesa a masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C. De la muestra obtenida se separan dos porciones de 50 g cada una. El asfalto por utilizar se calienta en un vaso de aluminio a una temperatura de 135 ± 5 °C. Cada porción de 50 g de material pétreo será mezclada con 2.5 g de asfalto.

Una vez que los materiales se encuentran con la temperatura indicada, se procede a mezclar el asfalto con el agregado cuidadosamente, manipulándose la mezcla con una espátula a fin de maximizar el recubrimiento de asfalto al agregado. Con el objetivo de facilitar el recubrimiento, se ingresa la muestra al horno, se mezcla hasta que la temperatura del asfalto lo permita y se repite el ciclo, hasta obtener un buen recubrimiento.

Después, se deja enfriar a temperatura ambiente cada una de las dos porciones, extendiendo la mezcla, de modo que las partículas puedan estar separada entre sí. Se ingresa cada una de las muestras a un frasco de vidrio junto con 200 ml de agua pura o destilada a 25 ± 3 °C y se dejan reposar por un periodo de 15 horas.

Culminadas las 15 horas, se extrae el agua, se separan cuidadosamente las partículas, se agregan otros 200 ml de agua a 25 ± 3 °C, se instalan en el agitador mecánico y se someten a un periodo de agitación de 3 horas.

Finalizado el periodo de agitación se extraen las partículas, se dejan secar y se evalúa visualmente el desprendimiento de la película de asfalto de cada una de las partículas. Se clasifica cada una de las partículas con un desprendimiento por fricción de 0,10,20,30 %, sucesivamente hasta el 100 %, representando 0 como no desprendimiento y 100 % como desprendimiento total. El resultado final se reporta como un promedio de desprendimiento de todas las partículas examinadas, como se muestra a continuación:

$$P_{FR} = \frac{(0 + n_0) + (10 + n_{10}) + (20 + n_{20}) + \dots (100 + n_{100})}{N} \quad (19)$$

Donde:

PF R [%] = Pérdida por fricción promedio redondeado al número entero superior, expresado en por ciento (%).

$n_{0,10,20,\dots,100}$ = Es el número de partículas con 0,10, 20...,100 % de desprendimiento por fricción.

N = Número de partículas total examinadas

4.3.4. Caracterización del material asfáltico

El asfalto base utilizado en este trabajo corresponde a un asfalto clasificado por grado de desempeño como PG 64 -22, procedente de la refinería de Salamanca, Guanajuato, México, el cual también se utilizó como base para ser modificado con un polímero RET, de igual forma se modificó con un aditivo de mezcla tibia.

Tanto el asfalto PG 64-22 como los dos asfaltos modificados se caracterizaron conforme la normativa mexicana N·CMT·4·05·004/18 titulada “Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG)”, la cual fue emitida en el año 2018 y sigue vigente hasta el presente año (2023).

De acuerdo con la norma se ejecutan pruebas que representan tres etapas de envejecimiento del asfalto, siendo estas: etapa original, posteriormente se envejece el asfalto en RTFO y por último el envejecimiento a largo plazo, representado en el laboratorio después del envejecimiento en el PAV.

4.3.4.1. Asfaltos modificados

En este trabajo se utiliza un asfalto convencional PG 64-22, el cual sirvió de base para la modificación de asfalto con polímero para obtener un asfalto 82E-22, asimismo, se utilizó como base para ser modificado con un aditivo orgánico denominado TB-1, ablandador de compactación, utilizado para modificar asfaltos convencionales que se emplearan para la producción de mezclas asfálticas tibias.

4.3.4.2. Evaluación del cemento asfáltico en fase original

La evaluación del cemento asfalto se refiere a la evaluación del asfalto recién obtenido de refinería, sin haber tenido ningún tipo de envejecimiento forzado. Para esta etapa, se evalúan pruebas físicas/empíricas como: punto de inflamación, viscosidad rotacional, punto de reblandecimiento, separación anillo y esfera, penetración y recuperación elástica por torsión; realizándose estas dos últimas solamente para asfaltos modificados. Asimismo, se evalúan propiedades reológicas: módulo reológico de corte dinámico y su respectivo ángulo fase, ambos a la temperatura evaluada.

A continuación, se detalla brevemente cada una de las pruebas correspondientes a esta etapa.

Punto de inflamación Cleveland (ASTM D8254-19).

El punto de inflamación es una medida de la tendencia de la muestra de ensayo a formar una mezcla inflamable con el aire en condiciones controladas de laboratorio. Es solo una de una serie de propiedades que deben tenerse en cuenta al evaluar el peligro de inflamabilidad general de un material. El método de prueba describe la determinación del punto de inflamación y el punto de ignición del asfalto mediante un aparato de copa abierta Cleveland manual o un aparato de copa abierta Cleveland automatizado.

Para la ejecución del ensayo, se llenan aproximadamente 50 ml de la muestra asfalto en una copa de prueba que se ha preparado previamente para ejecutar el procedimiento de prevención de la piel (ver Ilustración IV-22. Ejecución de prueba puto de inflamación Cleveland. La temperatura de la muestra de ensayo aumenta rápidamente al principio y luego a una velocidad constante más lenta a medida que se acerca al punto de inflamación. A intervalos específicos, se pasa una llama de prueba a través de la copa. El punto de inflamación es la temperatura más baja del líquido a la cual la aplicación de la llama de prueba hace que se enciendan los vapores del espécimen de prueba de la muestra. Para determinar el punto de ignición, la prueba continúa hasta que la aplicación de la

llama de prueba hace que la muestra de prueba se encienda y mantenga la combustión durante un mínimo de 5s (ASTM Standard , 2019).



Ilustración IV-22. Ejecución de prueba puto de inflamación Cleveland.

🔍 **Viscosidad Rotacional Brookfield (ASTM D 4402-15 (2022)).**

Este método de prueba describe un procedimiento para medir la viscosidad aparente del asfalto de 38 a 260 °C [100 a 500 °F] utilizando un viscosímetro rotacional y una cámara térmica de temperatura controlada para mantener la temperatura de prueba. Este ensayo se usa para medir la viscosidad aparente de los asfaltos a las temperaturas de manejo, mezclado o aplicación.

Se usa un viscosímetro rotacional, para medir la viscosidad aparente del asfalto a temperaturas elevadas. El torque en el aparato de medición, gira en un porta muestras controlado termostáticamente que contiene una muestra de asfalto, se usa para medir la resistencia relativa a la rotación. El torque y la velocidad se utilizan para determinar la viscosidad del asfalto en pascales segundos, milipascales - segundos o centipoise (ASTM Standars , 2022).

🔍 **Punto de reblandecimiento (ASTM D 36-14 (2022)).**

Los asfaltos son materiales viscoelásticos sin puntos de fusión claramente definidos; gradualmente se vuelven más suaves y menos viscosos a medida que aumenta la temperatura. Por esta razón, los puntos de reblandecimiento deben determinarse mediante un método arbitrario y bien definido para que los resultados sean reproducibles. El punto de reblandecimiento es útil en la clasificación

de asfaltos, como un elemento para establecer la uniformidad de los envíos o fuentes de suministro, y es indicativo de la tendencia del material a fluir a temperaturas elevadas encontradas en servicio.

Este método de prueba cubre la determinación del punto de reblandecimiento del asfalto en el rango de 30 a 157 °C [86 a 315 °F] utilizando el aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada [30 a 80 °C] o USP glicerina (por encima de 80 a 157 °C) (ASTM Standards, 2020).

El procedimiento de prueba consiste en colocar dos discos horizontales de asfalto, fundidos en anillos de latón con reborde, se calientan a una velocidad controlada en un baño líquido mientras cada uno sostiene una bola de acero. El punto de reblandecimiento se expresa como la media de las temperaturas a las que los dos discos se reblandecen lo suficiente como para permitir que cada bola, cubierta en asfalto, caiga una distancia de 25 mm [1,0 pulg.], como se aprecia en la Ilustración IV-23.

Separación por anillo y esfera (ASTM D 7173-20).

Este ensayo describe un procedimiento de laboratorio para determinar la tendencia del polímero a separarse del asfalto modificado con polímero en condiciones de almacenamiento con calor estático. Los resultados de las pruebas en material preparado de acuerdo con esta práctica pueden usarse como guía al formular productos o para establecer procedimientos de manejo en campo. Las grandes diferencias en los resultados de las pruebas entre las muestras superiores e inferiores indican que existe un grado de incompatibilidad entre el polímero y el asfalto base.

Los compradores de asfalto modificado con polímeros necesitan pautas sobre los procedimientos adecuados de almacenamiento y manipulación para mantener la integridad del material que han comprado. Por lo tanto, esta prueba proporciona una herramienta importante para comprender las características de estos materiales, así como para comparar varias fuentes de suministro.

El procedimiento de prueba consiste en colocar una cantidad medida de asfalto modificado con polímeros en un tubo de aluminio sellado, con el que se observa en la Ilustración IV-24, se acondiciona en posición vertical durante 48 h a una temperatura de 163 ± 5 °C. Al final del período de acondicionamiento, las porciones superior e inferior se separan y se someten a más pruebas para determinar el grado de separación. Las pruebas elegidas para este fin dependen del sistema de modificación de polímeros que se evalúe y del tipo de información deseada por el usuario (ASTM Standard , 2020).



Ilustración IV-23. Equipo utilizado para ensayo de reblandecimiento y separación anillo y esfera.

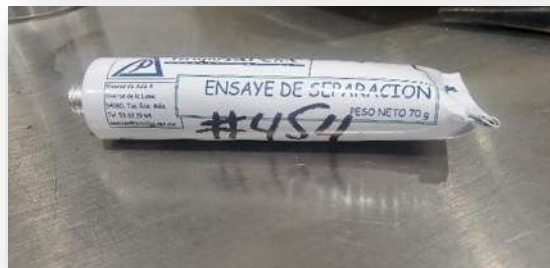


Ilustración IV-24. Tubo de aluminio con muestra para ensayo de separación anillo y esfera.

➤ Recuperación elástica por torsión (M·MMP·4·05·022/02).

Esta prueba determina la capacidad de recuperación elástica de los materiales asfálticos modificados. La prueba consiste en inducir una deformación angular mediante un cilindro de acero de dimensiones específicas, embebido en una muestra de cemento asfáltico modificado, con el objeto de observar su capacidad de recuperación a dicho esfuerzo (ver Ilustración IV-25).

La prueba de recuperación elástica por torsión tiene una relación directa con la cantidad de polímero en el asfalto. Es decir, si la cantidad de polímero aumenta, también la recuperación elástica del mismo.



Ilustración IV-25. Equipo utilizado para ensayo de recuperación elástica por torsión.

➤ Penetración (ASTM D 5M-19 & M·MMP·4·05·006/00).

Esta prueba determina la penetración de materiales asfálticos semisólidos y sólidos. El proceso de prueba consiste en calentar el asfalto en horno para poder vaciar en el contenedor utilizado para el

ensayo, se enfría la muestra en condiciones controladas (25°C), posteriormente se mide en décimas de milímetros la penetración con un penetrómetro, por medio de una aguja estándar que penetra verticalmente la muestra de cemento asfáltico. La prueba de penetración se utiliza como medida de consistencia. Los valores más altos de penetración indican una consistencia más suave (ASTM Standards, 2020).

Módulo reológico de corte dinámico y ángulo fase (ASTM D 7175- 15).

Estas pruebas están diseñadas para determinar las propiedades viscoelásticas lineales de los aglutinantes asfálticos según lo requerido para las pruebas de especificación.

La viscosidad depende tanto de la temperatura del asfalto como de las características de flujo (la facilidad con que las moléculas fluyen unas sobre otras). A altas temperaturas, el asfalto es un material viscoso y se comporta como un líquido pegajoso. Cuando algo lo obliga a moverse, no vuelve a su forma original. Esta es la razón por la que aparece ahuellamiento en el pavimento cuando hace calor.

A bajas temperaturas el asfalto es más elástico. Cuando se ve obligado a moverse, intenta volver a su forma original. El asfalto frío no puede aliviar las tensiones fluyendo, por lo que las tensiones acumuladas por las cargas de tráfico y los cambios de temperatura provocan grietas térmicas y fallas por fatiga. Es por eso por lo que el asfalto se agrieta cuando hace frío. A temperaturas intermedias, el asfalto y las mezclas de pavimentación tienden a presentar ambos comportamientos (elástico y viscoso). El reómetro de corte dinámico (DSR) se utiliza para medir estas propiedades; mediante la medición del módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) de los ligantes asfálticos.

El módulo de corte complejo es un indicador de la rigidez o resistencia del ligante asfáltico a la deformación bajo carga. El módulo de corte complejo y el ángulo de fase definen la resistencia a la deformación por corte del ligante asfáltico en la región viscoelástica lineal.

La prueba del DSR, la teoría detrás de ella y los cálculos son bastante complejos. La prueba consiste en colocar una capa de asfalto entre dos discos redondos y torcer uno de los discos (siendo el disco inferior el disco fijo y el superior el móvil), esto obliga a la muestra a moverse. Cuanto menos se mueve, más elástica es y cuanto mayor es el lapso entre el momento en que se aplica la carga y el momento en que la muestra comienza a moverse, más viscosa es.

En la Ilustración IV-26, se muestra el esquema de los discos o platos utilizados para realizar las pruebas en el DSR, para asfalto en original y después del envejecimiento en RTFO se utilizan los platos de 25 mm y para asfalto después de envejecimiento en PAV los platos de 8 mm.

La prueba del reómetro de corte dinámico se utiliza para evaluar las características de respuesta de carga de antes de acondicionar el aglutinante como medida de la consistencia del aglutinante. En el estado no acondicionado, la prueba DSR se realiza a la temperatura nominal superior del aglutinante, por ejemplo, para un aglutinante PG 64-22, la prueba se realiza a 64 ° C (ASTM Standard , 2015).

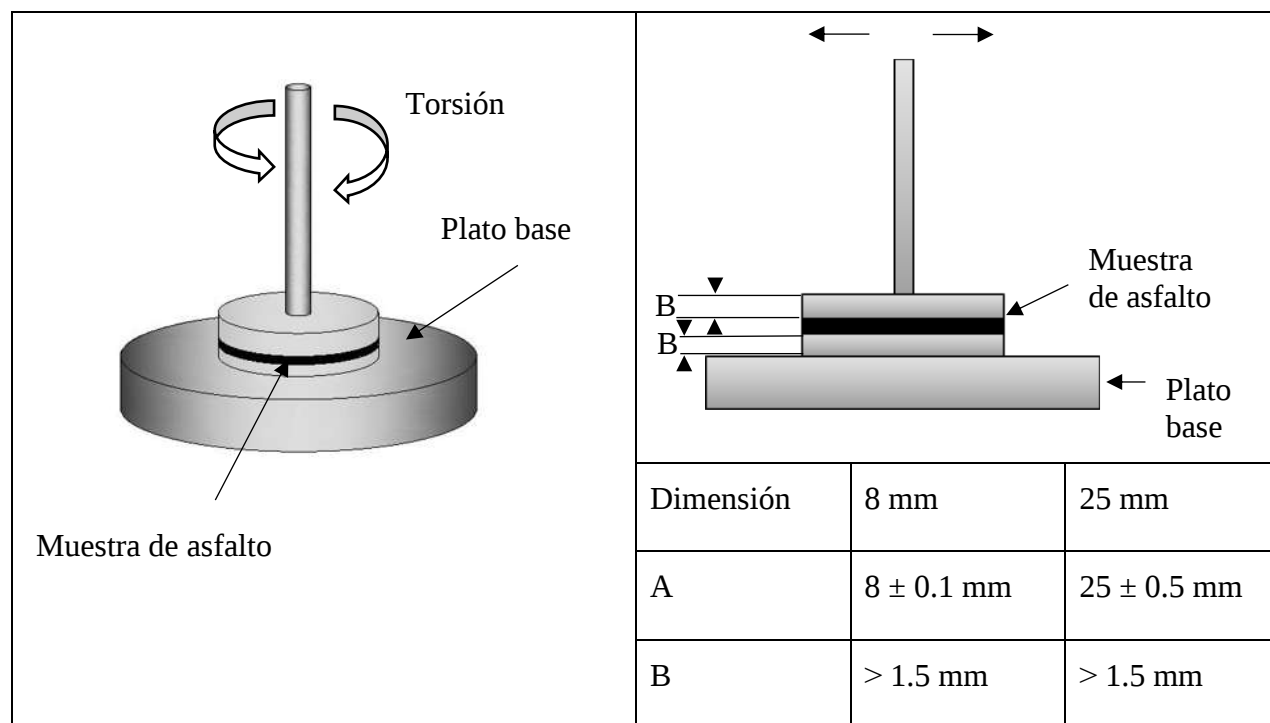


Ilustración IV-26. Dimensiones de los platos de prueba utilizados para ensayos en DSR.

4.3.4.3. Evaluación del cemento asfáltico después de RTFO

El envejecimiento del asfalto en el equipo RTFO por sus siglas en ingles “Rolling Thin Film Oven” (ver Ilustración IV-27) simula en el laboratorio el endurecimiento que tiene lugar durante la mezcla y el transporte al lugar de trabajo. Para ejecutar la prueba se vierten $35 \pm 0,5$ g de asfalto en botellas que posteriormente se coloca en el horno giratorio de película delgada (RTFO) durante 85 minutos a 325 °F (163 °C). La rotación esparce el asfalto en una película delgada, similar a la capa de asfalto en el agregado. Durante este proceso, se inyectan ráfagas de aire comprimido en las botellas a medida que giran. La rotación también ayuda a mantener en suspensión los aditivos del asfalto.

Al final de la prueba, el asfalto debe tener aproximadamente la misma consistencia que tendría cuando se entrega al lugar de trabajo.

Este método de prueba indica un cambio aproximado en las propiedades del asfalto durante el mezclado en caliente convencional a aproximadamente 302 °F (150 °C) según lo indicado por la viscosidad y otras medidas reológicas. Produce un residuo que se aproxima a la condición del asfalto incorporado en el pavimento. Si la temperatura de mezclado difiere apreciablemente del nivel de 302 °F (150 °C), se producirán más o menos efectos en las propiedades. Este método de prueba también se utiliza para determinar el cambio de masa, que es una medida de la volatilidad del asfalto (ASTM Standars, 2022).

El propósito principal del procedimiento es obtener asfalto oxidado para realizar más pruebas, que se describen a continuación.

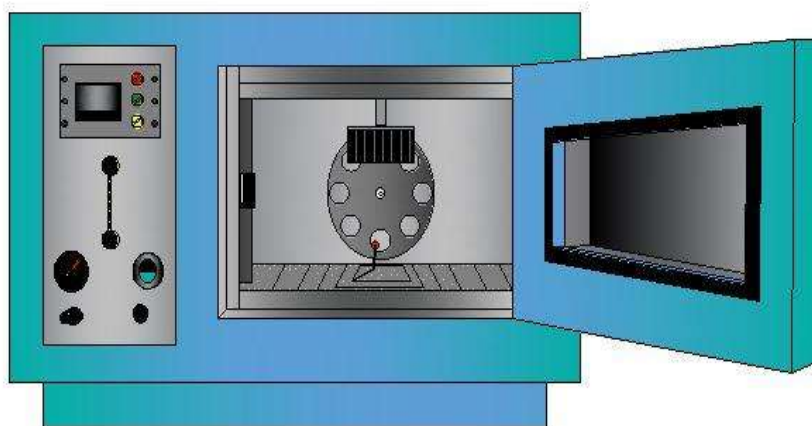


Ilustración IV-27. Horno RTFO.

👁 **Módulo reológico de corte dinámico $G^*/\sin(\delta)$ y ángulo fase (δ) después de RTFO (ASTM D 7175-15).**

El procedimiento se realiza de la misma manera como se hace en fase original. El asfalto se evalúa a la temperatura máxima del grado PG. Es decir, si el asfalto es un PG 76 -22, el módulo de corte se evaluará en original y después de RTFO a la temperatura de 76 °C. Sin embargo, los parámetros de cumplimiento son distintos. En la fase original se busca que $G^*/\sin(\delta)$ sea mayor a 1.0 kPa y después de RTFO $G^*/\sin(\delta)$ sea mayor a 2.2 kPa para el correcto cumplimiento de la prueba. El

ángulo fase (δ) no tiene un valor de cumplimiento mínimo en la norma mexicana, sin embargo, existen ciertas especificaciones particulares (proyectos específicos en el país), donde efectúan valores mínimos para verificar la presencia de polímero en los asfaltos modificados.

☞ **Pérdida de masa por calentamiento (ASTM D 2872-12).**

Durante el envejecimiento en RTFO, los componentes volátiles se evaporan, provocando una disminución de la masa, mientras que el oxígeno reacciona con la muestra, provocando un aumento de la masa. El efecto combinado determina si la muestra tiene una ganancia de masa total o una pérdida de masa total. Las muestras con un porcentaje muy bajo de componentes volátiles normalmente mostrarán una ganancia de masa, mientras que las muestras con un alto porcentaje de componentes volátiles normalmente mostrarán una pérdida de masa y uno que podría envejecer bastante rápido.

La pérdida de masa se obtiene con el promedio de las dos muestras después del envejecimiento de RTFO, y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdida de masa} = \frac{\text{masa original} - \text{masa envejecida}}{\text{masa original}} * 100 \quad \text{Ec. 4.19} \quad (20)$$

☞ **Recuperación elástica por ductilómetro (ASTM D 2872-18).**

Los aglutinantes modificados con polímeros también requieren una prueba simple que indique la presencia de polímero en el material. Una muestra de aglutinante envejecido RTFO se estira a 10 cm durante 5 minutos y luego se corta por la mitad (ver Ilustración IV-28). Después de una hora, las propiedades elásticas del polímero en la muestra permitirán que las dos piezas recuperen su forma original. Luego, las dos piezas se vuelven a unir hasta que los dos extremos se encuentran, y se realiza una medición final para calcular el porcentaje de recuperación de la muestra. Un alto porcentaje de recuperación (> 70% para aglutinantes modificados) demuestra la presencia de modificadores de polímero (ASTM Standard, 2021).



Ilustración IV-28. Ejecución de ensayo de recuperación elástica en ductilómetro.

Multiple Stress Creep Recovery Test - MSCR (AASHTO T-350 / ASTM D7405).

Este método de prueba cubre la determinación del porcentaje de recuperación y el cumplimiento de la fluencia no recuperable de los ligantes asfálticos por medio de pruebas de recuperación y fluencia de esfuerzo múltiple (MSCR). La prueba MSCR se realiza utilizando el reómetro de cizallamiento dinámico (DSR) a una temperatura específica (ASTM Standard , 2020).

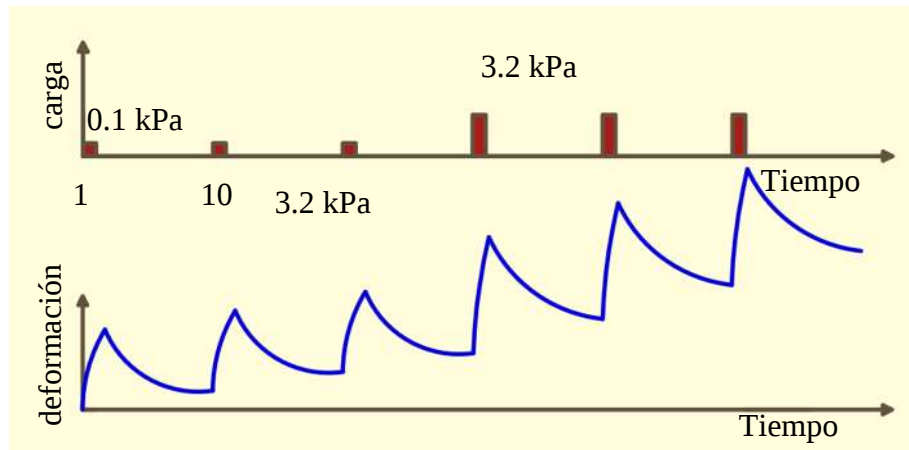


Ilustración IV-29. Esquema del principio de la prueba MSCR.

El método de ensayo MSCR se usa para determinar la presencia de respuesta elástica en un ligante asfáltico bajo fluencia por cizallamiento y recuperación a dos niveles de esfuerzo a una temperatura específica. Para ligantes de grado de desempeño (PG), la temperatura especificada será típicamente la temperatura alta de PG sin saltos de grado como se determina en la Especificación D6373 o AASHTO M 332. Al igual que para la determinación de modulo reológico se toma una muestra de asfalto que posteriormente se coloca sobre una de las placas del DSR, utilizando la geometría de placa paralela de 25 mm con un ajuste de espacio de 1 milímetro. La muestra se carga a esfuerzo constante durante 1 s y luego se deja recuperar durante 9 s. Se ejecutan veinte ciclos de fluencia y recuperación a un esfuerzo de fluencia de 0,100 kPa, seguidos de diez ciclos de fluencia y recuperación a un esfuerzo de fluencia de 3,200 kPa (ver [Ilustración IV-29](#)).

Esta prueba se utiliza para identificar la presencia de respuesta elástica en un aglutinante y el cambio en la respuesta elástica en dos niveles de esfuerzo diferentes. Se ha demostrado que el cumplimiento de la fluencia no recuperable es un indicador de la resistencia de un ligante asfáltico a la deformación permanente bajo carga repetida.

La prueba MSCR simula las condiciones de trabajo del cemento asfáltico durante la vida útil del pavimento, de los resultados se obtiene el valor *Jnr* que representa la fluencia relativa del cemento asfáltico. En la normativa mexicana N.CMT.4.05.004/18 *Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de desempeño (PG)*, se establecen las especificaciones que determinan la clasificación de los cementos asfálticos conforme el valor de *Jnr*, en cuanto a intensidad de tránsito y velocidad de operación.

4.3.4.4. Envejecimiento acelerado del cemento asfáltico usando la vasija de envejecimiento presurizado (PAV)

El envejecimiento de los ligantes asfálticos durante el servicio se ve afectado por la temperatura ambiente y por las variables asociadas a la mezcla, como las proporciones volumétricas de la mezcla, la permeabilidad de la mezcla, las propiedades de los agregados y posiblemente otros factores. Este proceso de acondicionamiento pretende proporcionar una evaluación de la resistencia relativa de diferentes ligantes asfálticos al envejecimiento oxidativo a temperaturas y presiones de envejecimiento elevadas seleccionadas, pero no puede tener en cuenta las variables de la mezcla ni proporcionar la resistencia relativa al envejecimiento en condiciones de servicio.

El equipo vasija de envejecimiento a presión, por sus siglas en inglés PAV "Pressure Aging Vessel" (ver Ilustración IV-30), es un dispositivo de acondicionamiento que simula lo que le sucede al aglutinante durante un largo período de tiempo. Para la ejecución de la prueba del asfalto de residuo del RTFO, se coloca $50 \pm 0,5$ gr de asfalto envejecido en bandejas estándar de acero inoxidable, que consecuentemente se introducen en el PAV, envejeciendo artificialmente el cemento asfáltico sometiéndolo a presión de $2,1 \pm 0,1$ MPa y a la temperatura seleccionada (90°, 100° o 110°C) durante 20 horas, simulando lo que le sucede al asfalto en la carretera durante un período de meses o años (ASTM Standars , 2022).

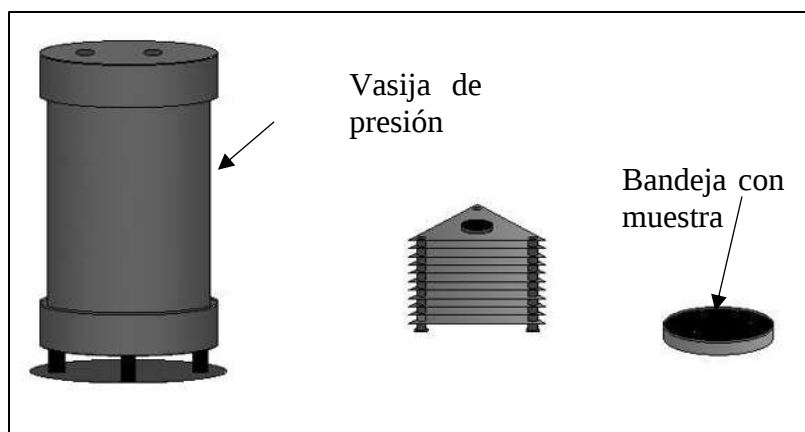


Ilustración IV-30. Equipo para envejecimiento acelerado en vasija de envejecimiento a presión PAV.

Finalizado el proceso de envejecimiento, se retira la muestra del PAV y se coloca en un horno desgasificador a una temperatura de $170 \pm 0,5$ °C por 30 minutos, para continuar con las pruebas de evaluación. La muestra se evalúa en el reómetro de corte dinámico (DSR) evaluando el parámetro de rigidez $G^*\sin(\delta)$. De igual forma, se coloca el asfalto en moldes con medidas estandarizadas para su evaluación en el reómetro a flexión (BBR), como se muestra en la Ilustración IV-31). Por sus siglas en ingles "Bending Beam Rheometer o reómetro de flexión proporciona una medida de la rigidez y capacidad de relajación de los ligantes asfálticos a bajas temperaturas. Dichos parámetros nos dan una indicación de la habilidad de los ligantes a resistir agrietamientos térmicos a causa de temperaturas bajas.

El reómetro de viga de flexión (BBR) es un dispositivo en el que el asfalto, moldeado en forma de viga, se dobla aplicándole una carga. En las especificaciones, los requisitos se enumeran como rigidez de fluencia, valor **m** y valor **s**. La teoría detrás de esta prueba es complicada. Básicamente, se supone que el asfalto es flexible, pero pierde su flexibilidad en climas fríos. Si se vuelve demasiado quebradizo, tiende a agrietarse en climas fríos. La prueba BBR se utiliza para determinar el grado PG del asfalto a bajas temperaturas (ASTM Standard , 2016).

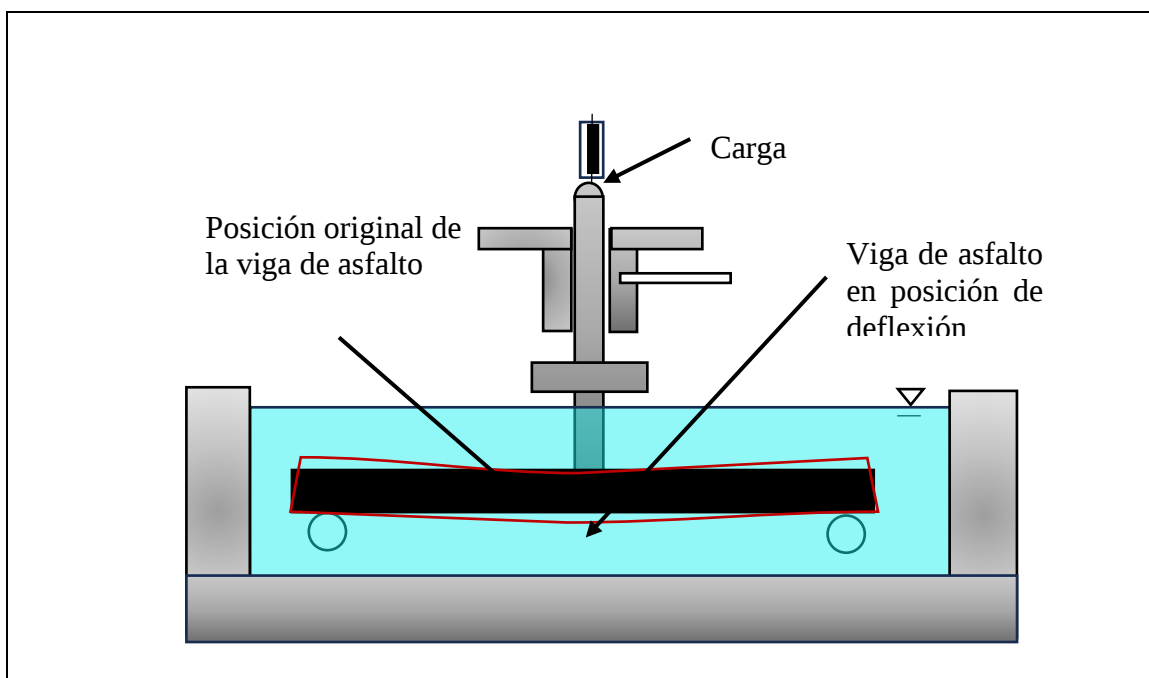


Ilustración IV-31. Reómetro de viga de flexión (BBR).

4.3.4.5. Ensayos para determinar las temperaturas de mezclado y compactación

- ⊗ **Viscosidad Rotacional (VR):** Se determina una curva de viscosidad para asfaltos que no han sido modificados haciendo uso del viscosímetro rotacional brookfield, este es un método presenado en “The Asphalt Handbook 7th Edition” del Asphalt Institute; para ello se realiza un barrido de viscosidades a diferentes temperaturas con el fin de obtener las temperaturas de mezclado y compactación.
- ⊗ **Viscosidad corte cero (η_0):** La viscosidad a corte cero es la viscosidad medida a velocidades de corte extremadamente bajas, velocidades cercanas a cero y para ello se emplea el reómetro de corte dinámico (DSR). El viscosímetro rotacional durante la medición de viscosidad en un asfalto aplica esfuerzos bajos y velocidades de corte relativamente altas, lo cual ayuda a determinar las temperaturas de mezclado y compactación para asfaltos no modificados, sin embargo, la mayoría de los asfaltos modificados presentan un comportamiento diferente al de un asfalto convencional que tiene un comportamiento newtoniano.

La viscosidad de un asfalto modificado se ve afectada por el esfuerzo y la velocidad de corte, es decir que, puede ser muy diferente si se le aplica una velocidad de corte baja o alta, por ello se

recurre a utilizar la carta de viscosidad de corte cero para determinar las temperaturas de mezclado y compactación.

En este estudio se realizó un diseño de mezcla con asfalto modificado, por lo cual para la ejecución de la prueba se realizó un barrido de frecuencia de 0.1 a 100 rad/s con un esfuerzo de 120 Pa y en un rango de temperatura de 100 a 180 °C y se determinó la Viscosidad a Corte Cero para cada temperatura.

4.4. Diseño volumétrico de la mezcla de acuerdo con el Protocolo AMAAC

En esta sección se describe la metodología de diseño para mezclas densas, con el propósito de cumplir con las especificaciones del protocolo AMAAC PA-MA 03/2013. El objetivo del diseño volumétrico de la mezcla es seleccionar un arreglo granulométrico adecuado del material pétreo (gruesos y finos) y un contenido de aglutinante (con o sin modificadores) para conseguir mezclas con buenas características de durabilidad, resistentes a la deformación permanente y resistentes al agrietamiento por fatiga.

Una vez que los materiales han sido caracterizados, tanto agregados pétreos como asfaltos, el protocolo AMAAC sugiere determinar la granulometría de acuerdo con el tamaño nominal del material pétreo grueso y a la funcionalidad de la mezcla asfáltica. De igual manera, el protocolo sugiere determinar las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Los requisitos volumétricos de la mezcla dependen del tráfico representado en ejes equivalentes, así como las propiedades del asfalto y agregado mineral, cuyas especificaciones y propiedades inherentes se definieron anteriormente.

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado: vacíos en el agregado mineral, VAM, vacíos de aire, V_a , vacíos llenados con asfalto, VFA y contenido de asfalto efectivo, P_{be} proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica. El protocolo AMAAC recomienda controlar los parámetros de V_a , VAM, VFA y la relación filler-asfalto (D_p), en función del tránsito y el tamaño nominal del agregado pétreo, en la Tabla IV-11., se indican los requisitos volumétricos necesarios para el diseño óptimo de la mezcla asfáltica de granulometría densa de acuerdo con el Protocolo AMAAC (AMAAC, 2016).

Tabla IV-11. Requisitos volumétricos necesarios para el diseño óptimo de la mezcla asfáltica de granulometría densa.

Nivel de tránsito (millones de ejes equivalente)	Vacíos de aire en la mezcla compacta % Va	Vacíos en el agregado mineral mínimo en % VAM					Vacíos llenos de asfalto en %, VFA	Relación Filler – asfalto, Dp
		Tamaño nominal (mm)						
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5		
< 0.3	4.0	11.0	120	13.0	14.0	15.0	70-80	0.6-1.2
0.3 a < 0.3	4.0						65-78	
3 a < 30	4.0						65-75	
≥30	4.0							

En este estudio, se diseñó para un tránsito alto (≥ 30 millones de ejes equivalentes), con un tamaño nominal de 12.5 mm; por consiguiente, se requiere que los parámetros de diseño se encuentren dentro de los siguientes valores: Va = 4.0 %, VAM = 14.0 %, VFA = 65 - 75 % y Dp = 0.6 - 1.2 %.

4.4.1 Análisis de la estructura granulométrica

Para realizar el análisis granulométrico de la mezcla, primeramente, se deben haber trazado las curvas granulométricas de cada una de las fracciones de los agregados con los cuales se elaborará la mezcla como se definió anteriormente.

Para especificar la granulometría, AMAAC ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abscisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45.

Para especificar la granulometría del esqueleto mineral de la mezcla, se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso

obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm). Por su parte, la zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm; forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar.

Un parámetro importante que se debe considerar es la granulometría de máxima densidad; corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen (0 %, 0 mm).

La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Evidentemente, esta granulometría debe evitarse porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa, como para obtener una mezcla durable (Garnica Anguas , Delgado Alamilla , Romero , & Alarcón Orta , 2004).

En la Tabla IV-12, se indican las especificaciones de puntos de control y zona restringida para el agregado de tamaño nominal 12.5mm el cual fue el utilizado en este trabajo.

Tabla IV-12. Especificaciones de gráfica Fuller para un agregado de tamaño nominal de 12.5 mm.

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19.0		100.0		
12.5	90.0	100.0		
9.5		90.0		
4.75				
2.36	28.0	58.0	39.1	39.1
1.18			25.6	31.6
0.6			19.1	23.1
0.3			15.5	15.5
0.075	2.0	10.0		

4.4.2. Selección del contenido óptimo de asfalto

El contenido de ligante es una de las características más importantes del hormigón asfáltico. La cantidad adecuada de aglomerante es esencial para el buen desempeño de las mezclas asfálticas. Muy poco aglutinante dará como resultado una mezcla seca y rígida que es difícil de colocar y compacta y será propensa a la fatiga agrietamiento y otros problemas de durabilidad. Demasiado aglutinante será antieconómico, ya que el asfalto el aglutinante es, con mucho, el componente más caro de la mezcla y hará que la mezcla sea propensa a roderas y exudación.

Una vez elegida la combinación de agregados que conformarán el esqueleto mineral de la mezcla, se deberá determinar el contenido óptimo de asfalto, para lo cual se deben mezclar y compactar especímenes con diferentes contenidos y determinar las propiedades volumétricas para cada variable. Para cada mezcla, se compacta un mínimo de dos especímenes utilizando el compactador giratorio Superpave (SGC). El contenido de ligante asfáltico inicial se puede estimar en base a la experiencia del diseñador con materiales similares. Si el diseñador no tiene experiencia con la fuente de agregados en particular, se puede determinar el contenido de asfalto inicial para cada mezcla de prueba estimando la gravedad específica de la mezcla y usando un procedimiento de cálculo detallado en AASHTO R 35.

4.4.2.1. Compactación de los especímenes de diseño

El SGC es un dispositivo mecánico que consta de los siguientes componentes:

- Marco de reacción, base giratoria y motor
- Sistema de carga, pistón de carga y manómetro Sistema de medición y registro de altura.
- Molde y placa base.
- Un dispositivo de extrusión de muestras.

Un mecanismo de carga presiona contra el marco de reacción y aplica una carga al ariete de carga para producir una presión de compactación de 600 kPa en la muestra. Un manómetro mide la carga del ariete para mantener una presión constante durante la compactación. El molde SGC tiene un diámetro interior de 150 milímetros y una placa base en el fondo del molde proporciona confinamiento durante la compactación. El SGC gira a una velocidad constante de 30 giros por minuto con el molde colocado en un ángulo de compactación externo de 1,25 grados.

En el sistema de diseño de mezcla Superpave, esta es una función del número de giros de diseño (N_{dis}) N_{dis} se usa para variar el esfuerzo de compactación de la mezcla de diseño, y es una función

del nivel de tráfico. El tráfico está representado por las cargas equivalentes de un solo eje de diseño (ESAL'S). Para esta tesis el número de giros de diseño (N_{dis}) fue de 125 giros.

4.4.2.2. Elaboración de los especímenes de diseño

Para cada variable de mezcla asfáltica que se evalúa se registran los pesos de los agregados y contenido asfáltico. Se recomienda evaluar al menos tres contenidos de asfalto por tipo de mezcla para completar un diseño.

Para este estudio realizaron tres diseños volumétricos, el protocolo AMAAC recomienda elaborar especímenes de 150 milímetros (diámetro) por 115 milímetros (altura) y requiere aproximadamente 4700 gramos de agregado. Los especímenes se mezclan y compactan a temperaturas usando una gráfica de viscosidad versus temperatura para mezclas asfálticas en caliente con asfalto sin modificar y para mezclas con asfalto modificado se utilizan las temperaturas indicadas en la carta de viscosidad corte cero, en el caso de mezclas asfálticas en caliente que incorporan hule de neumáticos por vía semihúmeda se recomienda mezclar a 180°C y compactar a 170°C.

Para la elaboración de los especímenes de diseño se pesan los agregados conforme la dosificación determinada para la curva granulométrica, se combinan en un recipiente de metal adecuado y se calientan en un horno a la temperatura de mezclado. El asfalto también se calienta a la misma temperatura. El asfalto se pesará en el agregado después de que se haya calentado completamente; la cantidad colocada en el horno debe ser más que suficiente para proporcionar el peso requerido para los especímenes a mezclar. La vasija y el agitador de mezclado también se calienta en horno a la temperatura de mezclado.

El procedimiento de mezcla en el laboratorio es el siguiente: se coloca el recipiente calentado en una balanza electrónica y ponga a cero la balanza, se realiza una depresión en el centro del agregado y se incorpora la cantidad adecuada de aglutinante caliente en el agregado, posteriormente se coloca el recipiente con el agregado y el asfalto en la base de la batidora, se coloca el accesorio para revolver calentado y se inicia el proceso de mezclado, se detiene la mezcladora hasta que el agregado esté completamente cubierto con aglomerante; demasiado mezclado puede causar que el agregado se descomponga, cambiando la gradación del agregado en el espécimen.

Posteriormente al proceso de mezclado las muestras deben acondicionarse durante dos horas en el horno a la temperatura de compactación, siempre y cuando los agregados tengan un porcentaje de absorción inferior al 2%; el tiempo de acondicionamiento se realiza para simular el periodo transcurrido desde la fabricación de la mezcla en planta hasta el tendido en el sitio de compactación. Una vez que se ha cumplido con el tiempo de acondicionamiento, se procese con la compactación de al menos dos especímenes por contenido, con el SGC.

Una vez compactados los especímenes se deberá calcular sus propiedades volumétricas (Vacíos de aire (%Va), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos de asfalto (VFA) y proporción de polvo), después se deberán graficar los datos. Se elige un contenido de ligante asfáltico que proporcione un 4 por ciento de vacíos de aire, que además permita cumplir con los requisitos volumétricos de la mezcla que se muestran en la Tabla IV-11. Requisitos volumétricos necesarios para el diseño óptimo de la mezcla asfáltica de granulometría densa..

Las propiedades volumétricas se calculan conforme se indica en el apartado 4.4.3.

4.4.3. Pruebas y cálculos volumétricos de la mezcla

Es de suma importancia lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada, ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio. De ahí, la trascendencia de simular de manera adecuada en el laboratorio la densificación que ocurre en campo bajo la acción vehicular, y de esta forma llegar a fórmulas de trabajo que permitan dosificar mezclas que exhiban un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito y clima. Para determinar las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica se requieren realizar los siguientes ensayos y cálculos:

🔍 **Gravedad específica de la mezcla compactada, G_{mb} , (ASTM D 1188 O D 2726/AASHTO T 166):** El G_{mb} no es más que la densidad compacta de la mezcla asfáltica, la cual se determina mediante la relación entre el peso en el aire de una probeta y su volumen, incluyendo los vacíos permeables, su cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w} \quad (21)$$

Donde:

W_a = masa de la probeta en el aire.

W_w = masa de la probeta en el agua.

W_{ss} = masa en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca.

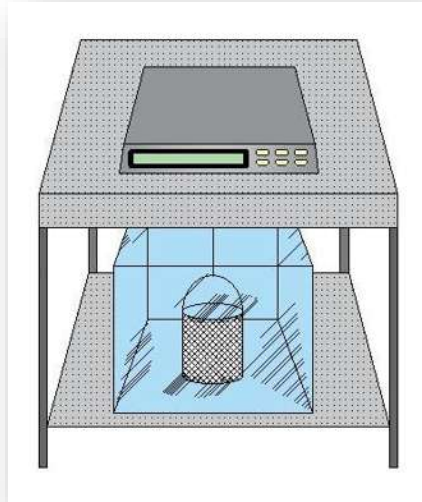


Ilustración IV-32. Equipo utilizado para determinar los parámetros de cálculo del G_{mb} .

🔍 **Gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica (G_{mm}) (AASHTO T 209):** La determinación de la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica es posiblemente la prueba de laboratorio más importante para definir las características volumétricas de la mezcla asfáltica, debido a que el cálculo del volumen de vacíos es la proporción que existe entre el G_{mb} y el G_{mm} . Esta prueba se realiza con la masa de la mezcla asfáltica suelta, es decir, no compacta, posteriormente se coloca en un picnómetro de vacío donde se debe saturar y aplicar vacío, con el objetivo de extraer todo el aire que contiene la mezcla. Para el cálculo del G_{mm} se utiliza la siguiente ecuación:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C} \quad (22)$$

Donde:

G_{mm} = gravedad específica máxima de la muestra.

A = masas de la muestra seca, g.

B = masa del picnómetro sumergido en agua a 25°C, g.

C = masa del picnómetro y muestra a sumergido en agua a 25°C, g.

Además de las pruebas volumétricas se deben realizar los siguientes cálculos para determinar todas las propiedades volumétricas de la mezcla:

🔍 **Porcentaje de vacíos de aire, Va:** Los Va, en la mezcla asfáltica compactada, corresponde a los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$Va = 100 \times \frac{G_{mm} \times G_{mb}}{G_{mm}} \quad (23)$$

Donde:

Va = vacíos de aire en la mezcla compactada.

Gmm = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

🔍 **Contenido de ligante asfáltico (Pb):** El Pb es el contenido total asfalto por volumen se calcula como el porcentaje de ligante por masa total de la mezcla, con la siguiente ecuación:

$$P_b = 100 \left(\frac{M_b}{M_s + M_b} \right) \quad (24)$$

Donde:

Pb = contenido de asfalto con el cual se desarrolló el ensayo, el porcentaje por el total de la masa de la mezcla.

Mb = Masa de asfalto en el espécimen.

Ms = Masa de agregados en el espécimen.

🔍 **Gravedad específica neta del agregado (Gsb):** teniendo en consideración que cada fracción de los agregados que componen una mezcla tienen una diferente gravedad específica, se debe determinar la gravedad específica neta usando la Ecuación (25)

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (25)$$

Donde:

Gsb = gravedad específica neta para el agregado total.

P1, P2, Pn = porcentajes individuales por masa de agregado.

G1, G2, Gn = gravedad específica neta individual del agregado.

Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

 **Gravedad específica del agregado (Gse):** La Gse incluye todos los espacios de vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto y se determina usando la ecuación (26).

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (26)$$

Donde:

Gse = gravedad específica efectiva del agregado.

Gmm = gravedad específica máxima de la mezcla de pavimento (sin vacíos de aire).

Pmm = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100.

Pb = contenido de asfalto con el cual se desarrolló el ensayo, el porcentaje por el total de la masa de la mezcla.

Gb = gravedad específica del asfalto (AASHTO T 228).

 **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM):** el porcentaje de VAM, es el volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los Va y el Pbe, expresado como un porcentaje del volumen total de la muestra.

El porcentaje de VAM puede estimarse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica compactada, con la siguiente ecuación:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (27)$$

Donde:

VMA = vacíos en el agregado mineral.

Gsb = gravedad específica neta del total de agregado.

Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

Ps = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.

👁 **Vacíos llenos de cemento asfáltico (VFA):** Corresponde al porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando la siguiente ecuación:

$$VFA = 100 - \frac{VAM - V_a}{VAM} \quad (28)$$

Donde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA.

VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total.

Va = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total.

👁 **Absorción del asfalto (Pba):** La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b \quad (29)$$

Donde:

Pba = asfalto absorbido, % de la masa del agregado.

Gse = gravedad específica efectiva del agregado.

Gsb = gravedad específica neta del agregado.

Gb = gravedad específica del asfalto.

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

$$P_{be} = P_b - \left[\left(\frac{P_{ba}}{100} \right) \times P_s \right] \quad (30)$$

Donde:

Pbe= contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje respecto al peso total de la mezcla;

Pba= porcentaje de asfalto absorbido;

Pb= porcentaje de asfalto total respecto al peso de la mezcla y;

Ps= contenido de agregado pétreo, expresado como porcentaje respecto al peso total de la mezcla.

👁 **Relación filler- asfalto (Dp):** Dp se refiere al porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 (75 µm) dividido por el porcentaje de asfalto efectivo. El polvo excesivo reduce el espesor de la película de asfalto en el agregado, lo que reduce la durabilidad, mientras que, polvo insuficiente puede permitir un espesor excesivo de la película de aglutinante de asfalto, lo que puede dar como resultado una mezcla inestable.

Donde:

Pbe= contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje respecto al peso total de la mezcla.

P_{0.075}= contenido de polvo mineral, % en peso total de la mezcla.

4.5.Evaluación del desempeño de las mezclas asfálticas

4.5.1. Susceptibilidad a la Humedad, Ensayo relación de esfuerzo a la tensión indirecta, TSR (AASHTO T283, ASTM D4867)

Existe una gran variedad de métodos para determinar el daño inducido por humedad que van desde pruebas simples como la prueba de ebullición, hasta pruebas más sofisticadas como la prueba Lottman, Root-Tunnicliff, Lottman modificada y la rueda cargada de Hamburgo.

El protocolo AMAAC recomienda para el Nivel I, la prueba de relación de esfuerzo a la tensión indirecta mediante la metodología AASHTO T283 y ASTM D4867, empleando la mordaza Lottman y el procedimiento Lottman modificado. La prueba TSR, por sus siglas en ingles "Tensile Strength Ratio", determina la resistencia al daño inducido por humedad en una mezcla asfáltica compactada mediante la relación en la resistencia a tensión indirecta de una serie de especímenes acondicionados contra especímenes no acondicionados.

Este método se utiliza generalmente para determinar la susceptibilidad a la humedad en mezclas densas. El ensayo consiste en fabricar 6 probetas de mezcla de $100 \pm 2,5$ mm de diámetro y $63 \pm 2,5$ mm de altura, con un contenido de vacíos al $7,0 \pm 0,5$ %, que se dividen en dos grupos (3+3). Las probetas pueden ser compactadas utilizando un compactador Marshall o un compactador giratorio (en nuestro caso se utilizó un compactador giratorio).

Los especímenes se dividen en dos subconjuntos con contenidos promedio de vacíos de aire aproximadamente iguales. La resistencia a la tracción de un subconjunto se mide en seco y la resistencia a la tracción del segundo subconjunto se mide después del acondicionamiento por saturación al vacío, seguido de un ciclo de congelación-descongelación; las probetas del primer grupo se mantienen a temperatura ambiente e inmediatamente antes de comenzar el ensayo se sumergen en agua a 25°C. El otro grupo es saturado sumergiendo las probetas en agua y aplicando vacío a una presión absoluta de 13 - 70 kPa (97.5 - 525 mmHg), durante un periodo aproximadamente de 5 - 10 min, hasta alcanzar un nivel de saturación que se encuentre entre el 70 - 80 %, posteriormente se somete a un ciclo congelación- descongelación, introduciendo las probetas en bolsas con agua en un congelador a -18°C durante 15 horas como mínimo. Pasado este tiempo se introducen en un baño de agua durante 24 horas a 60°C, y finalmente, 2 horas antes de la evaluación de las probetas, se mantienen a 25°C.

En la Ilustración IV-33, se muestra el proceso de ensayo para los especímenes acondicionados.

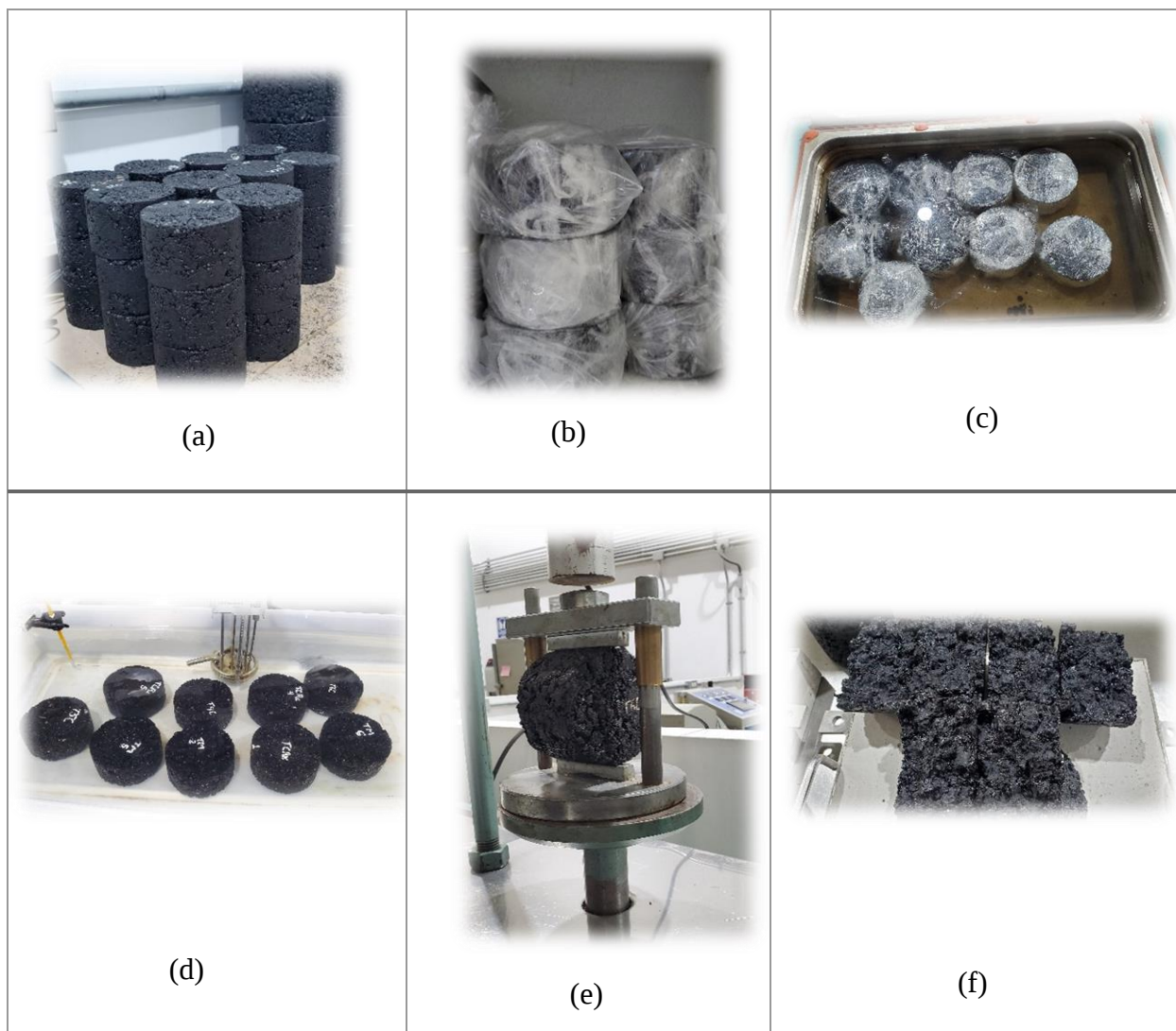


Ilustración IV-33. Procedimiento de acondicionamiento de los especímenes para el ensayo TSR, (a) especímenes elaborados para ensayo TSR, (b) proceso de congelamiento después de saturación 70-80%, (c) proceso de descongelamiento a 60°C, (d) acondicionamiento a 25°C, (e) ejecución de ensayo a tracción indirecta en mordaza Lottman, (f) verificación de caras fracturadas del agregado.

La susceptibilidad a la humedad se determina mediante el cálculo de la relación de resistencia a tensión indirecta (TSR) de las probetas no acondicionadas y las acondicionadas. Las probetas fracturadas a tensión indirecta son inspeccionadas de manera visual para estimar la pérdida de recubrimiento que se ha producido tras el acondicionamiento. La relación entre la resistencia a la tracción promedio de los subconjuntos acondicionados y no acondicionados y una evaluación visual del desprendimiento se utilizan para evaluar la sensibilidad a la humedad. Una mezcla se considera aceptable si la relación de resistencia a la tracción es igual o superior al 80 %.

$$\%TSR [\%] = \text{Probetas acondicionadas} / \text{Probetas sin acondicionar} * 100 \quad (31)$$

4.5.2. Resistencia a la deformación permanente mediante el ensayo Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324)

El ensayo Rueda Cargada de Hamburgo, HWT por sus siglas en inglés “Hamburg Wheel Track”, fue desarrollado en Alemania en 1970 por la empresa Esso A.G de Helmit-Wind Inc., tomando como idea principal un modelo de origen británico, el cual empleaba ruedas de caucho en vez de acero. Se introdujo en Estados Unidos en los noventa con el objetivo de detectar mezclas propensas a la deformación permanente.

La rueda cargada de Hamburgo al igual que el ensayo analizador de pavimento asfáltico (APA), es una prueba de laboratorio destructiva para evaluar la resistencia a la formación de roderas y la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas. En este estudio el ensayo se realizó con el objetivo de evaluar la resistencia a la deformación permanente o formación de roderas en las mezclas.

La resistencia a la formación de roderas requerida de una mezcla depende del nivel de tráfico y la ubicación de la mezcla en la estructura del pavimento. Los pavimentos con niveles de tráfico más altos requieren mayor resistencia que los pavimentos con bajos volúmenes de tráfico. Las capas superficiales e intermedias requieren mayor resistencia a la formación de roderas que las capas base. Para mezclas granulométricas densas, la angularidad del agregado, el grado de desempeño del asfalto, el esfuerzo de compactación y algunas propiedades volumétricas varían con el nivel de tráfico y la profundidad de la capa para proporcionar una resistencia adecuada a la deformación permanente (Transportation Research Board, 2011)

El equipo de rueda cargada de Hamburgo consiste en dos ruedas de acero de 47 mm de ancho y 203.2 mm de diámetro, que se mueven axialmente sobre un espécimen fabricado en laboratorio o extraído en campo. La carga en cada rueda es de 71.6 ± 0.45 kg (705 ± 4.5 N) y su velocidad es de 30.5 cm/s aproximadamente, medida en el punto central, para generar 52 ± 2 pasadas por minuto. Tiene un baño de agua que controla la temperatura con una variación de $\pm 1^\circ\text{C}$, en un rango de 25 a 70°C . La deformación se mide con transductores (LVDT), con un rango de medición de 0 a 20 mm y una precisión de 0.01 mm.

Para la evaluación de la resistencia a la deformación permanente mediante el ensayo HWT, por cada tipo de mezcla en este estudio se fabricaron cuatro especímenes cilíndricos en laboratorio de 150 mm (6 pulgadas) de diámetro y 62 ± 2 mm (2.4 pulgadas) de espesor, compactados a un porcentaje de vacíos de aire de 7 ± 1 %, los cuales posteriormente se colocaron en dos losas de 320 mm de largo y 260 mm de ancho, para el montaje rígido de los especímenes en las losas se utilizó un mezcla de yeso-cemento; finalmente se colocan las losas en el equipo sumergidos en agua caliente, el acondicionamiento fue de 30 minutos, previo al el inicio de las pasadas de las ruedas sobre cada losa.

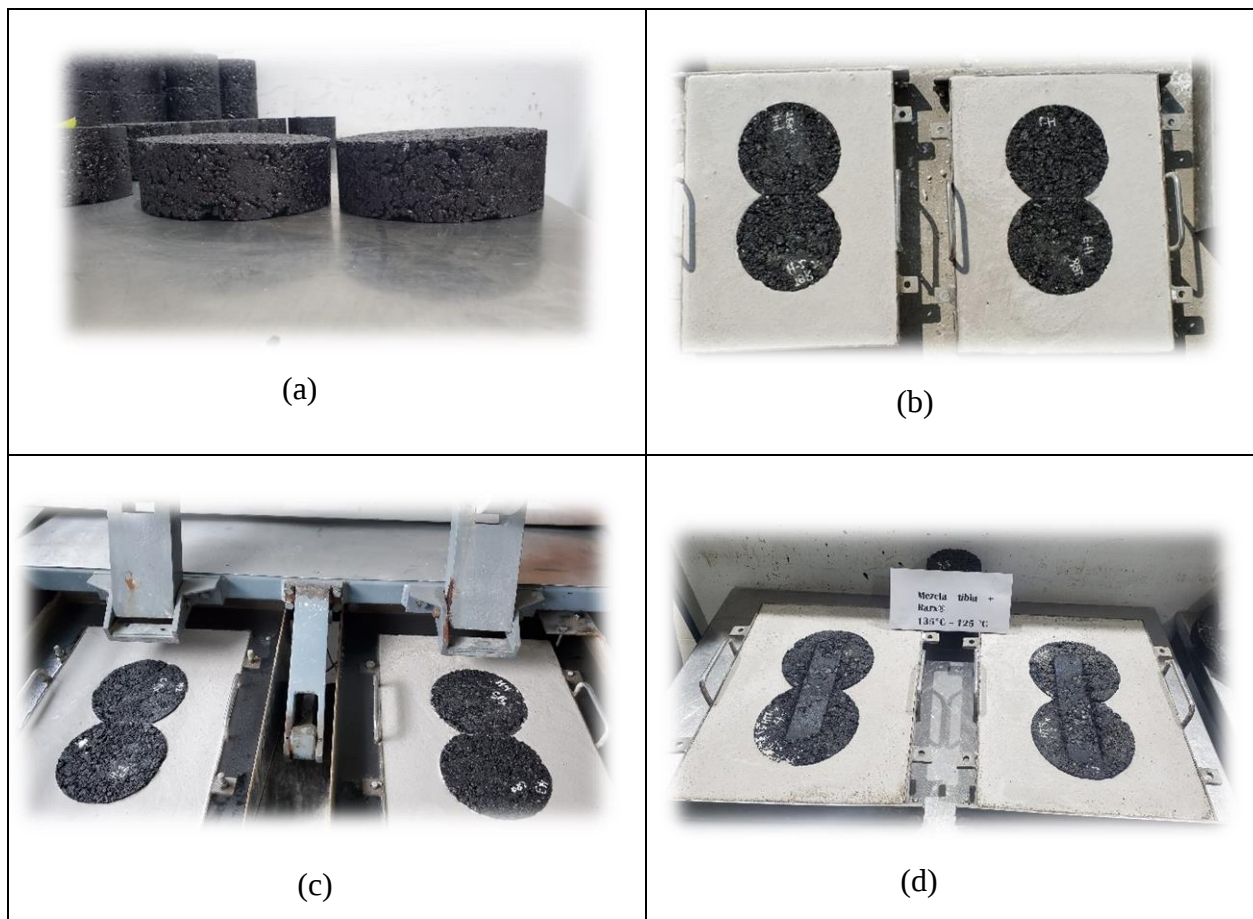


Ilustración IV-34 Ensayo Rueda Cargada de Hamburgo, (a) Elaboración de especímenes, (b) Colocación de especímenes en las losas, (c) Colocación de los especímenes en el equipo HWT, (d) Especímenes después de 20 mil pasadas.

En la Ilustración IV-34, se muestra el procedimiento de prueba del ensayo rueda cargada de Hamburgo.

En México como en algunos departamentos de transporte en Estados Unidos, se realiza la prueba a una temperatura de 50°C, con una deformación máxima permitida de 10 mm y a 20,000 repeticiones de carga sobre los especímenes. Por consiguiente, la prueba se detiene si la deformación es mayor a 10 mm o bien, una vez terminada las 20,000 pasadas. Para este estudio las pruebas finalizaron a las 20 mil pasadas.

El cálculo de los parámetros de prueba se realiza mediante una gráfica de la profundidad de rodadura registrada por rueda (mm) en función del número de pasadas.

4.5.3. Ensayo de Módulo Resiliente (UNE-EN 12697-26)

La mayoría de los materiales de pavimentación no son elásticos, pero experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña en comparación con la resistencia del material y se repite un gran número de veces, la deformación bajo cada repetición de carga es casi completamente recuperable (y proporcional a la carga) y se puede considerar elástico. El módulo elástico basado en la deformación recuperable bajo cargas repetidas es denominado módulo resiliente (MR) (Huang, 2004).

El módulo resiliente, nos permite evaluar la respuesta elástica de la mezcla asfáltica, En este estudio el MR de las mezclas asfálticas se determina mediante la prueba diametral bajo carga repetida conforme la Normativa UNE - EN 12697-26, Anexo C, esta prueba consiste en aplicar carga repetida con forma de onda semi-senoidal, en el plano diametral vertical, seguida por un periodo corto de reposo. El espécimen se ensaya en dos posiciones, a lo largo del primer eje diametral, enseguida se gira 90° y se repite el ensayo.

El módulo resiliente se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$M_R = \frac{P(v + 0.2734)}{\delta t} \quad (32)$$

Donde:

P [lb]: es la magnitud de la carga dinámica.

v: es la relación de Poisson, generalmente se toma como 0,35.

δ [pulgadas]: es la deformación recuperable total, y

t[pulgadas]: es el espesor del espécimen.

Para la ejecución del ensayo se debe contar con una cámara termostática en la cual se pueda controlar la temperatura, para el acondicionamiento de las probetas y realizar la prueba, dos regletas de carga de acero inoxidable con superficies cóncavas, bordes redondeados para evitar cortes en la probeta durante el ensayo, Las regletas de carga para probetas de 100 mm y 150 mm de diámetro, deben tener una anchura de $(12,7 \pm 0,2)$ mm y $(19,1 \pm 0,2)$ mm respectivamente. El sistema de carga debe incorporar un actuador de carga adecuado, capaz de aplicar una carga a lo largo del diámetro vertical de la probeta a través de las regletas. La carga debe tener la forma de una onda de medio seno (ver Ilustración IV-35). La deformación de las probetas se mide a través de dos Transductores Diferenciales Variables Lineales (*Linear Variable Differential Transformers*, LVDT), uno frente al otro en un bastidor rígido fijado a la probeta.

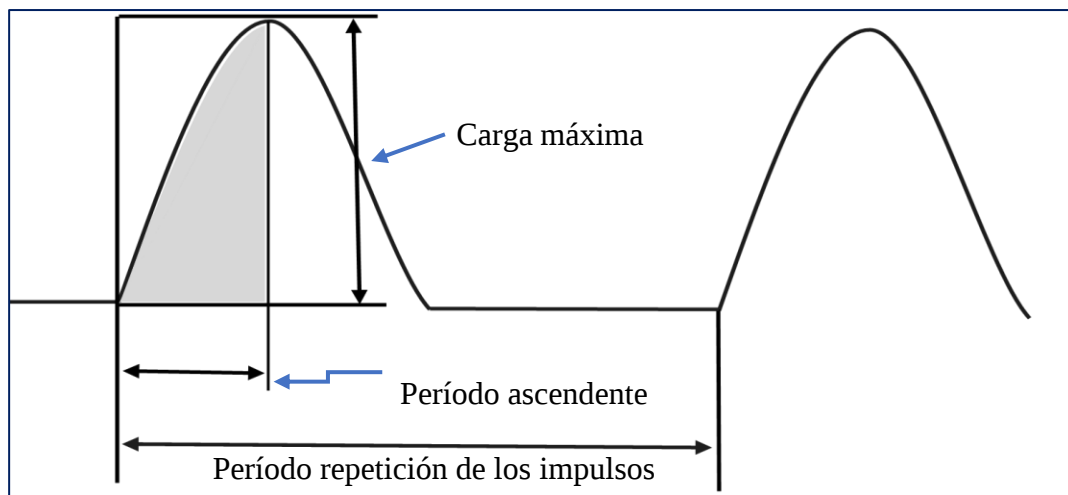


Ilustración IV-35. Forma de impulso de carga, durante el ensayo de MR.

Con el fin de evaluar el MR de las mezclas en este estudio se fabricaron tres especímenes cilíndricos por cada tipo de mezcla, de 100 mm de diámetro y 63.5 mm de altura, con un 4% de vacíos de aire.

El ensayo se realizó bajo las siguientes condiciones:

- 🔍 Modo de carga: Esfuerzo controlado de 350 kPa
- 🔍 Frecuencia: 1 s (0.1s carga, 0.9 s de reposo)
- 🔍 Deformaciones medidas: deformación horizontal
- 🔍 Temperatura de prueba: 20°C
- 🔍 Acondicionamiento en aire: 2 horas

4.5.4. Módulo Dinámico (AASHTO T 342-11)

El ensayo de módulo dinámico fue estandarizado en 1979 como ASTM D3497, "Método de prueba estándar para el módulo dinámico de mezclas de asfalto y concreto". La prueba consiste en aplicar un esfuerzo de compresión sinusoidal uniaxial (es decir, haversine) a una muestra de prueba cilíndrica de mezcla asfáltica no confinada o confinada, como se muestra en la Ilustración IV-36.

La relación esfuerzo – deformación bajo una carga sinusoidal continua para materiales viscoelásticos se define mediante un número complejo llamado “módulo complejo” (E^*). El valor absoluto del módulo complejo $|E^*|$ se define como módulo dinámico, el cual es la relación entre el esfuerzo máximo (σ_0) y la deformación axial máxima recuperable (ε_0):

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (33)$$

$$E^* = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = |E^*| e^{i\phi} \quad (34)$$

Donde:

$|E^*|$: Módulo dinámico (valor absoluto del módulo complejo) del material.

Φ : Ángulo de fase (o ángulo de desfase) del material.

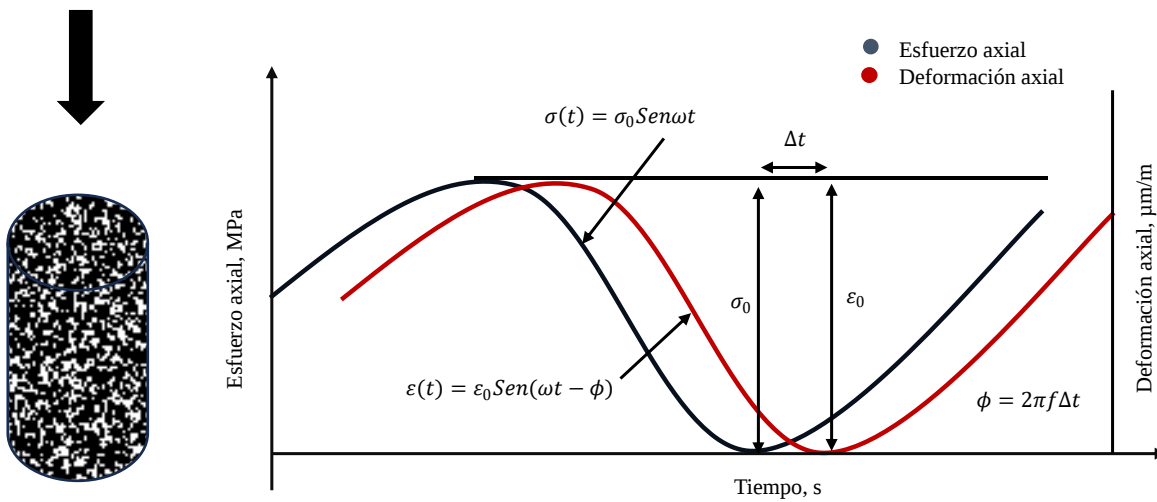


Ilustración IV-36. Gráfica esfuerzo deformación del ensayo de módulo dinámico.

La respuesta de un material viscoelástico como la mezcla asfáltica en caliente, bajo carga sinusoidal, está fuera de fase con respecto a la carga aplicada; como es mostrado en la figura 1. El retraso entre la señal de carga y deformación es llamado ángulo de fase (ϕ). Un ángulo de fase (ϕ) de cero corresponde a un material puramente elástico, mientras que un $\phi = 90^\circ$ es asociado a un material puramente viscoso (newtoniano). Un ángulo de fase entre 0 y 90° corresponde a un material viscoelástico, tal es el caso de la mezcla asfáltica.

El módulo dinámico consta de dos partes; la parte real (E'), la cual representa la rigidez (parte elástica) y la imaginaria (iE'') que representa el amortiguamiento interno de los materiales (parte viscosa), las cuales se pueden escribir de la siguiente manera:

$$|E^*| = E' + iE'' \quad (35)$$

Donde:

$E' = |E^*| \cos \phi$, Módulo de almacenamiento (parte elástica).

$E'' = |E^*| \sin \phi$, Módulo de pérdida (parte viscosa).

Esta prueba permite determinar el valor del módulo dinámico y ángulo de fase de la mezcla asfáltica en un rango de temperaturas y frecuencias de carga. El sistema de ensayo de módulo dinámico consiste en una máquina de ensayo, cámara ambiental y sistema de medición. La máquina de ensayo deberá ser servohidráulica capaz de producir una carga de compresión sinusoidal controlada. La máquina de prueba debe tener una capacidad de aplicar carga en un rango de frecuencias de 0.1 a 10 Hz y niveles de esfuerzo mayores a 2800 kPa.

La cámara ambiental debe ser capaz de controlar la temperatura del espécimen en un rango de temperaturas de -10 a 60 °C con una exactitud de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. El sistema de medición debe estar controlado completamente por computadora, capaz de medir y registrar durante el ensayo la carga aplicada y la deformación axial con una aproximación de 0.5 %. Las deformaciones axiales pueden ser medidas en dos puntos a 180° o tres puntos a 120° mediante LVDTs que deben tener un rango de medición de ± 0.5 mm.

Para el ensayo de módulo dinámico en este estudio se utilizó el equipo AMP 100 de GCTS. Se fabricaron 15 especímenes (tres por cada variable) con una altura de 150mm y 100 mm de

diámetro, se ensayaron a temperaturas de 10°, 20°C, y 30°C con frecuencias de 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz y 0.1 Hz. Cada espécimen se ensayó para cada una de las 15 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga.

Para ejecutar la prueba, primeramente, se deben pegar pines de montaje para los LVDT axiales a los lados de cada uno de los especímenes que se ensayará para las 15 combinaciones, posteriormente se coloca el espécimen a ensayar en la cámara de temperatura, se colocan los LVDTs en los pines previamente pegados y se ajustan al extremo de su rango lineal para permitir que el rango completo esté disponible para la deformación permanente a compresión acumulada, una vez colocados los pines se coloca un disco de acero encima del espécimen; centrarlo visualmente con el actuador de carga con el propósito de evitar carga excéntrica, finalmente se ensaya el espécimen de la temperatura más baja a la más alta.

La deformación del espécimen debe mantenerse dentro del rango lineal, entre 50 y 150 $\mu\epsilon$, por lo que la carga aplicada fue ajustada para cada frecuencia y temperatura para alcanzar el nivel de deformación apropiado.

4.5.5. Número de flujo de la mezcla asfáltica usando el Probador de rendimiento de mezclas asfálticas (AMPT) (AASHTO T 378-17)

El protocolo de prueba de número de flujo NF fue desarrollado e introducido en el Proyecto NCHRP 9-19 como una prueba de desempeño simple para evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente en las mezclas asfálticas en caliente. La prueba NF, también conocida como creep repetitivo, consiste en realizar miles de repeticiones de carga y registrar la deformación permanente acumulada en función del número de ciclos de carga. Se realiza con una carga haversine compresiva repetida (1 ciclo con 0,1 s de tiempo de carga y 0,9 s de tiempo de reposo), normalmente la duración de la prueba es de 3 h aproximadamente o diez mil ciclos de carga.

Los resultados de las pruebas de carga repetidas generalmente se presentan en términos de deformación permanente acumulada frente al número de ciclos de carga tal como se observa en la Ilustración IV-37, un gráfico típico de deformación permanente acumulada (ϵ_p) frente al número de ciclos de carga (N) en una escala logarítmica. Se identifican tres zonas básicas: zona primaria, secundaria y terciaria: (1) la zona primaria comprende el periodo para completar la acumulación inicial de deformación en el espécimen; la cual se incrementa rápidamente; (2) la zona secundaria en la que la tasa de deformación es constante con los ciclos de carga; y (3) la zona terciaria en la

que la tasa de deformación aumenta con los ciclos de carga. El número de ciclo que comienza en el flujo terciario se denomina “**número de flujo**” (Witczak, Kaloush, Pellinen, & El-Basyouny, 2002).

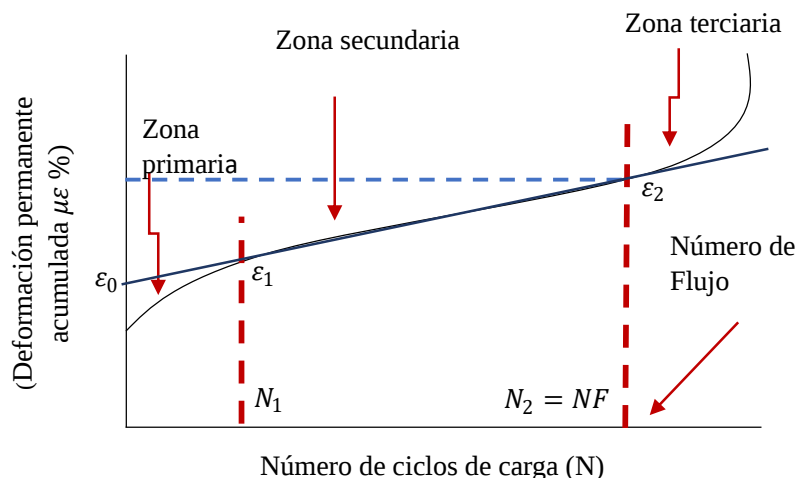


Ilustración IV-37. Relación típica entre la deformación permanente y los ciclos de carga.

El equipo y el montaje de los especímenes para ejecutar la prueba número de flujo corresponde al mismo equipo utilizado para el ensayo de módulo dinámico, previamente descrito, sin embargo, en este caso los especímenes se someten a una aplicación de carga a la muestra cada segundo, hasta que se alcanza el punto de flujo. El punto de flujo representa la falla del espécimen.

Para este ensayo se fabricaron 15 especímenes (tres por cada variable), con un porcentaje de vacíos de 4%, lo cual es el porcentaje de vacíos de diseño, con un diámetro de 100 mm y una altura de 150 mm, se ensayaron a una temperatura de 40°C.

Proyecto NCHRP 9-19 recomendó realizar la prueba FN a una temperatura efectiva del pavimento en un modo no confinado con un esfuerzo vertical entre 68,9 y 206,8 kPa, en este estudio se esfuerzo desviador utilizado fue de 250 kPa, la prueba se fijó para terminar en 10 000 ciclos.

4.5.6. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas para determinar fatiga (UNE-EN 12697-24).

Se le denomina fatiga a la reducción de la resistencia de un material bajo la aplicación repetida de una carga, cuando se compara con la resistencia bajo la aplicación individual de una carga. La vida de fatiga de un material se define como el número de ciclos de carga hasta la fractura de la muestra.

Para determinar la fatiga de las mezclas se utilizó el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (ITT), este método caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas cuando se someten repetidamente a ensayo de fatiga con carga, con un modo de carga constante aplicando una carga de tracción indirecta.

Una estructura de pavimento recibe cargas repetidas debido a los neumáticos de los vehículos a medida que pasan. El ensayo de fatiga por tracción indirecta se expone a cargas de compresión repetidas (frecuencia constante); estas cargas desarrollan una tensión de tracción relativamente uniforme junto con el plano diametral horizontal; la señal de deformación generada es comparable a la forma de la señal de deformación transversal medida durante el paso del vehículo (Ilustración IV-38) (Vieira, Desmoulin, & Pellevoisin, 2012).

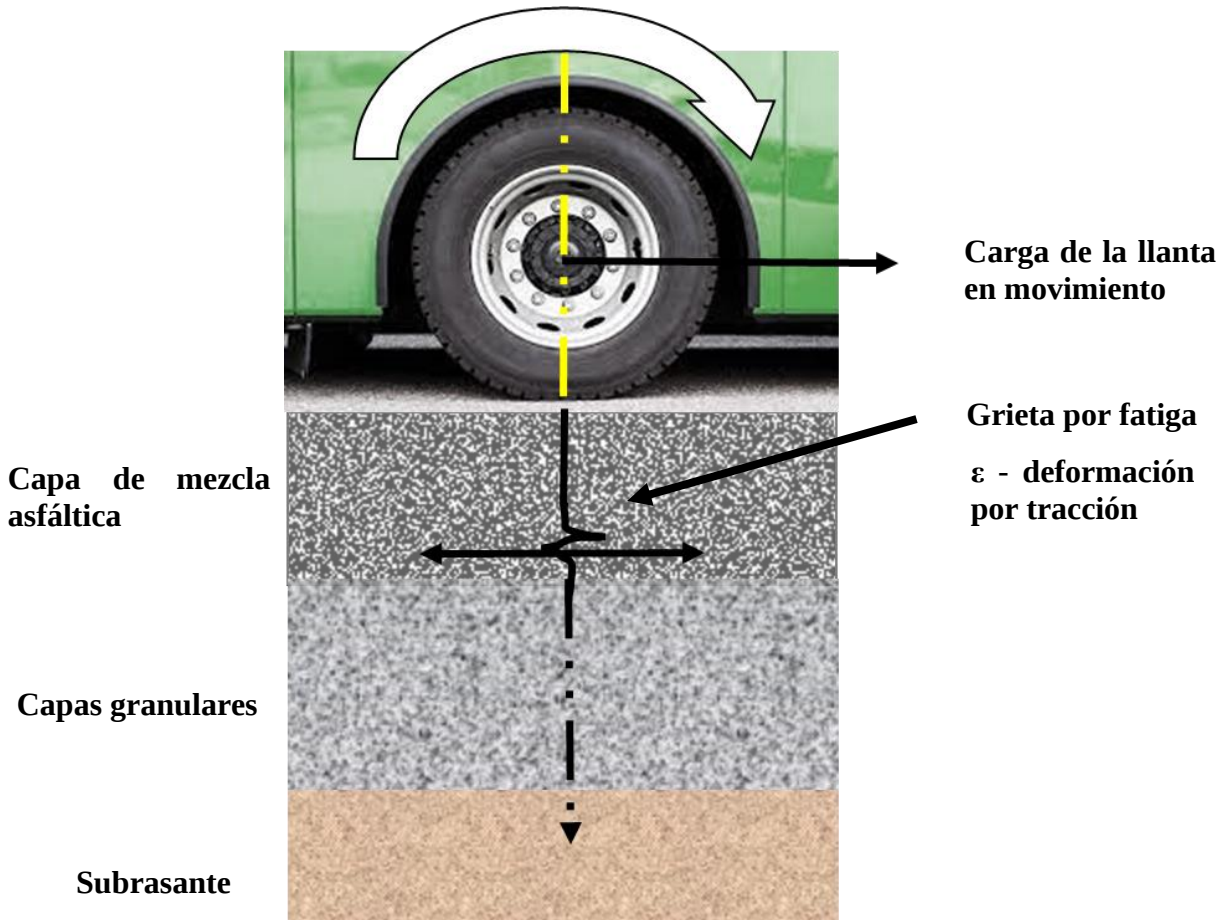


Ilustración IV-38. Deformación por tracción en la capa de asfalto causada por la llanta en movimiento.

Se puede utilizar una probeta cilíndrica elaborada en laboratorio, o un testigo extraído de una capa de carretera. La probeta cilíndrica para ensayar se debe exponer a cargas de compresión repetidas con una señal de carga de medio senovertoso a través del plano diametral vertical. Esta aplicación de carga desarrolla un esfuerzo de tracción relativamente uniforme, perpendicular a la dirección de la carga aplicada y a lo largo del plano diametral vertical, que hace que la probeta falle por escisión a lo largo de la parte central del diámetro vertical, como se puede apreciar en la Ilustración IV-39.

La deformación horizontal durante la prueba de fatiga por tracción indirecta se registra como una función del ciclo de carga. Se usan dos criterios para definir la vida a fatiga del espécimen, el primero es el número de ciclos para completar la falla y el segundo es el número de ciclos en los que el módulo elástico se reduce al 50 por ciento de su valor original.

La vida hasta la rotura resulta obvia a partir de la relación entre el número de aplicaciones de carga y la deformación horizontal total.



Ilustración IV-39. Probeta sometida a ensayo de ITT.

La deformación máxima por tracción y el esfuerzo en el centro de la probeta, se calculan aplicando las siguientes fórmulas:

$$\sigma_o = \frac{2P}{\pi * t * \Omega} \quad (36)$$

$$\varepsilon_o = \left(\frac{2\Delta H}{\Omega} \right) * \left[\frac{1 + 3\nu}{4 + \pi x \nu - \pi} \right] \quad (37)$$

Si $\nu = 0.35$, entonces

$$\varepsilon_o = \frac{\Delta H}{\Omega} \quad (38)$$

Donde:

σ_o es el esfuerzo de tracción en el centro de la probeta, en megapascuales (MPa);

P es la carga máxima, en newtons (N);

t es el espesor de la probeta, en milímetros (mm);

Ω es el diámetro de la probeta, en milímetros (mm);

ε_o es la deformación por tracción, en $\mu\varepsilon$, en el centro de la probeta;

ΔH es la deformación horizontal, en milímetros (mm).

El criterio de fatiga para una mezcla asfáltica individual se debe determinar mediante el ensayo de probetas. La relación de la regresión mínimo-cuadrática se debe fijar, para el dato del logaritmo de la deformación inicial, como una variable independiente, y el dato del logaritmo de la vida hasta la rotura, como una variable dependiente, de acuerdo con las ecuaciones (37) y (38)

$$\lg(N_f) = k * \left(\frac{1}{\varepsilon_o} \right)^n \quad (39)$$

Donde:

N_f es el número de aplicaciones de carga;

k, n son constantes del material;

ε_o es la deformación por tracción, en $\mu\varepsilon$, en el centro de la probeta.

El ensayo se realizó conforme la normativa UNE-EN 12697-24 Anexo E, la vida hasta la rotura se determinó como el número total de aplicaciones de carga que causa una rotura completa de la probeta. Para la ejecución del ensayo se fabricaron 9 especímenes por tipo de mezcla, para un total de 45 probetas, con un diámetro de 100 ± 3 mm y con un espesor de 63.5 ± 3 mm, con 4% de vacíos de aire.

Las probetas se ensayaron a tres niveles de esfuerzo 250 kPa, 350 kPa y 450 kPa, acondicionadas a 20 °C. Se aplicó una carga repetida de medio senoverso durante un tiempo de carga de 0,1 s y un tiempo de descanso de 0,4 s.

CAPÍTULO V.

V. RESULTADOS

En este capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.

5.1. Características de los materiales

Debido a que por volumen un 85% de las mezclas asfáltica corresponde a los agregados, es necesario que estos sean de buena calidad para garantizar que el pavimento resultante y funcione como se espera. En los pavimentos asfálticos, los agregados deben ser tenaces y resistentes a la abrasión. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del agregado pétreo fino y grueso proveniente del banco de materiales Asfaltos Guadalajara utilizado en este estudio, los resultados se comparan con el parámetro de cumplimiento recomendado por el Protocolo AMAAC 2013.

Tabla V-1. Características de calidad de la fracción gruesa.

Ensayo	Resultado	Especificación	Norma
Gravedad específica, (Gsb)	2.669	2.4 mín.	ASTM C127
Absorción, %	1.3 %	Reportar	ASTM C127
Desgaste de Los Ángeles, %	13 %	30 máx.	ASTM C131
Desgaste microdeval, %	8%	18 máx.	ASTM D6928
Intemperismo acelerado, %	1.3%	15 máx.	ASTM C88
Caras fracturadas, % (2 o más caras)	100 %	90 mín.	ASTM D 5821
Partículas planas y alargadas, %	4.7%	Relación 5 a 1: 10 máx.	ASTM D4791

Tabla V-2. Características de calidad de la fracción fina.

Ensayo	Resultado	Especificación	Norma
Gravedad específica, (Gsb)	2.627	2.4 mín.	ASTM C128
Absorción, %	1.47	Reportar	ASTM C128
Equivalente de arena, %	65	50 mín.	ASTM D2419
Angularidad, %	44.9	40 mín.	ASTM C1252
Azul de metileno, ml/g	14	15 máx.	AMAAC RA-05

En la Tabla V-1 se presentan los resultados de la caracterización del agregado grueso y en la Tabla V-2 los resultados correspondientes a la caracterización del agregado fino, como se puede observar ambos materiales cumplen con los requisitos de cumplimiento establecidos en el protocolo AMAAC 2013 y con la normativa mexicana vigente para la caracterización de los materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa fabricadas para tránsitos mayores a 30 millones de ESALs.

Los materiales presentan una absorción inferior al 2%, por lo tanto, el tiempo de curado de las mezclas asfálticas será de dos horas.

El material es 100% triturado, lo cual indica que las partículas son en su mayoría cubicas y angulares; siendo un resultado beneficioso, debido a que, varios estudios de investigación han demostrado que aumentar el número de partículas de agregado que ha sido triturado mecánicamente aumenta la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica, de igual forma, el porcentaje de partículas alargadas y lajeadas es mínimo, lo cual indica que las partículas no se fracturaran con facilidad durante la producción y compactación de la mezcla.

En relación con los resultados de las pruebas desgaste de los ángeles, microdeval e intemperismo acelerado, los porcentajes de degradación obtenidos fueron mínimos, lo que se relaciona con una buena tenacidad de los agregados, la tenacidad se utiliza para describir la capacidad de un agregado para resistir la abrasión y la degradación que se produce durante la manipulación, la producción, la construcción y el uso en servicio de la mezcla.

La angularidad de la fracción de agregado fino es tan importante como la angularidad del agregado grueso fracción agregada al rendimiento de las mezclas asfálticas densas, una angularidad de los finos superior al 40% ayuda a minimizar el potencial de permanente deformación.

El valor de azul de metileno es un indicador de arcillas nocivas, los resultados mostraron inicialmente un valor fuera del parámetro de cumplimiento, por lo que se sustituyó un 1% del porcentaje de filler en la mezcla por carbonato de calcio, a fin de que las arcillas no perjudicaran el desempeño de la mezcla.

Asimismo, en la Tabla V-3. se muestra el resultado de las granulometrías de los materiales (agregado pétreo grueso y fino, polvo de neumáticos), donde se puede apreciar que el tamaño nominal de los agregados corresponde a 12.5 mm (12.5 mm).

La granulometría de los materiales servirá para realizar las combinaciones a fin de obtener una curva granulométrica de diseño que cumpla con las recomendaciones del Protocolo AMAAC para el diseño volumétrico de mezclas de granulometría densa.

Tabla V-3. Granulometría de los materiales.

No. Malla	Grava 1/2" Pasa [%]	Arena Pasa [%]	Polvo de neumático Pasa [%]
3/4"	100%	100%	100%
1/2"	86%	100%	100%
3/8"	54%	100%	100%
Nº4	19%	100%	100%
Nº8	0%	76%	100%
Nº16	0%	45%	100%
Nº30	0%	31%	99%
Nº50	0%	24%	57%
Nº100	0%	18%	18%
Nº200	0%	14%	11%

5.1.1. Calidad del cemento asfáltico

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas realizadas para la caracterización de los asfaltos utilizados en la evaluación de esta tesis, de acuerdo con la norma mexicana N·CMT·4·05·004/18, los asfaltos caracterizados fueron los siguientes:

- ☞ Asfalto sin modificar de grado PG 64-22
- ☞ Asfalto PG 64-22 + 2% de TB-1 (asfalto para mezcla tibia)
- ☞ Asfalto PG 64-22 + polímero (asfalto modificado)
- ☞ Asfalto PG 64-22 + 30 % de polvo de neumático con relación a la masa del asfalto.

☉ Propiedades del asfalto en original

En la Tabla V-4 se muestran los resultados de la caracterización de los cementos asfálticos antes de envejecimiento, realizándose las pruebas básicas que permiten identificar la presencia de un

polímero como son separación del asfalto y recuperación elástica por torsión, la prueba de punto de inflamación Cleveland como prueba de seguridad para el manejo del asfalto y el ensayo de viscosidad Brookfield para garantizar la trabajabilidad del cemento asfáltico, asimismo, se obtuvieron las características viscoelásticas a través de los ensayos realizados en el Reómetro de Corte Dinámico DSR, para la determinación del grado de desempeño a alta temperatura de los asfaltos.

Tabla V-4. Características de los asfaltos en condición original.

Tipo de Ensayo	Método de ensayo	Asfalto 64-22	PG	Asfalto 64-22 TB1	PG + Asfalto modificado con polímero	Asfalto modificado con polvo de neumático	N-CMT-4-05-004/18
Penetración a 25°C, 100g, 5 s, (1/10 mm)	M-MMP-4-05-006/00 SCT	50.00		51.00	--	--	40 mín.
Punto de reblandecimiento, 5 °C/min, H ₂ O destilada, ASTM 15C, (°C)	ASTM D36-14 (2020)	52.00		54.00	67.00	78.05	55 mín.
Separación de asfalto modificado, 5 °C/min, (°C)	M-MMP-4-05-022/02 SCT	--		--	0.00	8.00	2 máx.
Punto de inflamación Cleveland, (°C)	ASTM D8254-19	>300		>300	>300	> 300	230 mín.
Recuperación elástica por torsión a 25 °C, (%)	M-MMP-4-05-024/02 SCT	--		--	42.00	33.00	35 mín.
Viscosidad Brookfield a 135 °C, SC4-27 6r/min, 57.5 %, (Pa·s)	ASTM D4402-15 (2022)	0.52		0.44	2243.33	17 393	3 máx.
Temperatura de falla [G*/sen δ=1.0 kPa], (°C)	ASTM D7175-15	70.10		70.20	84.20	107.00	---
Temperatura de prueba, °C		64.00		64.00	76.00	76.00	---
Módulo reológico de corte dinámico, [G*/senδ], (kPa)	ASTM D7175-15	2.13		2.30	1.97	15.90	1 mín.
Ángulo de fase [δ], (°)	ASTM D7175-15	81.00		81.1	62.60	54.30	---

⊗ Propiedades del asfalto después del envejecimiento en RTFO

Después del envejecimiento en el horno de película delgada RTFO, se obtienen nuevamente los parámetros viscoelásticos de cada cemento asfáltico, también se obtienen las muestras para el

envejecimiento en PAV y la muestra para el ensayo MSCR. En la Tabla V-5 se muestran los resultados de las pruebas después de RTFO, de los cuales se puede inferir que el asfalto con polvo de neumáticos es el que tiene un comportamiento más elástico y el que obtuvo menor pérdida de masa durante el envejecimiento a corto plazo.

Tabla V-5. Características de los asfaltos después del envejecimiento en RTFO.

Tipo de ensayo	Método de ensayo	Asfalto PG 64-22	Asfalto PG 64-22 + TB1	Asfalto modificado con polímero	Asfalto modificado con polvo de neumático	N-CMT-4-05-004/18
Pérdida de masa por calentamiento a 163 °C, (%)	ASTM D2872-22	0.66	0.66	0.39	0.28	1 máx.
Ductilidad A 25°C, 5 cm/min	ASTM D113-17	18.00	--	--	--	---
Recuperación elástica por ductilómetro a 25 °C, 10 cm, (%)	ASTM D6084-21	--	--	75.00	72.50	75 mín.
Temperatura de Falla [G*/sen $\delta=2.2$ kPa], (°C)	ASTM D7175-15	75.70	72.30	91.10	110.10	---
Temperatura de prueba, °C		64.00	64.00	76.00	76.00	---
Módulo reológico de corte dinámico, [G*/sen δ], (kPa)	ASTM D7175-15	8.99	8.18	7.18	26.00	2,2 mín.
Ángulo de fase, [δ], (°)	ASTM D7175-15	69.90	72.7	54.30	46.90	---

⊗ Propiedades del asfalto después del envejecimiento en PAV

En la Tabla V-6 se muestran los resultados de la caracterización de los cementos asfálticos después del envejecimiento en PAV, se puede constatar que, respecto a la temperatura baja para la clasificación por grado de desempeño, todos cumplieron con la temperatura baja de -22.

Después del envejecimiento a largo plazo, de acuerdo con el parámetro G*sen δ , se observa que el asfalto con menor rigidez es el asfalto con polvo de neumáticos, lo que indica que tendría menor susceptibilidad al agrietamiento por fatiga.

Tabla V-6. Características de los asfaltos después del envejecimiento en PAV.

Tipo de ensayo	Método de ensayo	Asfalto PG 64-22	ASFALTO PG 64-22 + TB1	Asfalto modificado con polímero	Asfalto modificado con polvo de neumático	N-CMT-4-05-004/18
Temperatura de prueba, ° C		25.00	25.00	31.00	31.00	
Módulo reológico de corte dinámico, $[G^* \sin \delta]$, (kPa)	ASTM D7175-15	2900.00	2630.00	1390.00	1 080	5 000 máx.
Temperatura de prueba, ° C		-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	
Rigidez en Creep, 60 s, S(t), (MPa)	ASTM D6648-08 (2016)	116.60	110.01	112.34	87.22	300 máx.
Valor m(t), 60 s, S(t), (adimensional)	ASTM D6648-08 (2016)	0.34	0.36	0.34	0.31	0,3 mín.

⊗ Resultados de la prueba Creep repetido multi-esfuerzo (MSCR)

En la Tabla V-7 se muestra los resultados de la prueba MSCR realizada a los cementos asfálticos, la cual nos permite evaluar el rendimiento esperando a la deformación permanente de los asfaltos modificados, este ensayo brinda dos parámetros: la acumulación de energía, representada como el Creep compliance no recuperable (Jnr) y la capacidad de recuperación a las deformaciones permanentes mostrada como el porcentaje de recuperación elástica (%RE), ambos parámetros son útiles para el nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) del ligante asfáltico, de acuerdo con la intensidad del tránsito y con la velocidad de operación.

Tabla V-7. Resultados de la prueba Creep Repetido Multiesfuerzo (MSCR)

Tipo de ensayo	Método de ensayo	Asfalto PG 64-22	Asfalto PG 64-22 + TB1	Asfalto PG 82E-22 (polímero)	Asfalto PG 82E-22 (polvo de neumático)	N-CMT-4-05-004/18
Temperatura de prueba, °C		64	64	76	76	
Respuesta elástica 100 Pa, (%)	ASTM D7405-20	31.16	26.85	81.02	91.99	----
Respuesta elástica 3200 Pa, (%)	ASTM D7405-20	16.62	12.60	75.8	75.05	----
Diferencia en respuesta elástica, (%)	ASTM D7405-20	46.65	53.06	6.45	18.42	----

Tipo de ensayo	Método de ensayo	Asfalto PG 64-22	Asfalto PG 64-22 + TB1	Asfalto PG 82E-22 (polímero)	Asfalto PG 82E-22 (polvo de neumático)	N-CMT-4-05-004/18
Creep Compliance Jnr100, (kPa ⁻¹)	ASTM D7405-20	0.555	0.659	0.133	0.014	----
Creep Compliance Jnr 3200, (kPa ⁻¹)	ASTM D7405-20	0.699	0.842	0.147	0.047	
Diferencia creep Compliance Jnr, (%)	ASTM D7405-20	26.1	27.87	10.46	231.9	----

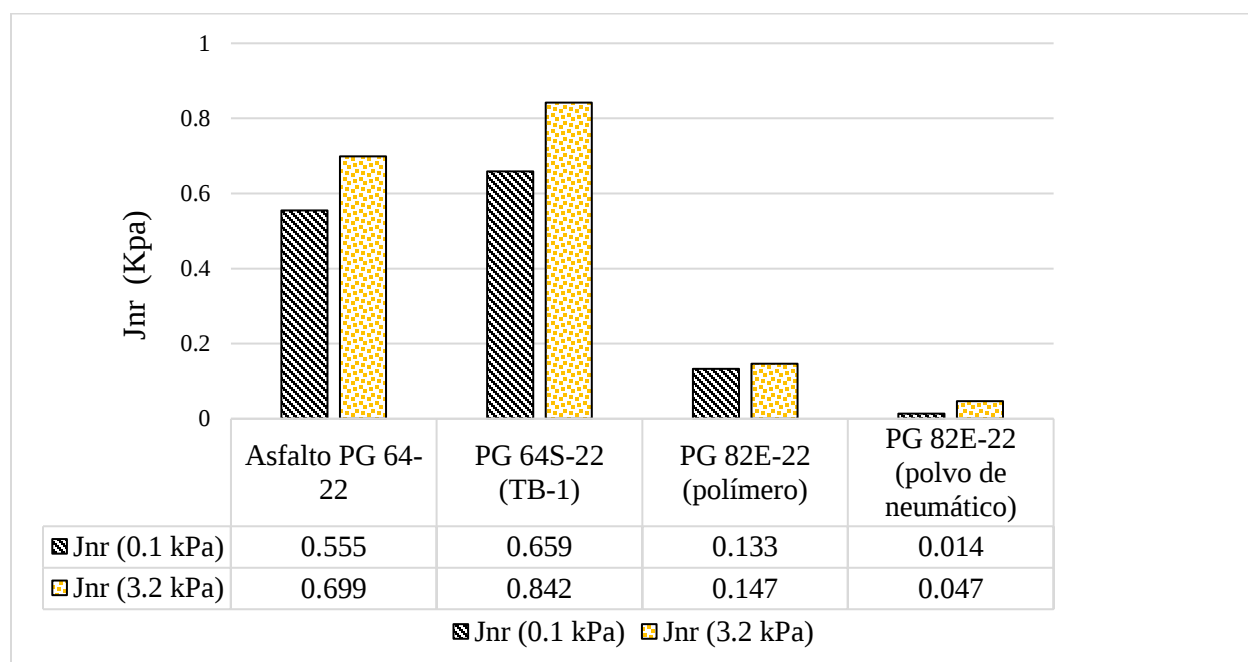


Ilustración V-1. Respuesta elástica en Creep repetido a 100 y 3200 Pa.

El ensayo MSCR se utiliza para identificar la presencia de respuesta elástica en un aglutinante y el cambio en la respuesta elástica en dos niveles de tensión diferentes, 0.1 kPa y 3.2 kPa, en la Ilustración V-1, se grafican ambos valores y aunque la diferencia de jnr es mayor en el asfalto con hule de neumáticos, también es el que tiene un valor de jnr más bajo y tiene una respuesta elástica igual al del asfalto modificado con polímero.

Se ha demostrado que el cumplimiento de la fluencia (jnr) no recuperable es un indicador de la resistencia de un ligante asfáltico a la deformación permanente bajo carga repetida, sabiendo que el valor de jnr es directamente proporcional a la deformación no recuperable en la Ilustración V-2 se grafican los valores de jnr a 3.2 kPa, en orden ascendente, de donde podemos inferir que el

asfalto con menor susceptibilidad a la deformación permanente es el asfalto con polvo de neumáticos y el asfalto más susceptible a la deformación permanente es el asfalto con aditivo para mezcla tibia.

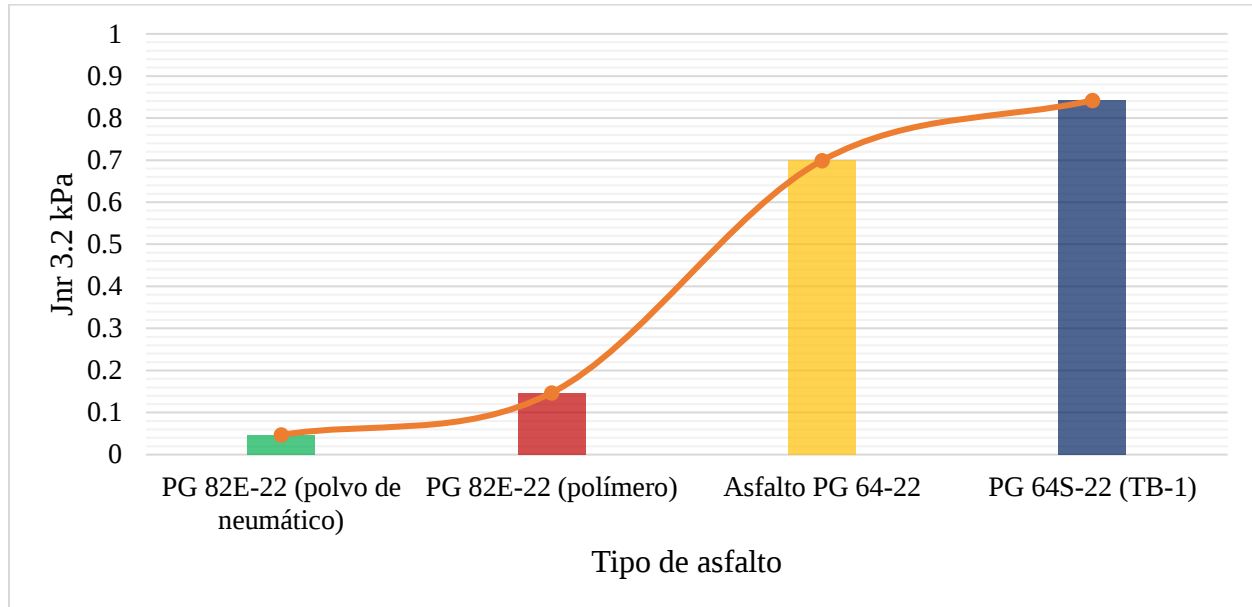


Ilustración V-2. Susceptibilidad a la deformación permanente de los cementos asfálticos.

Finalmente, Con relación a los resultados de las pruebas reológicas y el ensayo MSCR se obtiene la clasificación de los cementos asfálticos, tal como se muestra en la Tabla V-8.

Tabla V-8. Clasificación por grado PG de los cementos asfálticos.

Nomenclatura	Clasificación	% RE	Jnr 3.2 (Kpa)	Clasificación Jnr
PG 64-22	PG 64 -22	16.62	0.699	PG 64-22
PG 64-22 + TB1	PG 64-22	2.54	3.26	PG 64S-22
PG 64 -22 + polímero	PG 82-22	75.8	0.147	PG 82E-22
PG 64-22 + polvo de neumático	PG 82-22	75.05	0.047	PG 82E-22

5.1.2. Determinación de temperaturas de trabajo

Para determinar las temperaturas de mezclado y compactación del asfalto PG 64-22 sin aditivos se elaboró una curva viscosidad vs temperatura en una gráfica logarítmica (en el eje de las Y), los

rangos de temperatura de mezclado y compactación son los equivalentes a las viscosidades de 0.17 ± 0.02 Pa-s para el mezclado y 0.28 ± 0.03 Pa-s para la compactación (Asphalt Institute , 2014).

A continuación, en la Tabla V-9 se muestran las lecturas de las viscosidades de 90 a 160° y en la Ilustración V-3 se exhibe la gráfica la curva de viscosidad determinada para el asfalto 64S-22.

Tabla V-9. Viscosidades medidas de 90 a 160°C, para curva de viscosidad

Temperatura de ensayo (°C)	Velocidad de torque (r/mín.)	Viscosidad Brookfield (Pa.s)	Torque (%)	Método de ensayo
90	1	12.393	53%	ASTM D4402/D4402M-15 (2022)
100	3	4.925	63%	
110	6	2.397	61%	
120	12	1.227	63%	
130	15	0.682	44%	
140	25	0.411	44%	
150	45	0.257	49%	
160	45	0.169	33%	

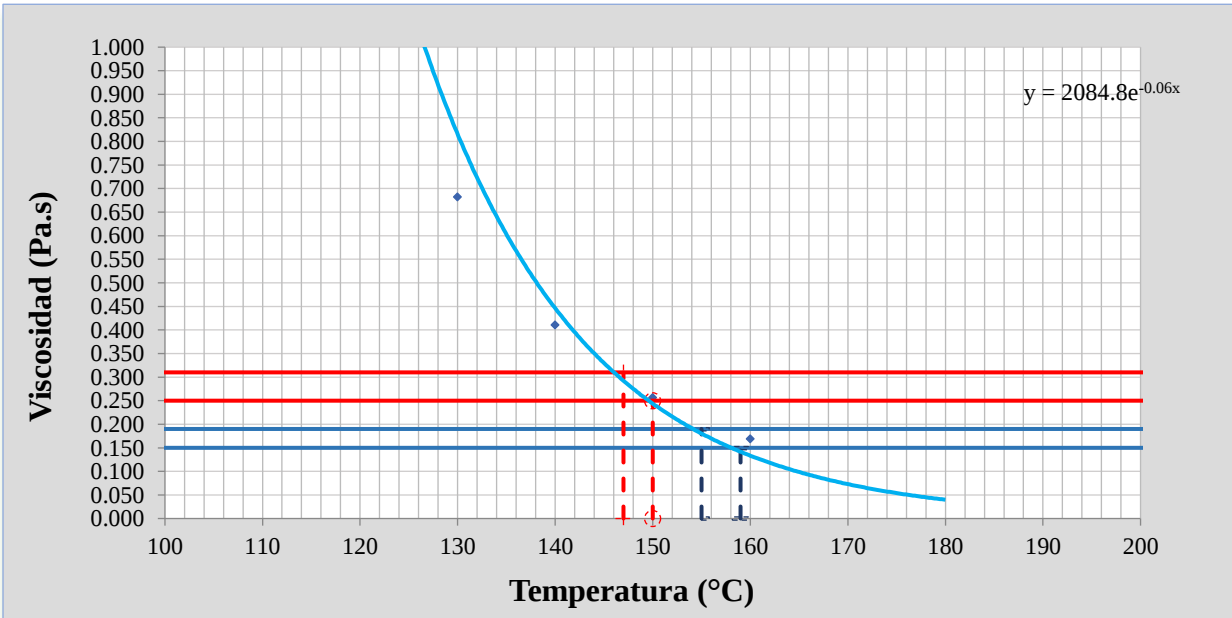


Ilustración V-3. Curva de viscosidad para asfalto 64-22.

La ecuación de la curva graficada a partir de los valores de viscosidad permite determinar las temperaturas de mezclado y compactación conforme los rangos de viscosidad para mezclado y compactación. En la Tabla V-10, se muestran los resultados, siendo un rango de 155°C a 159°C para la compactación y 147-150°C para la compactación.

Tabla V-10. Rango de temperaturas de mezclado y compactación del asfalto PG 64-22

Rango de viscosidad (Pa.s)		Rango de temperaturas (°C)	Método de VR. Convencional
Rangos de compactación asfalto	0.25 - 0.31	Temperatura de compactación	147 °C
			150 °C
Rangos de mezclado asfalto	0.15 - 0.19	Temperatura de mezclado	155 °C
			159 °C

De los valores mostrados en la Tabla V-10, en este estudio se trabajó con una temperatura de mezclado de 158°C y 148°C para la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64 -22.

⊗ Temperaturas de mezclado y compactación del asfalto modificado.

De acuerdo con el estudio realizado por Sandoval Navarro, Ruiz Zárate, Ramírez Muñoz, Villa Huerta, & Cremades Ibañez (2018) con el ensayo de Viscosidad Corte Cero (VCC), realizado en el reómetro de corte dinámico (DSR) podemos determinar las temperaturas de mezclado y compactación para asfaltos modificados, siendo el rango de viscosidades de 0.144 ± 0.02 Pa-s para el mezclado y 0.249 ± 0.03 Pa-s para la compactación.

Para determinar las temperaturas de mezclado y compactación del asfalto modificado con Terpolímero RET se realizaron barridos de frecuencia de 0.1 a 100 rad/s con un esfuerzo de 120 Pa y en un rango de temperatura de 100 a 180 °C y se determinó la Viscosidad a Corte Cero para cada temperatura, valores que se graficaron y se muestran en la Ilustración V-4. Grafica de Viscosidad a Corte Cero $\text{Log}(\eta_0)$ vs Temperatura.

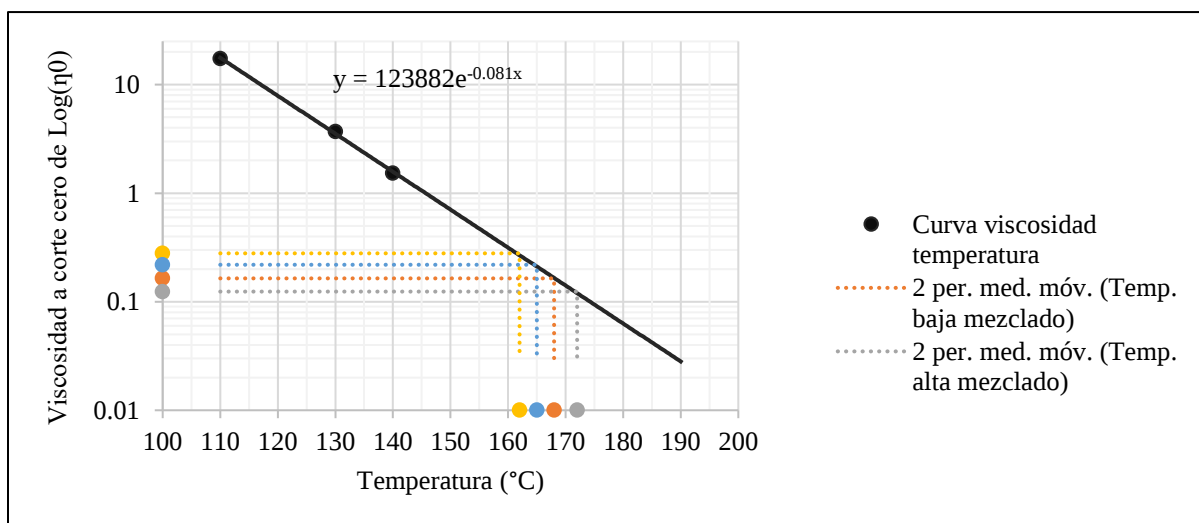


Ilustración V-4. Grafica de Viscosidad a Corte Cero $\text{Log}(\eta_0)$ vs Temperatura.

Las temperaturas calculadas conforme el rango de viscosidades para el mezclado y compactación de un asfalto modificado se muestran en la Rango de temperaturas de mezclado y compactación del asfalto PG 76E-22 de los cuales se determinó utilizar 170°C como temperatura de mezclado y 165°C como temperatura de compactación para una mezcla asfáltica en caliente elaborada con el asfalto modificado con polímero PG 82E-22.

Tabla V-11. Rango de temperaturas de mezclado y compactación del asfalto PG 76E-22

Rango de viscosidad (Pa.s)		Rango de temperaturas (°C)	Método Viscosidad Corte Cero
Rangos de Compactación asfalto	0.219 - 0.279	Temperatura de compactación	162 °C
			165 °C
Rangos de mezclado asfalto	0.124 - 0.164	Temperatura de mezclado	168 °C
			172 °C

Las mezclas asfálticas en caliente que incorporan polvo de neumáticos requieren mezclado a 175°C y compactación a 165°C, por lo tanto, fueron las temperaturas empleadas para la MAC con polvo de neumáticos.

Para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica tibia, se realizó un análisis de las características volumétricas de los especímenes a diferentes temperaturas con el contenido óptimo de asfalto obtenido para la MAC con polvo de neumáticos.

5.2.Diseño volumétrico

En este trabajo de investigación se elaboraron cinco mezclas asfálticas de granulometría densa, tres de la cuales corresponden a MAC que se establecieron como mezclas de control y dos mezclas asfálticas tibias elaboradas con asfalto PG64-22 más 2% de TB-1:

- Mezcla asfáltica en caliente con asfalto convencional (MAC Densa + PG 64S-22).
- Mezcla asfáltica en caliente con asfalto convencional + 2% de polvo de neumáticos con relación a la masa de mezcla asfáltica incorporado por vía semihúmeda (MAC Densa + 2%CR-PA).
- Mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado PG82E-22 (MAC Densa + PG 82E-22).
- Mezcla asfáltica tibia con asfalto PG 64S-22 + 2% de TB-1 + 2% de polvo de neumático con relación a la masa de mezcla asfáltica incorporado por vía semihúmeda, con temperatura de

mezclado a 135°C y temperatura de compactación 125°C (MAT Densa +2% CR -PA 135-125).

- v. Mezcla asfáltica tibia con asfalto PG 64S-22 + 2% de TB-1 + 2% de polvo de neumáticos con relación a la masa de mezcla asfáltica incorporado por vía semihúmeda, con temperatura de mezclado a 135°C y temperatura de compactación 125°C (MAT Densa +2% CR-PA 135-115).

Para cada una de las mezclas de control se realizó un diseño volumétrico y para el diseño de las mezclas asfálticas tibias, se utilizó el contenido de asfalto determinado para la mezcla de control MAC Densa + 2%CR-PA.

5.2.1. Granulometría de diseño

A partir de la granulometría de los agregados que se mostró en la Tabla V-3 se determinó el arreglo granulométrico de diseño, ajustado a los puntos de control y área restringida conforme los lineamientos establecidos en el PA-MA 01/2013 para una mezcla asfáltica de tamaño nominal de ½”; quedando compuesta con un 60% de grava ½”, 39% de arena y 1% de carbonato de calcio. Los resultados obtenidos se aprecian en la [Ilustración V-5](#).

Para las mezclas asfálticas que incorporan polvo de neumáticos, se sustituyó el 2% de finos por 2% de hule de neumáticos, respetando las fracciones granulométricas, quedando el mismo arreglo granulométrico de diseño.

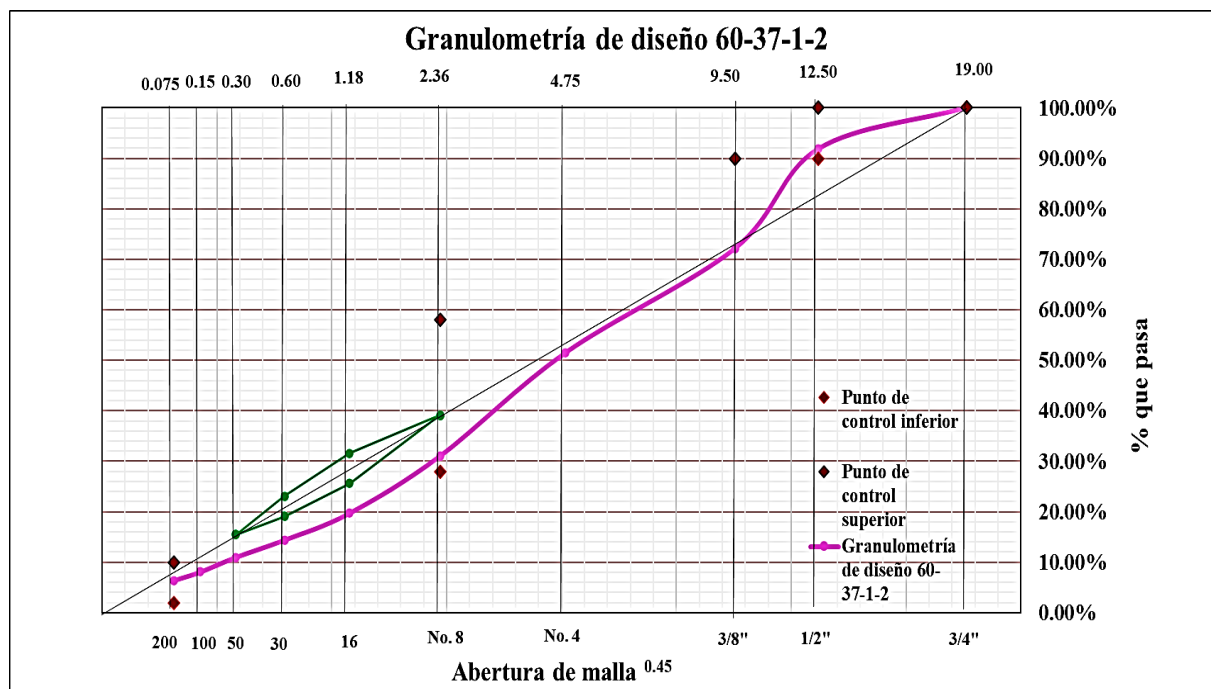


Ilustración V-5. Curva granulométrica de diseño.

5.2.2. Compactación de diseño

La compactación de los especímenes se realizó con el compactador giratorio de Superpave, con un ángulo de giro de 1.25° , una carga de 600 kPa, aplicando 125 giros de compactación, con un molde de 6" de diámetro. Las temperaturas estuvieron dadas conforme se detalla el apartado 5.1.2.

5.2.3. Contenido óptimo de ligante asfáltico

Para determinar el contenido óptimo de asfalto, se procedió a realizar un proceso iterativo con un contenido inicial de asfalto del 6% con relación a la masa de los agregados, haciendo uso de la granulometría de diseño detallada en el ítem 5.2.1, y la compactación de diseño indicada en el apartado 5.2.2, una vez fabricados los especímenes se realizó el cálculo de propiedades volumétricas y gravimétricas de las mezclas diseñadas, para determinar el contenido óptimo con el cual se cumplieran los requisitos volumétricos indicados en la Tabla IV-11. Asimismo, se fabricaron mezclas no compactadas para la determinación de la gravedad específica teórica máxima (Gmm) y se calcularon las densidades relativas del agregado (Gse), obteniéndose los siguientes resultados para cada uno de los diseños:

5.2.3.1. Diseño Mezcla asfáltica en caliente con asfalto convencional (MAC Densa + PG 64S-22).

Para este diseño se realizaron especímenes con diferentes contenidos de asfalto, partiendo del 6.0% de asfalto respecto al agregado. Se analizaron las propiedades volumétricas como el Gmb, Gmm, % Va, VAM, VFA y Dp. A continuación, en la Tabla V-12 se detallan los resultados de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente de control fabricada con asfalto PG 64S-22.

Tabla V-12. Propiedades volumétricas de la mezcla de control MAC Densa + asfalto PG 64S-22.

Gsb	Gse	Pb (%M. A)	Pb (%A. P)	Gmm (Tm/m³)	Gmb (Tm/m³)	% Va	VAM	VFA	Dp
2.652	2.692	5.7	6.0	2.478	2.355	5.0	16	69	1.3
		5.8	6.2	2.465	2.367	4.0	16	75	1.2
		6.1	6.5	2.449	2.370	3.2	16	80	1.2
Requisitos de volumetría						4.0%	14 mín.	65-75	0.6-1.2

Con base en los resultados obtenidos que se muestran en la Tabla V-12, se determinó que el contenido óptimo de asfalto para la MAC Densa + PG 64S-22 es de 6.2% con relación a la masa del agregado, dado que, con este se cumple los requisitos volumétricos para una mezcla asfáltica de granulometría densa con una intensidad de tránsito mayor de 30 millones de ejes equivalentes.

5.2.3.2. Diseño de mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado PG 82E-22

Al igual que para el diseño de la MAC Densa + PG 64S-22, para la segunda mezcla de control MAC densa con asfalto PG 82E-22 se determinaron las propiedades volumétricas elaborando especímenes con diferentes contenidos de asfalto, partiendo del 6.0% de asfalto respecto a la masa del agregado. En la Tabla V-13 se muestran los resultados de los cálculos de sus propiedades volumétricas.

Tabla V-13. Propiedades volumétricas de la mezcla de control MAC Densa + asfalto PG 82E-22.

Gsb	Gse	Pb (%M. A)	Pb (%A. P)	Gmm (Tm/m³)	Gmb (Tm/m³)	% Va	VAM	VFA	Dp
2.652	2.695	5.7	6.0	2.476	2.335	5.7	17	66	1.3
		6.0	6.4	2.454	2.356	4.0	17	75	1.2
		6.1	6.5	2.452	2.362	3.7	16	78	1.2
Requisitos de volumetría						4.0%	14 mín.	65-75	0.6-1.2

Como se puede apreciar en la Tabla V-13 el contenido óptimo de asfalto para la MAC Densa + PG 82E-22, corresponde al **6.4%**, con el cual se obtuvo un 4.01% de vacíos, el VAM mayor al 14%, el VFA entre el rango de 65-75 y un Dp entre 0.6 y 1.2.

5.2.3.3. Diseño de la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64S - 22 que incorpora 2% de polvo de neumático por vía semihúmeda (MAC Densa + 2% CR-PA)

Para el diseño de la MAC que incorpora polvo de NFU mediante un proceso semihúmedo, se elaboró inicialmente especímenes con un contenido de asfalto de 6.0% con relación a la masa de los agregados, una vez calculada las propiedades volumétricas, se observó que era necesario reducir el contenido de asfalto, por lo cual se realizaron especímenes con un contenido de 5.6%, los resultados de las propiedades volumétricas se muestran en la Tabla V-14.

Tabla V-14. Propiedades volumétricas de la mezcla de control MAC Densa con asfalto PG 64-22 + 2% de polvo de neumáticos pretratado y activado (CR-PA).

<i>Gsb</i>	<i>Gse</i>	<i>Pb</i> (%M. A)	<i>Pb</i> (%A. P)	<i>Gmm</i> (Tm/m³)	<i>Gmb</i> (Tm/m³)	% Va	VAM	VFA	<i>Dp</i>
2.652	2.648	5.3	5.6	2.443	2.342	4.1	16	75	1.2
		5.7	6.0	2.430	2.356	3.0	16	81	1.1
Requisitos de volumetría						4.0%	14 mín.	65-75	0.6-1.2

Como se puede constatar en la Tabla V-14 el contenido óptimo de asfalto para la mezcla de control MAC Densa + 2% CR-PA fue del **5.6%**.

5.2.3.4. Diseño de mezcla asfáltica tibia que incorpora polvo de neumáticos por vía semihúmeda (MAT Densa + CR-PA)

Para el diseño de la mezcla asfáltica tibia que incorpora hule de neumáticos pretratado y activado, se utilizó el asfalto base con grado PG 64-22 con 2% de TB-1. El contenido de asfalto determinado para la mezcla de control MAC Densa + 2% CR-PA, el cual fue de 5.6% se empleó también para la mezcla asfáltica tibia.

En el caso de la mezcla asfáltica tibia el objetivo de determinar las temperaturas de mezclado y compactación que cumpliera con los parámetros volumétricos, para ello se realizaron especímenes a diferentes temperaturas. A continuación, en la Tabla V-15 se muestran los resultados de los cálculos de las propiedades volumétricas y en la Ilustración V-6 se graficaron los contenidos de vacíos de aire en función de la temperatura.

Tabla V-15. Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas tibias (MAT) con aditivo TB-1, con 2% de polvo de neumáticos y 5.6% de contenido de asfalto a diferentes temperaturas.

T. °. de mezclado (°C)	T. °. de Compactación (°C)	Gsb	Gse	Pb (%M. A)	Pb (%A. P)	Gmm (Tm/m³)	Gmb (Tm/m³)	% Va	VAM	VFA	Dp
175	165	2.652	2.657	6.1	6.5	2.422	2.354	2.8	17	83	1.1
165	155			5.3	5.6	2.445	2.348	3.8	16	76	1.2
155	145			5.3	5.6	2.442	2.350	3.5	16	78	1.2
145	135			5.3	5.6	2.429	2.348	3.3	16	79	1.2
135	125			5.3	5.6	2.437	2.329	4.4	17	74	1.2
125	115			5.3	5.6	2.431	2.336	3.9	17	77	1.2
115	105			5.3	5.6	2.434	2.331	4.2	17	75	1.2
Requisitos de volumetría								4.0%	14 mín.	65-75	0.6-1.2

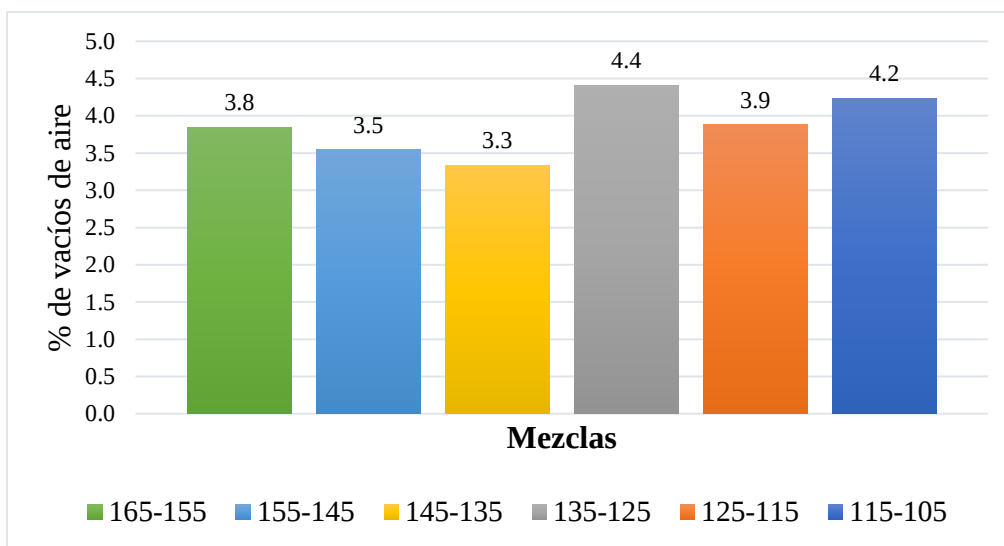


Ilustración V-6. Porcentaje de vacíos de aire obtenido para las MAT + CR a diferentes temperaturas.

Se puede verificar en la Tabla V-15 y en la Ilustración V-6 que, se logró reducir la temperatura de mezclado hasta 115 °C y la temperatura de compactación hasta 105 °C, cumpliendo con los parámetros volumétricos, a excepción del VFA el cual solamente con las temperaturas de mezclado a 135°C y 115°C se logra cumplir con el rango recomendado para un tránsito mayor a treinta millones de ejes equivalentes, por lo tanto, para la evaluación de la mezcla en este estudio, se seleccionó 135°C como temperatura de mezclado y se evaluó con una temperatura de compactación de 125°C y 115°C.

5.3.Evaluación de las propiedades de las mezclas asfálticas

5.3.1. Resistencia al daño inducido por humedad, AASHTO T 283 (TSR)

Se fabricaron seis especímenes para cada una de las mezclas, tres de los cuales se sometieron a condiciones de saturación, congelamiento y descongelamiento, a fin de evaluar la resistencia al daño inducido por humedad mediante la relación del esfuerzo a la tracción indirecta de los especímenes acondicionados con los especímenes no acondicionados, a continuación, en la Tabla V-16 , Ilustración V-7 e Ilustración V-8 se presentan los resultados de la prueba.

En la Tabla V-16 se indican los promedios de carga máxima promedio y esfuerzo promedio tanto en condición húmeda como en seco para cada uno de los grupos, asimismo se presenta el % TSR. De acuerdo con los resultados se observa que la temperatura de compactación es un factor directamente proporcional al esfuerzo a tensión indirecta de la mezcla tibia en condición húmeda, conforme se disminuye la temperatura de compactación, disminuye la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo de TSR.

Tabla V-16. Resultados de ensayo resistencia de la mezcla asfáltica compacta al daño inducido por humedad.

<i>Variable</i>	<i>Promedio de Carga en seco (kN)</i>	<i>Promedio de Carga húmedo (kN)</i>	<i>Promedio de esfuerzo seco (kPa)</i>	<i>Promedio de esfuerzo húmedo (kPa)</i>	<i>% TSR</i>
<i>MAC Densa + PG 64-22</i>	5.67	5.44	586	560	96%
<i>MAC Densa +2% CR-PA</i>	6.36	5.67	660	589	89%
<i>MAC Densa + PG 82E-22</i>	8.41	8.10	860	825	96%
<i>MAT Densa + 2% CR-PA (135-125)</i>	5.19	4.55	544	476	87%
<i>MAT Densa + 2% CR-PA (135-115)</i>	5.64	4.61	592	484	82%

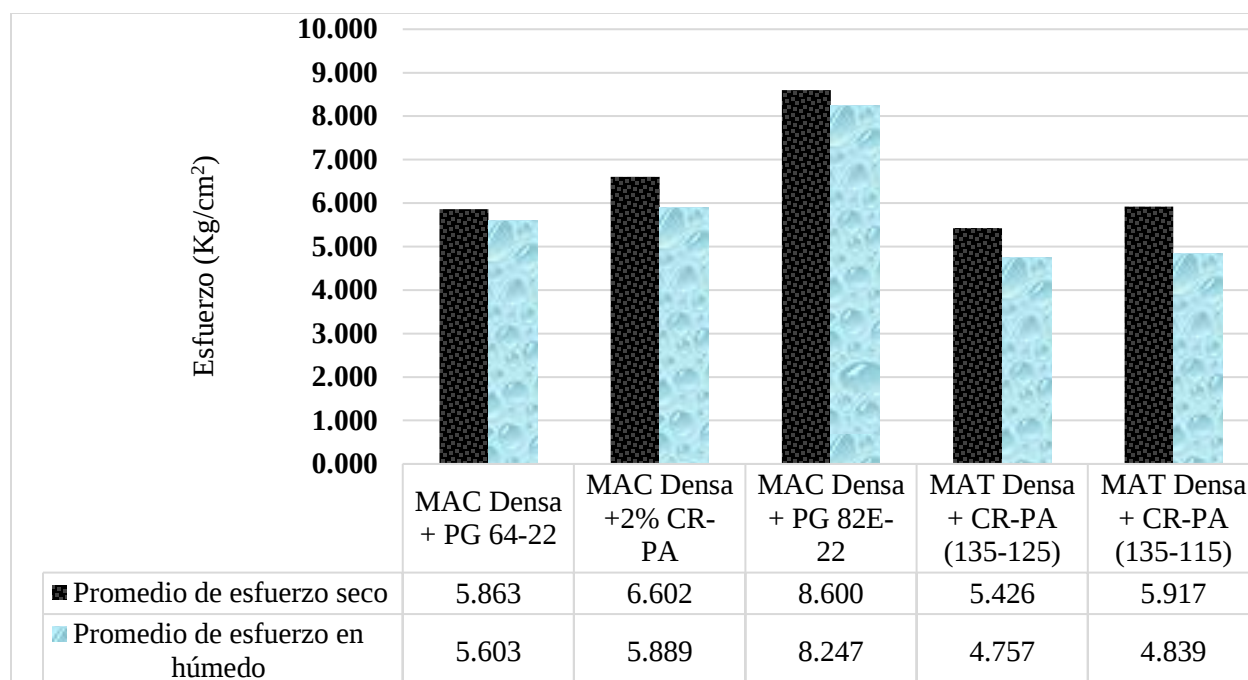


Ilustración V-7. Gráfica del promedio de los esfuerzos en seco y húmedo de cada mezcla en estudio.

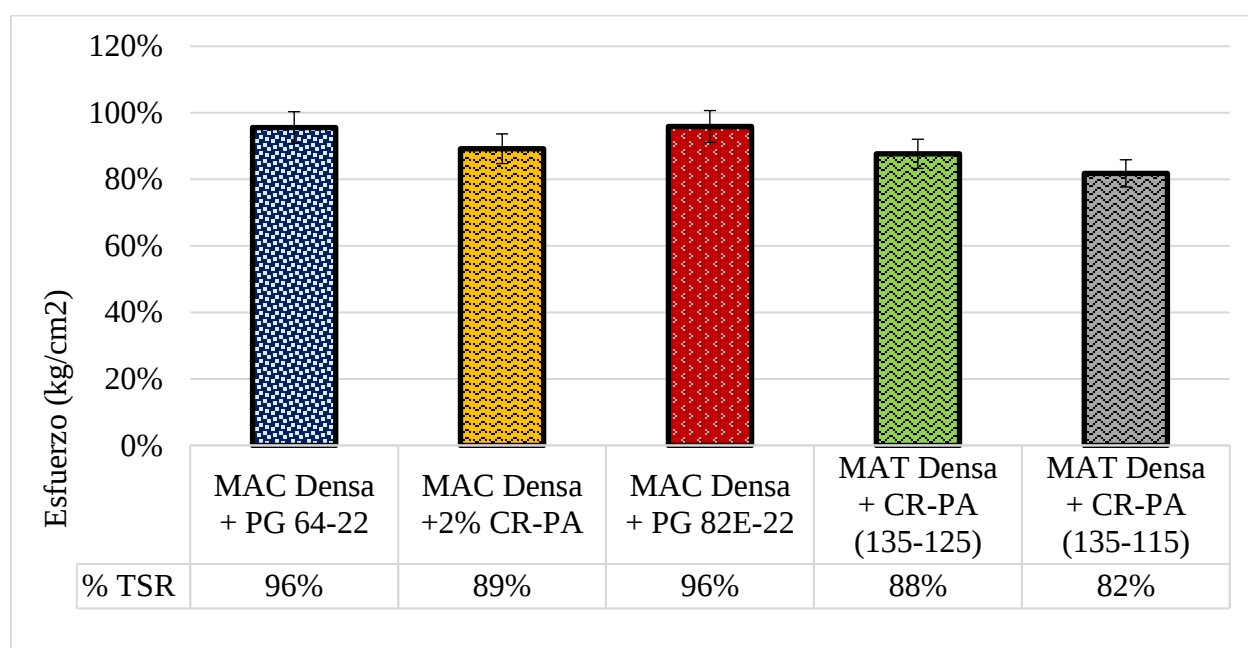


Ilustración V-8. Comparación de los resultados de TSR de las mezclas asfálticas.

La carga soportada y por ende el esfuerzo en condición seca de las mezclas asfálticas tibias con relación a la mezcla de control MAC Densa + PG 64-22 fue prácticamente igual, sin embargo, en condición húmeda el esfuerzo de las mezclas asfálticas disminuye. Con relación a la mezcla de control MAC Densa +2%CR-PA, el esfuerzo en seco de las mezclas asfáltica tibias disminuyó un

12%, en condición húmeda la diferencia es de un 20%. La MAC densa + asfalto PG 82E-22, es la que soportó mayores cargas en condición seca y húmeda.

Como se puede observar en la Ilustración V-8, tanto las mezclas en caliente como las mezclas asfálticas tibias a las cuales se les incorporó hule de neumáticos obtuvieron valores de resistencia al daño inducido por humedad superiores al 80%, siendo este el requisito de cumplimiento del protocolo AMAAC.

5.3.2. Resistencia a la Deformación permanente (DP)

5.3.2.1. Ensayo Rueda Cargada de Hamburgo para mezclas asfálticas compactas (AASHTO T 324)

Para la evaluación a la deformación permanente mediante el ensayo rueda cargada de Hamburgo se fabricaron 4 probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 60 mm de espesor que se compactaron a un porcentaje de vacíos de aire de 7 ± 1 . En la Tabla V-17 se observan los resultados para cada una de las variables en estudio. Es importante mencionar que todas las mezclas evaluadas se encuentran con valores de deformación dentro del parámetro recomendado, siendo de 10 mm transcurridos veinte mil pasadas.

Tabla V-17. Resultados del ensayo rueda cargada de Hamburgo para la evaluación de la Deformación permanente de las mezclas asfálticas.

<i>Pasadas</i>	<i>MAC Densa + PG 64-22</i>	<i>MAC Densa +2% CR-PA</i>	<i>MAC Densa + PG 82E-22</i>	<i>MAT Densa + 2% CR-PA 135-125</i>	<i>MAT Densa + 2% CR-PA 135-115</i>
1 000	1.52	0.83	1.06	2.03	1.41
5 000	3.16	1.53	1.89	3.39	2.52
10 000	4.49	2.03	2.34	4.41	3.27
15 000	5.70	2.36	2.57	5.43	4.19
20 000	7.11	2.59	2.72	6.54	6.23

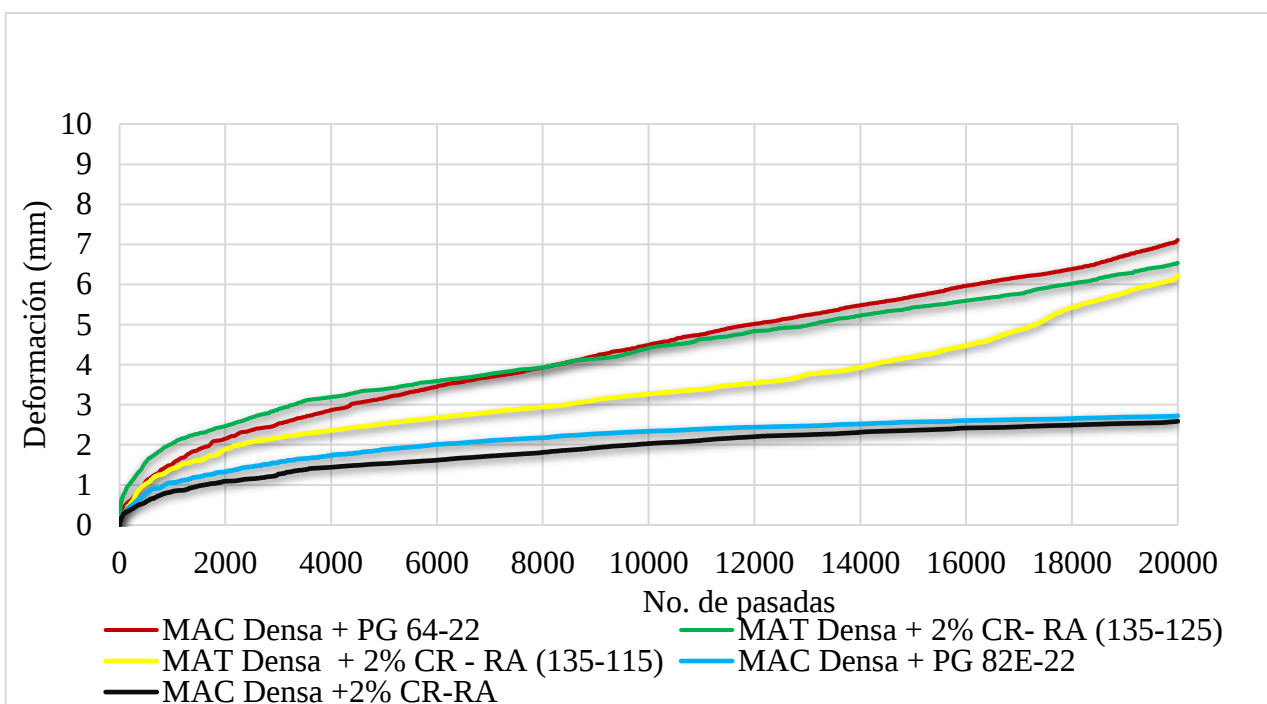


Ilustración V-9. Gráfica comparativa de los resultados obtenidos del ensayo rueda cargada de Hamburgo.

En la Ilustración V-9 se puede apreciar que la mezcla que obtuvo una menor deformación durante las 20000 pasadas de la rueda cargada de Hamburgo fue la MAC que incorpora hule de neumáticos pretratado y activado mediante un proceso semihúmedo. Asimismo, se puede observar que la mezcla con mayor deformación es la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64S-22 por otro lado, es importante mencionar, que las mezclas asfálticas tibias obtuvieron una deformación inferior a la de la mezcla de control con asfalto convencional.

Al igual que en la evaluación de resistencia al daño inducido por humedad, en la Ilustración V-9 se puede apreciar que la temperatura es un factor determinante y directamente proporcional a la deformación permanente de las mezclas, las mezclas asfálticas tibias se deformaron 4 mm más que la mezcla asfáltica de control MAC + 2% CR-PA.

5.3.2.2. Número de flujo de la mezcla asfáltica usando el Probador de rendimiento de mezclas asfálticas (AMPT) (AASHTO T 378-17)

Los resultados del ensayo número de flujo se presentan en la Ilustración V-10, la MAC modificada con polvo de neumáticos y la MAC modificada con polímeros fueron las que presentaron menor deformación 6,000 y 7,000 $\mu\epsilon$ respectivamente a los 10 mil ciclos de carga, la MAT elaborada a 135°C y compactada 125°C presentó una deformación de 11,500 $\mu\epsilon$ y la MAC con asfalto PG 64

-22 una deformación de 14,500 $\mu\epsilon$ y la MAT elaborada a 135°C y compactada a 115°C obtuvo una deformación de 13,000 $\mu\epsilon$ a los 6 mil ciclos de carga.

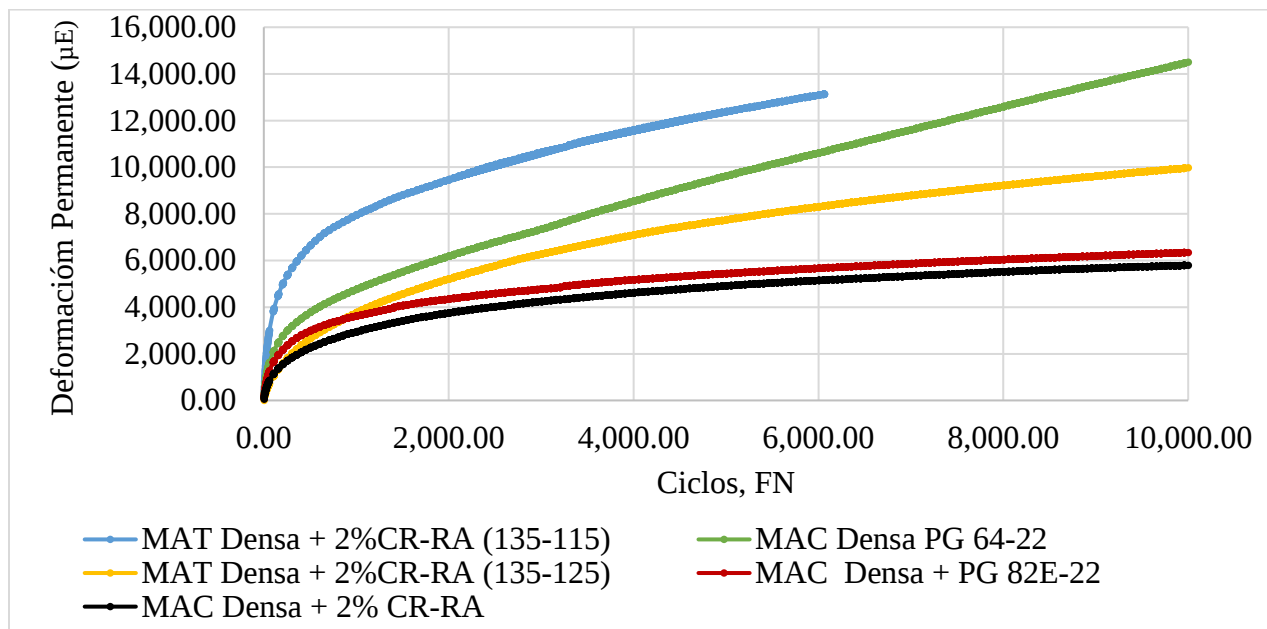


Ilustración V-10. Deformación permanente acumulada determinada mediante el ensayo número de flujo.

5.3.3. Módulo Resiliente (MR)

Los resultados de las mediciones de módulo resiliente o módulo de rigidez se muestran en la Tabla V-18, donde se muestran los módulos promedio de cada una de las variables en estudio.

Tabla V-18. Lectura de módulo resiliente de cada uno de los especímenes.

Variable	MAC Densa + PG 64-22	MAC Densa +2% CR-PA	MAC Densa + PG 82E-22	MAT Densa + 2% CR-PA (135-125)	MAT Densa + 2% CR-PA (125-115)
MR	3500	5705	4285	4200	3816

En la Ilustración V-11. Módulo Resiliente promedio de cada una de las mezclas., se muestran los MR promedio obtenidos para cada variable, en la cual se puede apreciar que la mezcla con mayor módulo de rigidez a una temperatura de 20°C y con un esfuerzo aplicado de 350 kPa, fue la MAC Densa + 2% CR-PA.

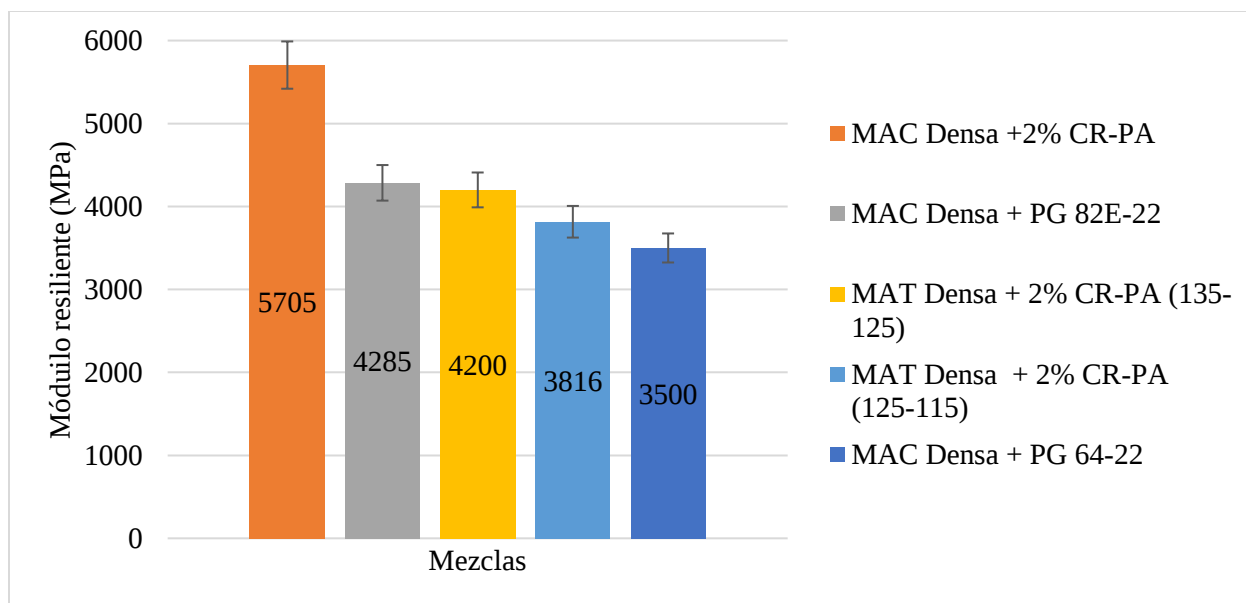


Ilustración V-11. Módulo Resiliente promedio de cada una de las mezclas.

Se determinaron los módulos resilientes en dos mezclas asfálticas tibias de granulometría densa que incorporan 2% de polvo de neumáticos por vía semihúmeda, en las cuales se diferencian entre sí por la temperatura de compactación; una se compactó a 125°C y otra a 115°C y también se determinaron los módulos resilientes de tres mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa; una elaborada con asfalto PG 64-22 con una temperatura de mezclado de 158°C, la segunda se elaboró con asfalto modificado con polímero con temperatura de mezclado de 175°C y la tercera se elaboró con asfalto PG 64-22 incorporándole 2% de polvo de neumáticos por vía semihúmeda a una temperatura de mezclado de 180°C.

La mezcla asfáltica tibia mezclada a 135°C y compactada a 125°C presenta un módulo de 4200 MPa, lo cual equivale a un 74% del módulo de la MAC que incorpora polvo de neumáticos, un 98% del módulo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros y un 20% superior al de la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22.

La mezcla asfáltica tibia mezclada a 135°C y compactada a 115°C presenta un módulo de 3816 MPa, lo cual equivale a un 67% del módulo de la MAC que incorpora polvo de neumáticos, un 89% del módulo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros y un 9% superior al de la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22.

5.3.4. Módulo Dinámico (MD)

Las Ilustración V-12, Ilustración V-13 e Ilustración V-14 muestran los valores de módulo dinámico obtenidos para las mezclas en estudio, a una temperatura de 10°C, 20°C y 30°C a frecuencias de 0.1Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 5 Hz y 10 Hz, graficados en orden ascendente de frecuencias y en orden ascendente conforme el valor obtenido por las variables en estudio.

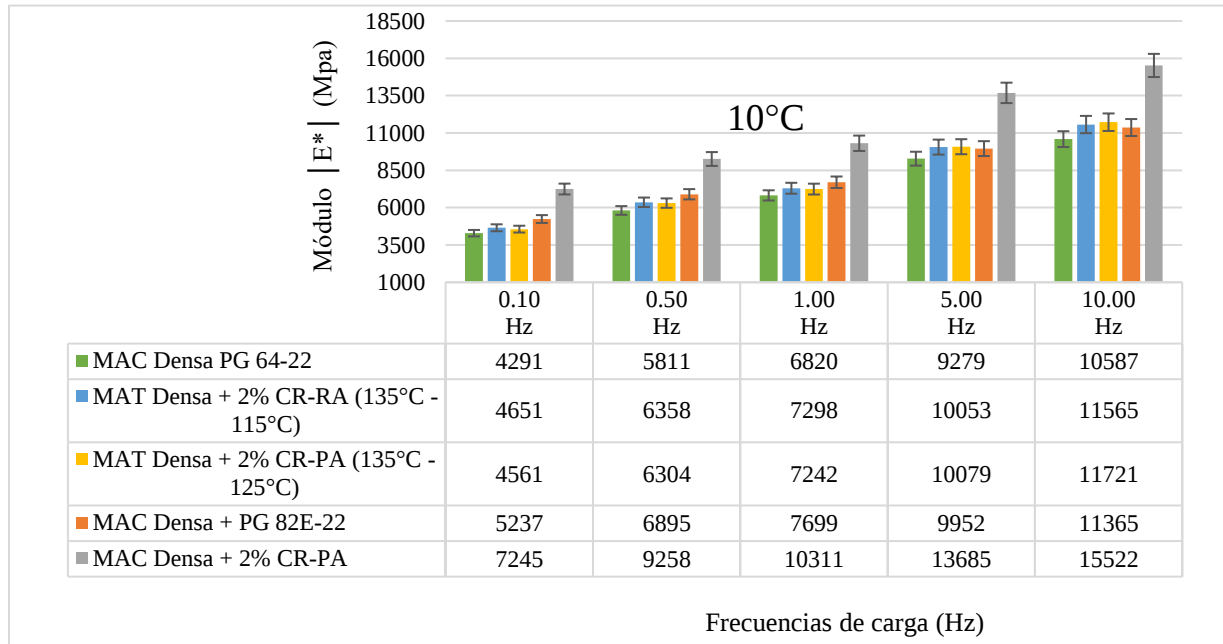


Ilustración V-12. Resultados de módulo dinámico a 10°C.

En la Ilustración V-12 se muestran los resultados de módulo dinámico de las mezclas asfálticas determinados a una temperatura de 10°C y frecuencias de 0.1Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 5 Hz y 10 Hz, donde se puede apreciar que las mezclas asfálticas tibias presentan una relación esfuerzo deformación muy similar entre ambas en todas las frecuencias, superior al de una mezcla asfáltica en caliente elaborada con asfalto PG 64-22 e inferior al de la mezcla asfáltica en caliente elaborada con asfalto PG 64-22 más 2% de CR-PA.

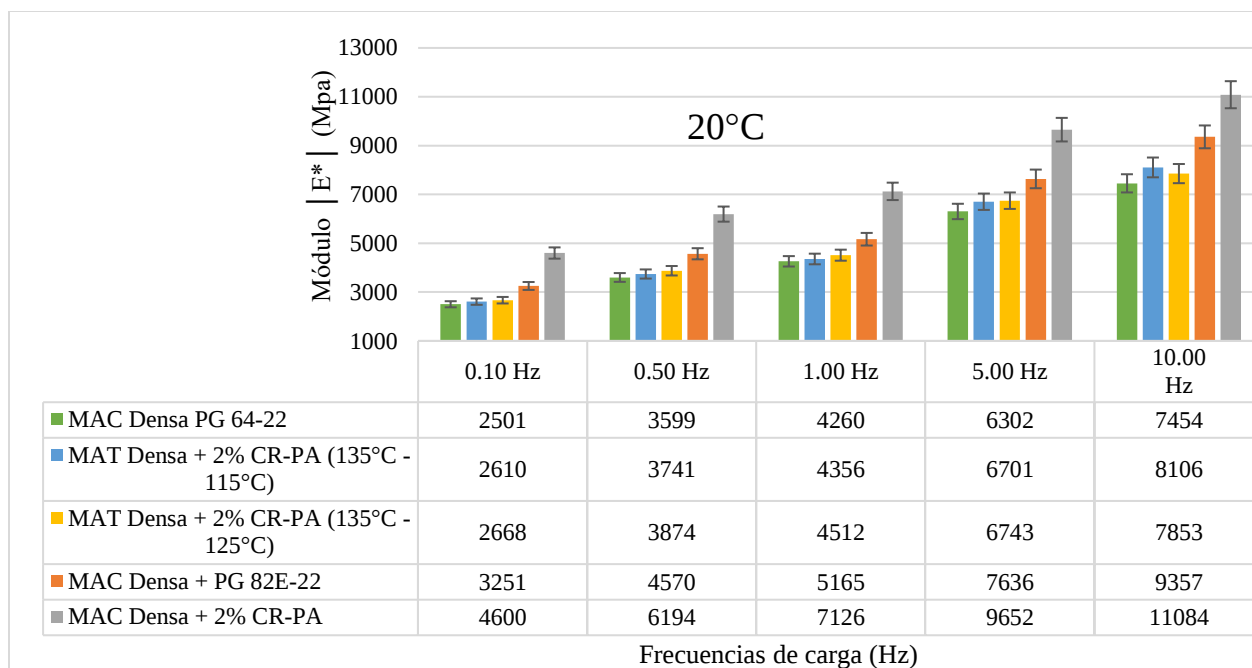


Ilustración V-13. Resultados de módulo dinámico a 20°C.

En la Ilustración V-13, se muestran los valores de la relación esfuerzo deformación de las variables en estudio obtenidos a una temperatura de prueba de 20°C y frecuencias de 0.10 HZ, 0.50Hz, 1.0Hz, 5 Hz y 10 Hz; en este gráfico se puede observar que las mezclas asfálticas tibias obtuvieron módulos superiores al de la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22 e inferiores al de la mezcla asfáltica en caliente con CR-PA; en comparación con la mezcla asfáltica con asfalto PG 82E-22, los módulos fueron inferiores pero se puede observar que es menor la diferencia en comparación con la MAC + 2% CR-PA.

Con una temperatura de acondicionamiento de 20°C las dos mezclas asfálticas tibias obtuvieron valores de módulo muy similares, siendo las diferencias entre ellas no mayores al 4% y corresponden entre el 80 y 88% de los valores de módulos resultantes para la mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros y entre un 5 y 8% superiores a los de módulos de la MAC con asfalto PG 64-22. En relación con la mezcla asfáltica en caliente con CR, los módulos de las mezclas asfálticas tibias obtuvieron entre el 57% y 74% de los resultados obtenidos para la MAC que incorpora polvo de neumáticos por vía semihúmeda.

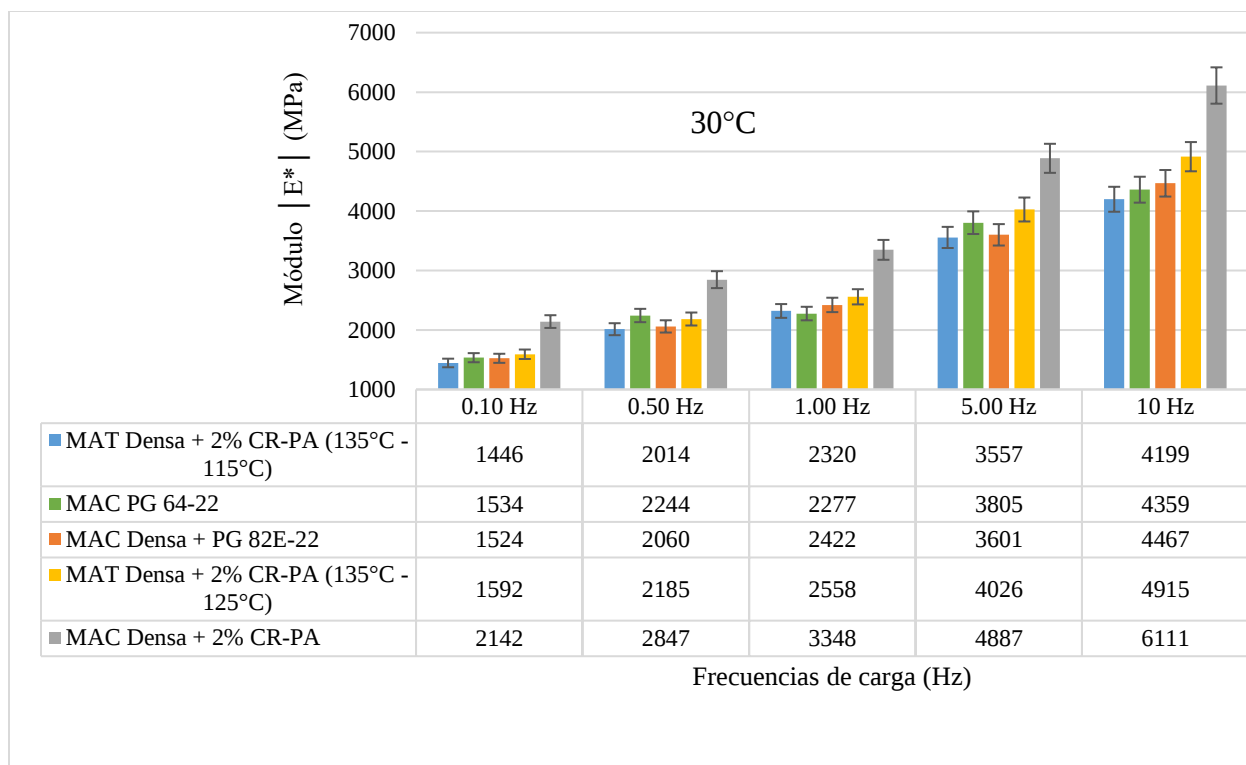


Ilustración V-14. Resultados de módulo dinámico a 30°C.

En la Ilustración V-14, se observan los módulos obtenidos de las mezclas en estudio cuando el ensayo se realizó a una temperatura de 30°C y frecuencias de 0.1Hz, 0.5Hz, 1.0 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz; en todas las combinaciones se puede apreciar que la MAT Densa +2% CR-PA que se mezcló a 135°C y compactó a 125 °C presentó módulos superiores al de una mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22 y a una MAC Densa elaborada con asfalto PG 82E-22 e inferior al de la MAC Densa +2% de CR-PA.

La mezcla asfáltica tibia +2% CR-PA, con una temperatura de mezclado a 135°C y temperatura de compactación de 115°C resultó con menor módulo en comparación a las demás variables, lo cual indica que un incremento de temperatura en el acondicionamiento de ensayo aunado a una reducción de temperatura en la compactación de la MAT, si afectó la relación esfuerzo-deformación.

5.3.4.1. Comportamiento de las mezclas a diferentes frecuencias a una temperatura de 20°C.

El protocolo AMAAC, propone el módulo dinámico obtenido a una temperatura de 20°C y frecuencia de 10HZ, como parámetro de entrada para el diseño de la mezcla asfáltica de una

estructura de pavimento, sin embargo, las diferentes frecuencias están directamente relacionadas con las cargas aplicadas a la estructura, por ello, se determinaron las ecuaciones de regresión lineal de los módulos obtenidos a una temperatura de 20°C para evaluar la susceptibilidad de las mezclas al cambio de módulo conforme cambian las frecuencias de carga.

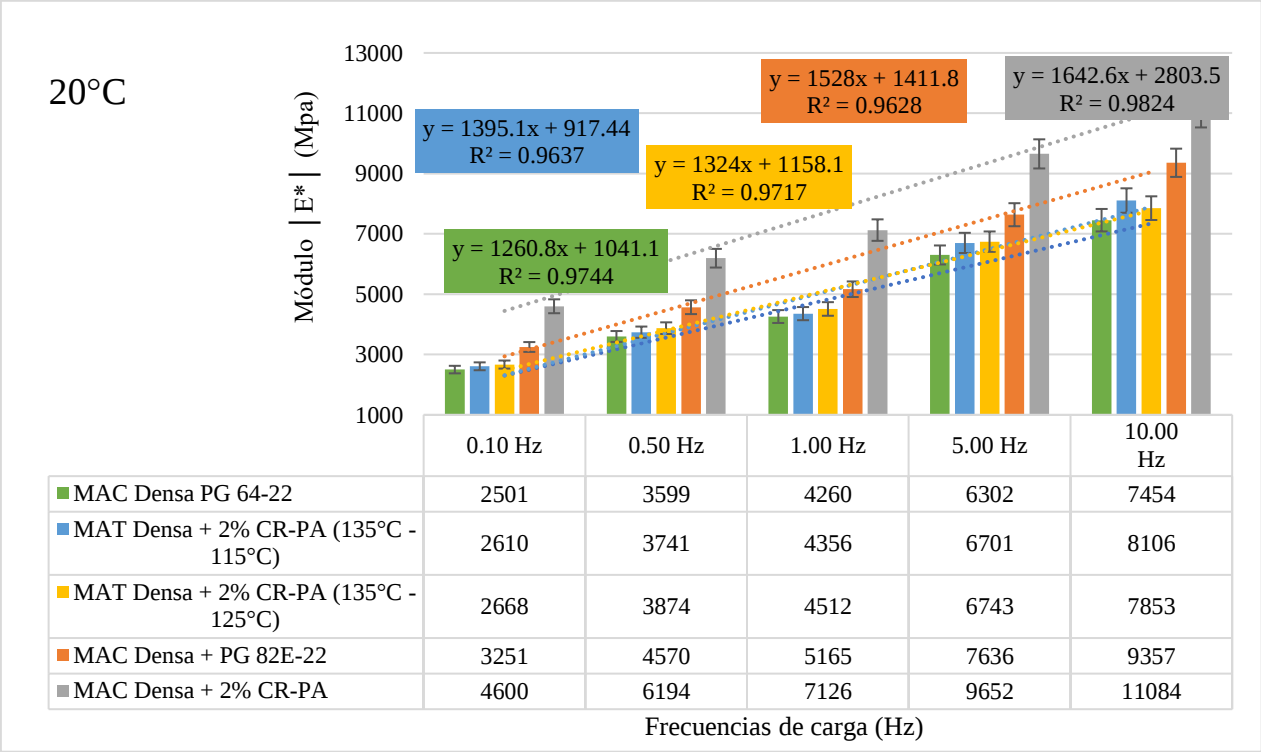


Ilustración V-15. Ecuaciones de regresión de los valores de módulo a diferentes frecuencias a 20°C.

En la Ilustración V-15 se muestran las ecuaciones de regresión lineal para cada una de las variables en estudio, para módulos obtenidos a una temperatura de 20°C y frecuencias de 0.1 Hz, 0.50 Hz, 1.0 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, de las cuales se puede observar que las mezclas asfálticas tibias obtuvieron menores módulos que las MAC Densa + PG 82E-22 y que la MAC Densa + 2% CR-PA, no obstante, la tendencia de los datos tiene una pendiente menor, lo cual indica que los módulos tienen menor susceptibilidad al cambio de frecuencias.

5.3.4.2.Comportamiento de las mezclas a diferentes temperaturas a una frecuencia de 10Hz.

Con el objetivo de evaluar la influencia de las temperaturas en el módulo dinámico de las mezclas en estudio, se determinaron las ecuaciones de regresión de las variables en estudio, de los valores

de módulo obtenidos a una frecuencia de 10Hz con las tres temperaturas que se realizó el ensayo a 10°C, 20° y 30°C.

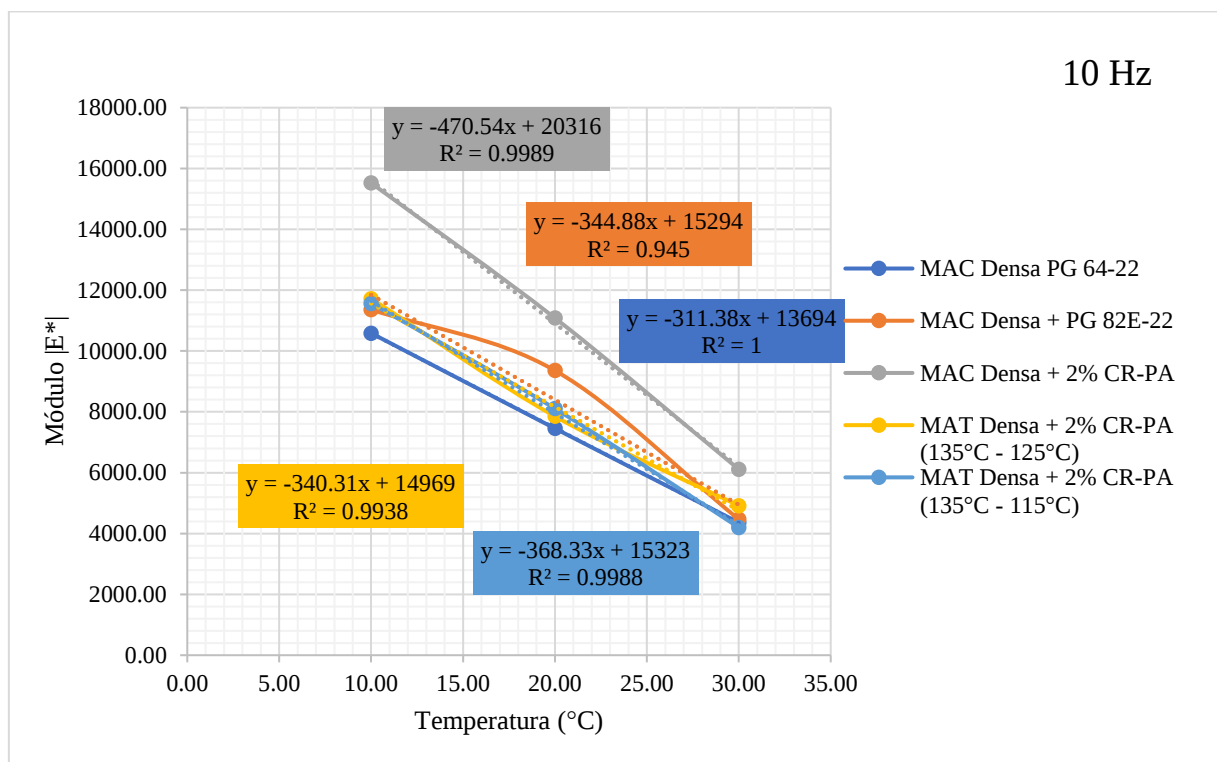


Ilustración V-16. Ecuaciones de regresión de resultados de módulo a temperatura de 10°C, 20°C y 30°C a una frecuencia de 10 Hz.

En la Ilustración V-16., se puede observar que a una frecuencia de 10 Hz y una temperatura de 10°C y 30°C los módulos dinámicos de las MAT son muy similares al de una MAC Densa + PG 82E-22 , únicamente cuando la temperatura de prueba fue de 20°C, se aprecia un mayor módulo de la MAC Densa + PG 82E-22, incluso a una temperatura de prueba de 30°C el módulo de la MAT Densa + 2% de CR-PA elaborada a 135°C y compactada a 125°C fue superior.

Las ecuaciones de regresión permiten evaluar la influencia de la temperatura en el módulo de la mezcla, cuando el ensayo se realizó a una frecuencia de 10Hz, podemos verificar que la MAC Densa + 2% CR-PA es la que tiene mayores módulos en todas las temperaturas pero asimismo es la de mayor pendiente, por lo tanto, esto indica que el módulo es más susceptible al incremento de temperaturas, en cambio las MAT, tienen una menor pendiente, la MAT Densa + 2% de CR-PA elaborada a 135°C y compactada a 125°C tiene una menor pendiente que las dos mezclas asfálticas

en caliente de control MAC Densa + PG 82E-22 y la MAC Densa +2% CR-PA, lo cual indica que la relación esfuerzo deformación tiene menor susceptibilidad al cambio de temperatura.

5.3.5. Fatiga bajo carga repetida de las mezclas, utilizando el ensayo de tracción indirecta (ITT).

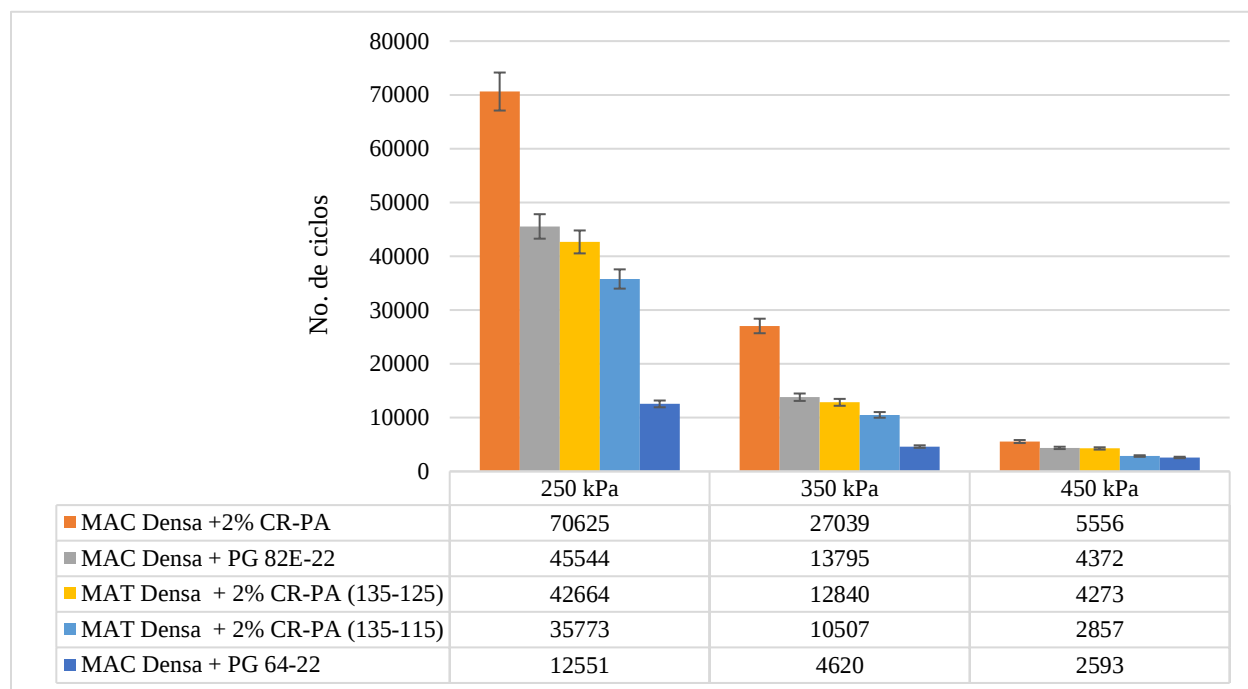


Ilustración V-17. Número de ciclos de carga hasta la rotura vs esfuerzos aplicados.

En la Ilustración V-17 se muestran los resultados de fatiga bajo carga repetida de las mezclas, utilizando el ensayo de tracción indirecta (ITT), todas las probetas se llevaron a la falla con los diferentes esfuerzos de carga, para determinar su resistencia a la fatiga, la mezcla asfáltica tibia fabricada a 135°C y compactada a 125°C, obtuvo un comportamiento muy similar al de la MAC con asfalto PG 82E-22, la MAT compactada a 115°C resistió menos ciclos de carga, sin embargo, con 250 kPa y 350 kPa duplicó los ciclos de carga de la MAC con asfalto PG 64-22. la MAC con CR es la que resistió más ciclos de carga antes de llegar a la fractura, seguido de la MAC Densa + PG 82E-22.

Con un esfuerzo de 250 kPa, con relación a la MAC con un asfalto PG 64-22, la MAT con polvo de neumático compactada a 125°C fue superior en un 340% y cuando se compacto a 115°C en un 285%.

Con un esfuerzo de 350 kPa, con relación a la MAC con un asfalto PG 64-22, la MAT con polvo de neumático compactada a 125°C fue superior en un 278% y cuando se compacto a 115°C en un 227%.

Con un esfuerzo de 450 kPa, con relación a la MAC con un asfalto PG 64-22, la MAT con polvo de neumático compactada 125°C fue superior en un 165% y cuando se compacto a 115°C en un 110%.

5.3.5.1. Obtención de ecuaciones de fatiga

Para la obtención de las ecuaciones de fatiga se realizaron con relación a los esfuerzos con que se realizó el ensayo, para ellos se graficó el logaritmo de los tres esfuerzos aplicados en el eje de las x y el logaritmo del número de ciclos promedio que llevo a la fractura de las probetas, a fin de obtener los coeficientes de regresión de las distintas variables en estudio.

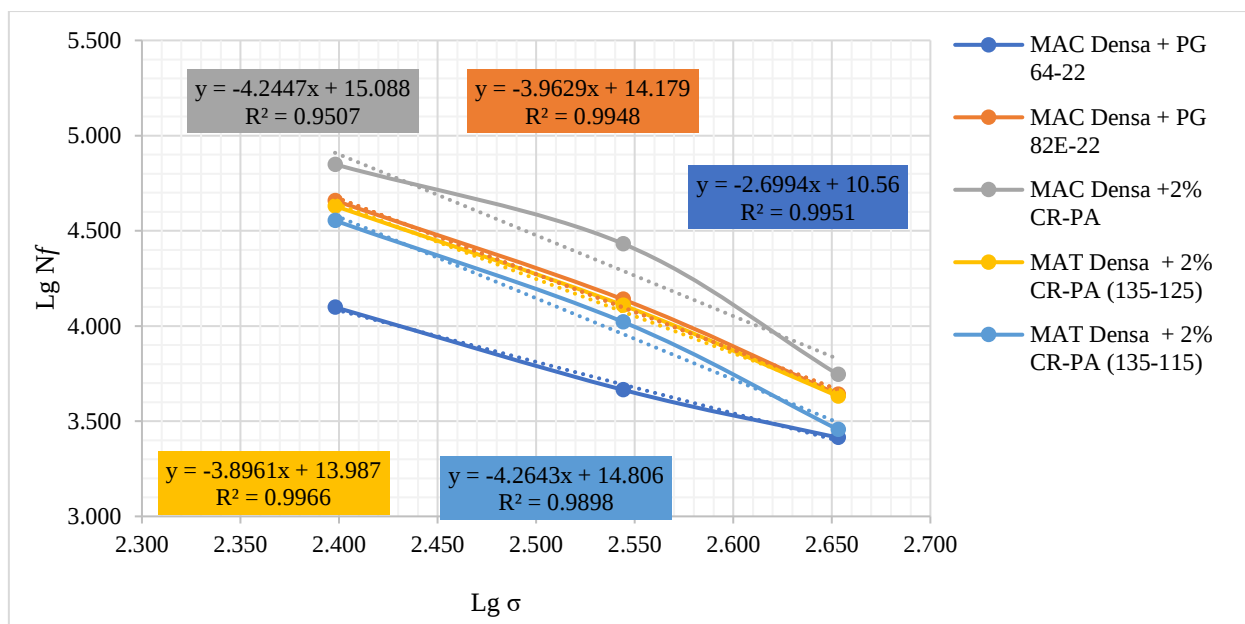


Ilustración V-18. Ecuaciones de regresión del logaritmo de ciclos de carga vs el logaritmo de esfuerzos aplicados.

De acuerdo con la Ilustración V-18, se obtienen las ecuaciones de fatiga y los coeficientes de regresión. En la Tabla V-19 se presentan los coeficientes de regresión de la ecuación de fatiga de los resultados del ensayo de tracción indirecta (ITT) realizado 20°C. El parámetro **k** representa la durabilidad de la mezcla asfáltica. Cuanto mayor sea el valor de **k**, mayor será la durabilidad de la mezcla asfáltica. El parámetro **n** representa la sensibilidad de la influencia del esfuerzo aplicado

en la vida de fatiga. Cuanto mayor sea el valor de **n**, más sensible es la influencia del incremento de esfuerzos en la vida de fatiga.

Tabla V-19. Coeficientes de regresión de ecuaciones de fatiga

<i>Tipo de mezcla</i>	<i>Ecuación de fatiga</i>	<i>Coeficiente de regresión</i>		
		k	n	R ²
<i>MAC Densa + PG 64-22</i>	$LgNf = 10.56 - 2.6994\sigma$	3.63E+10	2.6994	0.9951
<i>MAC Densa + PG 82E-22</i>	$LgNf = 14.179 - 3.9629\sigma$	1.51E+14	3.9629	0.9948
<i>MAC Densa + 2% CR-PA</i>	$LgNf = 15.088 - 4.2447\sigma$	1.22E+15	4.2447	0.9507
<i>MAT Densa + 2% CR-PA (135-125)</i>	$LgNf = 13.987 - 3.8961\sigma$	9.71E+13	3.8961	0.9966
<i>MAT Densa + 2% CR-PA (135-115)</i>	$LgNf = 14.806 - 4.2643\sigma$	6.40E+14	4.2643	0.9898

De la Tabla V-19 se puede deducir que una mezcla en caliente que incorpora CR-PA es la que tiene una mayor vida a fatiga, sin embargo, también es susceptible al cambio de esfuerzos.

La mezcla asfáltica tibia que se compactó a 125°C tiene una vida a fatiga superior a una MAC con asfalto PG 64-22 y muy cercana a una MAC con asfalto PG 82E-22, asimismo, tiene menor sensibilidad al cambio de esfuerzos que una MAC + CR-PA y que una MAC + PG 82E-22.

La MAT compactada a 115°C presentó mayor vida a fatiga que una MAC + PG 64-22 y que una MAC + PG 82E-22 pero con mayor sensibilidad al cambio de esfuerzos.

VI. CONCLUSIONES

La preocupación ambiental, ha sido un tema de los últimos años debido al calentamiento global y el cambio climático, lo cual ha despertado la conciencia ambiental de las diferentes industrias, la industria de los pavimentos está haciendo un esfuerzo constante por reducir el consumo de energía, el consumo de recursos no renovables y disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mediante la reducción de las temperaturas de producción, asimismo, encaminándose hacia la economía circular mediante la gestión de residuos.

En esta tesis se abordó la incorporación del polvo de neumáticos por vía semihúmeda, la cual facilita la gestión de un residuo sólido utilizándolo como modificador en las mezclas asfálticas, por otro lado, se estudió el comportamiento de las mezclas asfálticas que incorporan polvo de neumático a una menor temperatura de fabricación con la ayuda de un aditivo para mezclas tibias; teniendo en consideración que las mezclas que incorporan polvo NFU se elaboran y compactan a una temperatura más alta en comparación con las mezclas convencionales ya que el caucho otorga mayor viscosidad al aglutinante y, por lo tanto, produce mayores cantidades de GEI. La tecnología WMA ofrece soluciones prometedoras a los inconvenientes de las mezclas con polvo de NFU gracias al uso de aditivos que pueden garantizar una menor viscosidad del asfalto sin afectar el rendimiento de la mezcla a las temperaturas de servicio del pavimento.

En este trabajo se evaluaron mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con 2% de TB1 el cual permite reducir la viscosidad del asfalto, asimismo, a estas mezclas se les incorporó hule de neumáticos pre digerido y activado (30% en relación con el asfalto, 2% con relación a la masa total de la mezcla por vía semihúmeda. Se diseñaron tres mezclas asfálticas en caliente establecidas como mezclas de control, una MAC con asfalto PG 64-22 fabricada a 158°C, una MAC con asfalto modificado con polímero elaborada a 170°C y una MAC con 2% de hule de neumáticos fabricada a 175°C. Las mezclas asfálticas tibias se elaboraron a 135°C, pero una se compactó a 125°C y la otra a 115°C. Se evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas, para ello se llevaron a cabo una serie de ensayos, TSR, HWT, FN, MR, MD y ITT.

De los aspectos más relevantes de esta investigación de tienen las siguientes conclusiones:

La caracterización del agregado pétreo permitió determinar que el material tenía características de cumplimiento con las recomendaciones de las normativas de diseño, con forma y textura adecuada para generar cohesión entre las partículas en las mezclas asfálticas por lo que el esqueleto mineral demostró propiedades que no comprometen el desempeño de las mezclas.

Del diseño volumétrico, se concluye que el contenido de vacíos de aire disminuyó en las mezclas asfálticas tibias cuando se fabricaron a 10, 20 y 30 °C, por debajo de las mezclas de control y aumentó ligeramente cuando se fabricaron a 40 ° C por debajo de la temperatura de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) + hule de neumáticos. Sin embargo, este incremento no fue superior del 0.4%. El aditivo para MAT empleado garantizó el cumplimiento de las propiedades volumétricas al mezclar a una temperatura de 135°C y compactar a 125°C.

En cuanto a la resistencia al daño inducido por humedad; los resultados de la prueba muestran que el uso del aditivo WMA reduce ligeramente el valor de TSR de 89% de MAC + CR-PA a 88 % cuando la mezcla se fabricó a 135 °C compactó a 125°C y a 82% al compactarse a 115 °C, no obstante, cumple los requisitos de resistencia al daño por humedad en México (80%).

Con relación a la evaluación de la resistencia a la deformación permanente con el ensayo Rueda Cargada de Hamburgo, en comparación con la MAC Densa + 2% CR-PA y la MAC Densa + PG 82E-22, las mezclas asfálticas tibias muestran un aumento en la pendiente de deformación de la rueda cargada de Hamburgo. Sin embargo, el aditivo WMA mejora el rendimiento de resistencia a la formación de surcos con relación a la MAC sin aditivos en un 8 y 12% aun cuando se fabricaron a 135°C y se compactaron a 125 y 115 °C, es importante mencionar que, todas las variables en estudio presentaron una deformación menor a 10 mm al termino de 20 000 pasadas.

El ensayo de compresión axial cíclica para la evaluación de la deformación permanente de las mezclas no permitió determinar el número de flujo de las variables, el cual corresponde al ciclo donde finaliza la fase secundaria e inicia la terciaria y todas las variables al ser graficadas se puede observar que continúan en la fase secundaria, no obstante, muestra la susceptibilidad a la deformación de las mezclas. La mezcla asfáltica tibia con temperatura de mezclado de 135°C y compactada a 115°C es la que presentó mayor deformación a los seis mil ciclos de carga en comparación con las mezclas de control, la mezcla asfáltica tibia compactada a 125°C presentó menor deformación que la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22.

Los valores de módulo resiliente resultaron mayores para la mezcla asfáltica en caliente que incorpora 2% de CR-PA y para la mezcla asfáltica modificada con polímero, lo cual indica que son mezclas más flexibles, la mezcla asfáltica tibia compactada a 125°C obtuvo un valor de módulo que equivale al 98% del valor de módulo de la mezcla asfáltica modificada con polímeros, un 74% de la MAC Densa + 2%CR-PA y supero un 20% del valor obtenido por la MAC con asfalto PG 64-22, lo cual indica que el hule de neumáticos mejora la elasticidad de la mezcla asfáltica tibia.

La mezcla asfáltica tibia compactada a 115°C obtuvo un MR que equivale al 67% del módulo determinado para la MAC Densa con 2% CR-PA, 89% del módulo de la MAC con asfalto modificado con polímero y superó en un 9% el valor de módulo de la MAC con asfalto PG 64-22, lo que indica que una reducción de 10°C más de temperatura en la compactación afecta el módulo resiliente de la mezcla asfáltica tibia con 2% de hule de neumáticos.

Los resultados del ensayo de módulo dinámico a 10°C, 20°C y 30°C a frecuencias de 0.1Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 5 Hz y 10 Hz, mostraron que, las MAT presentaron valores de módulo dinámico muy similares entre sí, en relación con los módulos obtenidos para la MAC Densa con 2% CR-PA, estos se encuentran entre el 55 y 75%, sin embargo, con relación a la MAC Densa con asfalto PG 82E-22, los módulos de las MAT equivalen a valores entre el 80 y 90% de estos y son superiores a los módulos de la MAC Densa con asfalto PG 64-22. Asimismo, se identificó que con el incremento de temperatura la MAT compactada a 125°C presentó módulos superiores al de la MAC + PG 82E-22 y la MAC Densa con asfalto PG 64 – 22.

Las frecuencias de carga están asociadas a la susceptibilidad del módulo dinámico de la mezcla asfáltica con la variabilidad en la presión cargas aplicadas, a una temperatura de acondicionamiento de 20°C, se identificó que el valor de módulo de las mezclas asfálticas tibias es menos susceptible al cambio de frecuencias en comparación con las mezclas de control MAC Densa + 2% de CR-PA y la MAC Densa + PG 82E-22.

Asimismo, se logró identificar que las mezcla asfáltica tibia compactada a 125°C presentó valores de módulos con menor susceptibilidad al cambio de temperaturas en comparación con las mezclas de control MAC Densa + 2% de CR-PA y la MAC Densa + PG 82E-22.

Respecto a la resistencia a la fatiga, las mezclas asfálticas tibias obtuvieron número de ciclos de carga hasta la fractura diferentes, mostraron que 10°C de reducción de temperatura de

compactación impacta en la vida a fatiga de la mezcla, sin embargo, los resultados de ambas mezclas son mayores al de una MAC con asfalto PG 64-22 lo que indica que el polvo de neumáticos incorporado vía semihúmeda incrementa la vida a fatiga de la mezcla. La MAT mezclada a una temperatura de 135°C y compactada a 125°C presentó un número de ciclos hasta la ruptura que equivalen a más del 90% de la vida a fatiga de la mezcla asfáltica modificada con polímeros y es menos susceptible al cambio de esfuerzos.

Con las ecuaciones de fatiga se mostró que la mezcla asfáltica tibia mezclada a 135°C y compactada a 125°C y que incorpora 2% de CR-PA tiene mayor vida a fatiga que la mezcla de control MAC Densa con asfalto PG 64-22 y es una mezcla que bajo carga repetida tiene menor sensibilidad al cambio de esfuerzos en comparación a las mezclas de control MAC Densa + 2% de CR-PA y la MAC Densa + PG 82E-22.

La MAT compactada con temperatura de mezclado de 135°C y compactada a 115°C presentó mayor vida a fatiga que una MAC + PG 64-22 y que una MAC + PG 82E-22 pero con mayor sensibilidad al cambio de esfuerzos, lo cual indica que una reducción de 10°C en las temperaturas de compactación incrementa la susceptibilidad de la vida a fatiga de la mezcla asfáltica ante el incremento de esfuerzos.

Finalmente, el estudio demuestra que, el uso del polvo de neumáticos en una mezcla asfáltica tibia elaborada con un aditivo orgánico e incorporando un 2% de polvo de neumáticos pretratado y activado, dio como resultado una mezcla de alto desempeño que cumple con los requisitos de diseño para un tránsito mayor a 30 millones de ejes equivalentes, la cual además, se mezcló y compactó a 30°C menos que una MAC de alto desempeño, lo cual indica una reducción en el uso de combustible, menor exposición de los trabajadores a los vapores del asfalto y menos emisiones de GEI durante la producción, tendido y compactación de la mezcla.

6.1.Recomendaciones para trabajos futuros

Teniendo en consideración que las tecnologías WMA de acuerdo con la literatura se han centrado en los pavimentos asfálticos convencionales, las mezclas asfálticas tibias que incorporan hule de neumáticos no se han estudiado a detalle.

Se recomienda investigar las siguientes temáticas para sumar a los hallazgos de esta investigación:

- Considerando que el objetivo principal de las mezclas asfálticas tibias es reducir las temperaturas de producción, pero sin arriesgar el desempeño de la mezcla asfáltica, se debe realizar un estudio que involucre ensayos de desempeño a diferentes temperaturas para encontrar un balance entre un mejor desempeño de la mezcla que incorpora polvo de neumáticos y la reducción de las temperaturas de producción.
- Se deben realizar más estudios con otras tecnologías de mezclas asfálticas tibias (aditivos químicos y aditivos espumantes).
- Se debe realizar un estudio de análisis de costo de ciclo de vida, para determinar exactamente el impacto ambiental de las mezclas asfálticas tibias que incorporan polvo de neumáticos por vía semihúmeda.
- Para el ensayo de compresión axial en estudios futuros, se recomienda incrementar la carga del ensayo o el número de ciclos para determinar el número de flujo y hacer un mayor análisis con relación a la deformación permanente.
- Teniendo en consideración el comportamiento de las mezclas de acuerdo con su granulometría, se recomienda evaluar mezclas con un esqueleto mineral diferente tales como: mezclas de granulometría abierta, CASAA y SMA.

APÉNDICE

APÉNDICE A

En el Apéndice A se muestran los datos volumétricos y cálculos realizados con los especímenes acondicionados y no acondicionados, para la obtención de la resistencia a la tensión indirecta y la relación entre ellos.

Tabla VI-0-1. Cálculos para la obtención de TSR en mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22

PROYECTO: Tesis Eliceth (Mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22)									
Temperatura de mezclado, °C		158			Fecha		30/11/2022		
Temperatura de Compactación, °C		148							
EFECTO DE LA HUMEDAD SOBRE MEZCLAS ASFALTICAS AASHTO T-283-21									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	6.2	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.			1	2	3	4	5	6	-
Diámetro (D)			10	10	10	10	10	10	cm
Espesor (t)			6.166	6.166	6.125	6.191	6.203	6.143	cm
Masa en aire (A)			1041	1044	1043.7	1046.4	1047.3	1046.8	g
Masa Sat. Superficialmente seca (B)			1046.5	1049.2	1047.5	1051	1053.6	1051.1	g
Masa Sumergida. (C)			593.6	591.8	590.3	592.7	598.3	596.8	g
Volumen (B-C). (E)			452.9	457.4	457.2	458.3	455.3	454.3	cm ³
Gravedad específica bruta (A/E)			2.299	2.282	2.283	2.283	2.300	2.304	g/cm ³
Gravedad específica teórica máxima			2.465	2.465	2.465	2.465	2.465	2.465	g/cm ³
Vacíos (100(Gmm-Gmb) /Gmm) (Pa)			6.8	7.4	7.4	7.4	6.7	6.5	%
Volumen de vacíos (PaE/100).			30.588	33.871	33.792	33.797	30.432	29.635	cm ³
Carga.			631	542	527				kgf
ACONDICIONADAS									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	6.2	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.						4	5	6	-
Espesor (t")						10	10	10	cm
Masa Sat. superficialmente seca (B"),						1073.2	1071.3	1069.7	g
Volumen de agua absorbida (B"-A), (J")						26.8	24	22.9	cm ³
% Saturación (100J"/Va), (S")						79.3	78.9	77.3	%
Carga, (P")						532.00	516.00	583.00	kgf
Esfuerzo en seco (2P/tDπ), (S1)			6.515	5.596	5.478				kg/cm ²
Promedio Esfuerzo en seco			5.863						kg/cm ²
Esfuerzo en húmedo (2P"/t"Dπ), (S2)						5.471	5.296	6.042	kg/cm ²
Promedio Esfuerzo en húmedo						5.603			kg/cm ²
TSR (S2/S1)			95.56%						%

Tabla VI-0-2. Cálculos para la obtención de TSR en mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 82E-22.

PROYECTO: Tesis Eliceth (Mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 82E-22)									
Temperatura de mezclado, °C		170			Fecha		30/11/2022		
Temperatura de Compactación, °C		165							
EFECTO DE LA HUMEDAD SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS AASHTO T-283-21									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	6.4	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.			1	2	3	4	5	6	-
Diámetro (D)			10	10	10	10	10	10	cm
Espesor (t)			6.2	6.25	6.23	6.25	6.25	6.25	cm
Masa en aire (A)			1047.9	1046.7	1046.7	1047.3	1048.2	1046.8	g
Masa Sat. Superficialmente seca (B)			1055.7	1054.7	1053.6	1055.4	1056.7	1052.4	g
Masa Sumergida. (C)			598.3	597.6	592.3	596.8	597.8	592.6	g
Volumen (B-C). (E)			457.4	457.1	461.3	458.6	458.9	459.8	cm³
Gravedad específica bruta (A/E)			2.291	2.290	2.269	2.284	2.284	2.277	g/cm³
Gravedad específica teórica máxima			2.454	2.454	2.454	2.454	2.454	2.454	g/cm³
Vacíos (100(Gmm-Gmb) /Gmm) (Pa)			6.6	6.7	7.5	6.9	6.9	7.2	%
Volumen de vacíos (PaE/100).			30.383	30.572	34.772	31.827	31.761	33.231	cm³
Carga.			797		809	918			kgf
ACONDICIONADAS									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	6.4	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.				2			5	6	-
Espesor (t")				10			10	10	cm
Masa Sat. superficialmente seca (B"),				1070.3			1071.6	1073.0	g
Volumen de agua absorbida (B"-A), (J")				23.6			23.4	26.2	cm³
% Saturación (100J"/Va), (S")				77.2			73.7	78.8	%
Carga, (P")				820			772.00	837.00	kgf
Esfuerzo en seco (2P/tDπ), (S1)			8.184		8.267	9.351			kg/cm²
Promedio Esfuerzo en seco			8.600						kg/cm²
Esfuerzo en húmedo (2P"/t"Dπ), (S2)				8.352			7.864	8.526	kg/cm²
Promedio Esfuerzo en húmedo						8.247			kg/cm²
TSR (S2/S1)			95.89%						%

Tabla VI-0-3. Cálculos para la obtención de TSR en mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22 + 2% CR-PA

PROYECTO: Tesis Eliceth (Mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22 + 2% CR-PA)									
Temperatura de mezclado, °C		175				Fecha		02/12/2022	
Temperatura de Compactación, °C		165							
EFECTO DE LA HUMEDAD SOBRE MEZCLAS ASFALTICAS AASHTO T-283-21									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	5.6	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.			1	2	3	4	5	6	-
Diámetro (D)			10	10	10	10	10	10	cm
Espesor (t)			6.15	6.15	6.13	6.12	6.13	6.13	cm
Masa en aire (A)			1042.6	1044.3	1044.4	1045.1	1047.7	1045.2	g
Masa Sat. Superficialmente seca (B)			1050.7	1053.5	1052.7	1051.4	1053.1	1051.4	g
Masa Sumergida. (C)			590.2	592.1	590.9	590.8	590.1	591.3	g
Volumen (B-C). (E)			460.5	461.4	461.8	460.6	463	460.1	cm³
Gravedad específica bruta (A/E)			2.264	2.263	2.262	2.269	2.263	2.272	g/cm³
Gravedad específica teórica máxima			2.443	2.443	2.443	2.443	2.443	2.443	g/cm³
Vacíos (100(Gmm-Gmb) /Gmm) (Pa)			7.3	7.4	7.4	7.1	7.4	7.0	%
Volumen de vacíos (PaE/100).			33.730	33.934	34.293	32.806	34.142	32.265	cm³
Carga.				596	550			763.0	kgf
ACONDICIONADAS									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	5.6	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.			1			4	5		-
Espesor (t")			6.15			6.12	6.13		cm
Masa Sat. superficialmente seca (B"),			1068.9			1070.4	1073.5		g
Volumen de agua absorbida (B"-A), (J")			26.3			25.3	25.8		cm³
% Saturación (100J"/Va), (S")			78.0			77.1	75.6		%
Carga, (P")			586.00			571.00	545.00		kgf
Esfuerzo en seco (2P/tDπ), (S1)				6.170	5.712			7.924	kg/cm²
Promedio Esfuerzo en seco			6.602						kg/cm²
Esfuerzo en húmedo (2P"/t"Dπ), (S2)						5.940	5.660		kg/cm²
Promedio Esfuerzo en húmedo						5.889			kg/cm²
TSR (S2/S1)			89.20%						%

Tabla VI-0-4. Cálculos para la obtención de TSR en mezcla asfáltica tibia con asfalto PG 64-22 + 2% CR-PA (135°C-125°C)

PROYECTO: Tesis Eliceth (Mezcla asfáltica tibia con asfalto PG 64-22 + 2% CR-PA)									
Temperatura de mezclado, °C		135			Fecha		02/12/2022		
Temperatura de Compactación, °C		125							
EFECTO DE LA HUMEDAD SOBRE MEZCLAS ASFALTICAS AASHTO T-283-21									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	5.6	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.			1	2	3	4	5	6	-
Diámetro (D)			10	10	10	10	10	10	cm
Espesor (t)			6.05	6.1	6.05	6.1	6.12	6.05	cm
Masa en aire (A)			1043.9	1047	1047.7	1048.8	1042.7	1049	g
Masa Sat. Superficialmente seca (B)			1052	1054.6	1052.9	1055	1052	1054.7	g
Masa Sumergida. (C)			593.4	594.5	590.8	594	590.0	594	g
Volumen (B-C). (E)			458.6	460.1	462.1	461	462	460.7	cm³
Gravedad específica bruta (A/E)			2.276	2.276	2.267	2.275	2.257	2.277	g/cm³
Gravedad específica teórica máxima			2.437	2.437	2.437	2.437	2.437	2.437	g/cm³
Vacíos (100(Gmm-Gmb) /Gmm) (Pa)			6.6	6.6	7.0	6.6	7.4	6.6	%
Volumen de vacíos (PaE/100).			30.245	30.473	32.186	30.635	34.138	30.253	cm³
Carga.			537				500.0	692.0	kgf
ACONDICIONADAS									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	5.6	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.				2	3	4			-
Espesor (t")				6.1	6.05	6.1			cm
Masa Sat. superficialmente seca (B"),				1070	1072.6	1072.3			g
Volumen de agua absorbida (B"-A), (J")				23	24.9	23.5			cm³
% Saturación (100J"/Va), (S")				75.5	77.4	76.7			%
Carga, (P")				480.00	419.00	465.00			kgf
Esfuerzo en seco (2P/tDπ), (S1)			5.651				5.201	7.282	kg/cm²
Promedio Esfuerzo en seco			5.426						kg/cm²
Esfuerzo en húmedo (2P"/t"Dπ), (S2)				5.009	4.409	4.853			kg/cm²
Promedio Esfuerzo en húmedo						4.757			kg/cm²
TSR (S2/S1)			87.67%						%

Tabla VI-5. Cálculos para la obtención de TSR en mezcla asfáltica tibia con asfalto PG 64-22 + 2% CR-PA (135°C-115°C)

PROYECTO: Tesis Eliceth (Mezcla asfáltica tibia con asfalto PG 64-22 + 2% CR-PA)									
Temperatura de mezclado, °C		135			Fecha		02/12/2022		
Temperatura de Compactación, °C		115							
EFECTO DE LA HUMEDAD SOBRE MEZCLAS ASFALTICAS AASHTO T-283-21									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	5.6	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.			1	2	3	4	5	6	-
Diámetro (D)			10	10	10	10	10	10	cm
Espesor (t)			6	6.1	6.1	6.1	6.05	6.05	cm
Masa en aire (A)			1037.2	1050.1	1042.7	1048	1048.3	1040.9	g
Masa Sat. Superficialmente seca (B)			1045.7	1057.6	1051	1055.2	1055.2	1047.6	g
Masa Sumergida. (C)			586.6	595.8	589	593.1	590.4	589.6	g
Volumen (B-C). (E)			459.1	461.8	462	462.1	464.8	458	cm³
Gravedad específica bruta (A/E)			2.259	2.274	2.257	2.268	2.255	2.273	g/cm³
Gravedad específica teórica máxima			2.437	2.437	2.437	2.437	2.437	2.437	g/cm³
Vacíos (100(Gmm-Gmb) /Gmm) (Pa)			7.3	6.7	7.4	6.9	7.5	6.7	%
Volumen de vacíos (PaE/100).			33.495	30.901	34.138	32.063	34.640	30.876	cm³
Carga.			530	604	558				kgf
ACONDICIONADAS									
CONTENIDO ASFÁLTICO, %	5.6	%	LECTURAS			LECTURAS			UNIDAD
Identificación del espécimen.						4	5	6	-
Espesor (t")						6.1	6.05	6.05	cm
Masa Sat. superficialmente seca (B"),						1073.2	1074.5	1062.6	g
Volumen de agua absorbida (B"-A), (J")						25.2	26.2	21.7	cm³
% Saturación (100J"/Va), (S")						78.6	75.6	70.3	%
Carga, (P")						411.00	452.00	520.00	kgf
Esfuerzo en seco (2P/tDπ), (S1)			5.623	6.304	5.824				kg/cm²
Promedio Esfuerzo en seco			5.917						kg/cm²
Esfuerzo en húmedo (2P"/t"Dπ), (S2)						4.289	4.756	5.472	kg/cm²
Promedio Esfuerzo en húmedo						4.839			kg/cm²
TSR (S2/S1)			81.79%						%

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar Moya, J. P. (2014). Caracterización del daño por humedad en mezclas asfálticas . *Lanname UCR*, 1-6.
- Abdullah, M., Bilema, M., Aman, M. Y., & Ahma, K. A. (2019). Investigating the Rheological and Physical Properties for Unaged of Crumb Rubber-Modified Binders Containing Warm Mix Asphalt Additive. *Springer Nature Singapore*, 1389-1400. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_100
- Ahmed, T., Hajj, E., Bahzad, D., Piratheepan, M., & Warrag, A. (11 de Abril de 2021). Investigation of the Rheological and Bonding Characteristics of Crumb Rubber-Modified Asphalt Binders Mixed with Warm Mix Asphalt Additive and Antistrip Agen. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1. doi:https://doi.org/10.1007/s42947-021-00033-1
- Akisetty, C., Lee, S.-J., & Amirkhanian, S. (2007). High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives. *Construction and Building Materials* , 565-573.
- Akisetty, C., Lee, S.-J., & Amirkhanian, S. (2009). Effects of Compaction Temperature on Volumetric Properties of Rubberized Mixes Containing Warm-Mix Additives. *Journal of materials in civil engineering ASCE*, 409-415.
- Akpolat, M., Vural Kök, B., & Yilmaz , M. (2020). Performance and Aging Characteristics of Hot Mixture Asphalt with Crumb Rubber and Warm Mix Asphalt Additives. *ASCE*, 1-12.
- Alarcón Ibarra, J., & Bocanegra Martínez, D. (2021). *Ventajas de uso de hule molido de neumáticos fuera de uso (NFU) en la modificación de asfaltos*. Morelia, Michoacán: UMSNH.
- AMAAC. (2016). Protocolo AMAAC PA-MA 02/2016. *Control y aseguramiento de calidad para mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño* . México : AMAAC.
- AMAAC. (2017). Ensayos de Evaluación del comportamiento a la deformación permanente de mezclas asfálticas. *Asfáltica Revista técnica*, 5.

- Ameri, M., Afshin, A., Ebrahimzadeh Shiraz, M., & Yazdipناه, F. (2020). Effect of wax-based warm mix additives on fatigue and rutting performance of crumb rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 1-11.
- Asphalt Institute . (2014). *MS-2 Asphalt Mix Designing Methods 7th Edition*. USA: Asphalt Institute.
- ASTM Standard . (2015). ASTM D7175-15 Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. *Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. United States : ASTM .
- ASTM Standard . (2016). ASTM D6648 – 08 Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). *Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*. United States : ASTM .
- ASTM Standard . (2019). ASTM D8254-19 Standard Test Method for Flash and Fire Points of Asphalt by Cleveland Open Cup Tester . *Flash and Fire Points of Asphalt by Cleveland Open Cup Tester* . United States : ASTM .
- ASTM Standard . (2020). ASTM D7173 – 20 Standard Practice for Determining the Separation Tendency of Polymer from Polymer-Modified Asphalt. *Determining the Separation Tendency of Polymer from Polymer-Modified Asphalt*. United States : ASTM.
- ASTM Standard . (2020). ASTM D7405-20 Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer . *Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer* . United States : ASTM .
- ASTM Standard. (2021). ASTM D6084/D6084M Test Method for Elastic Recovery of Asphalt Materials by Ductilometer. United States : ASTM.
- ASTM Standars . (2022). ASTM D4402/D4402M Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated. *Viscosity Determination of Asphalt at Elevated*. United States .

- ASTM Standards . (2022). ASTM D6521 – 22 Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel. *Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized*. United States : ASTM.
- ASTM Standards. (2020). ASTM D36/D36M Standard Test Method for Softening of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). *Standard Test Method for Softening of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. United States.
- ASTM Standards. (2020). ASTM D5/D5M Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. United States: ASTM.
- ASTM Standards. (2022). ASTM D2872 – 22 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)*. United States.
- Ayala del Toro , Y., Delgado Alamilla , H., Cuellar Pérez , V. H., & Salazar Rivera , A. (2019). *Manual de ensayo para laboratorio, Agregados (AG) para mezclas asfálticas* . Safadila, Qro. : IMT.
- Batari, A., Aman, M., Saeed, S., Ahmed, T., & Chinade, A. (2017). Rutting Assessment of Crumb Rubber Modifier Modified Warm Mix Asphalt Incorporating Warm Asphalt Additive. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 1239-1244.
- Bocanegra Martínez , D. (14 de febrero de 2019). Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas modificadas con hule molido devulcanizado . *Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas modificadas con hule molido devulcanizado* . Querétaro , Querétaro , México : Universidad Auntonoma de Querétaro .
- Cano Serrano, E., Cerezo García, L., & Urbina Fraile, M. (2007). *Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso* . Madrid : CEIM Dirección General de Universidades e Investigación.
- Chen, S., Cao, J., Zheng, C., & Guo, X. (2021). Rheological Characteristics of Tire Rubber-Modified Asphalt following Thermal Variation. *Hindawi*, 1-9. doi:<https://doi.org/10.1155/2021/9928562>

- de la Fuente Utrilla, A. (Septiembre de 2007). Diseño de una mezcla asfáltica de alto rendimiento para baches superficiales y profundos: tramo carretero Villa Hermosa - Teapa. *Diseño de una mezcla asfáltica de alto rendimiento para baches superficiales y profundos: tramo carretero Villa Hermosa - Teapa*. Puebla, Puebla, México: UDLAP.
- Delgado Alamilla , H., Téllez Gutiérrez , R., & San Martín Romero, J. (2015). *Caracterización mecánica de una mezcla en tibio con aditivos químicos* . México: IMT.
- Díaz Claros , C. M., & Castro Celis , L. C. (2017). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá . *Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá* . Bogotá , Colombia : Universidad Santo Tomás .
- Direcció Insular d'Infraestructures, Departament de Mobilitat i Infraestructures. (2020). *Instrucciones generales para la elaboración de proyectos y ejecución de unidades de obras sostenibles*. Mallorca: Direcció Insular d'Infraestructures.
- Epps , J., & Johnson , D. (2020). El avance de los pavimentos en los últimos 50 años . *Revista del Asfalto* , 1-2.
- Garnica Anguas , P., Delgado Alamilla , H., Romero , S. A., & Alarcón Orta , H. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas . *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Sanfandila, Qro. , México: IMT.
- Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2005). *Caracterización Geomecánica de las mezclas asfálticas* . Querétaro: IMT.
- Gopalakrishnan, K., JvdM Steyn, W., & Harvey, J. (2014). *Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements*. New York: Springer. doi:10.1007/978-3-662-44719-2
- Gui, W., Wang, L., Gao, X., & Zhang, F. (2021). Performance evaluation of warm-mixed crumb rubber modified asphalt based on rheological characteristics. *Construction and building Materials* , 1-12.
- Hoyos Díaz, L. M., Puicon Herrera, K. d., & Muñoz Pérez, S. P. (2021). Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria . *Infraestructura Vial/LanammerUCR* , 11.

- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Desing*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.
- Lesme Brun, J. G. (Octubre de 2015). *docplayer.es*. Obtenido de *docplayer.es*: <https://docplayer.es/55763802-Estudio-del-comportamiento-de-mezclas-asfalticas-tibias-mezclas-templadas-empleando-emulsiones-super-estabilizadas.html>
- Loría Salazar , L. G., Matamoros Kikut , I., & Bolaños Barrantes , M. (2011). Mezclas asfálticas tibias (MAT). *PITRA Lanname* , 6.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2011). *Mix Design Practices for Warm-Mix Asphalt*. Washington, DC: The National Academies Press. doi:<https://doi.org/10.17226/14488>
- Oliveira, J., Silva, H., R.M, S., & Fernandes, S. (2013). Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 15-22.
- Ozturk, H. I., & Kamran, F. (2019). Laboratory evaluation of dry process crumb rubber modified mixtures containing Warm Mix Asphalt Additives. *Construction and Building Materials*, 1-10.
- Padilla Rodríguez , A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. España : UPC.
- Ramírez Escobar , J. A. (febrero de 2021). *Evaluación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas tibias mediante la viga de flexión a cuatro puntos*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Reza Pouranian, M., Notani, M., Tabesh, M., Nazeri, B., & Shishehbor, M. (2020). Rheological and environmental characteristics of crumb rubber asphalt binders containing non-foaming warm mix asphalt additives. *Construction and Building Materials* , 1-17.
- Rodríguez Alloza , A. M. (2015). *Asphalt Rubber Mixtures wih Warm Mix Asphalt additives*. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez Castro, E. (2016). Uso de polvo de caucho de llantas en pavimentos asfálticos . *PITRA-LannameUCR*, 3.

- Rodríguez-Alloza, A. M., & Gallego, J. (2016). Master curves of crumb rubber modified binders containing Montan waxes as warm mix asphalt additives. *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 1-11.
- Rodríguez Alloza, A. M., & Gallego, J. (2017). Mechanical performance of asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives. *Materials and Structures*, 1-9.
- Rodríguez-Alloza, A. M., Gallego, J., & Pérez , I. (2013). Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber. *Construction and Building Materials* , 1-9.
- Saberi.K, F., Fakhri, M., & Azami, A. (2017). Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Journal Cleanear Production*, 1-37. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.079
- Salazar Delgado, J. (2008). *Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de Polímeros modificantes de asfaltos incorporados en Planta* . San José: Universidad de Costa Rica.
- Sandoval Navarro, I., Ruiz Zárate, E., Ramírez Muñoz, I., Villa Huerta, C. E., & Cremades Ibañez, I. (2018, 01 19). <https://gruposurfax.wordpress.com/>. Retrieved 07 15, 2023, from <https://gruposurfax.wordpress.com/2018/01/19/determinacion-de-las-temperaturas-de-mezclado-y-compactacion-mediante-la-viscosidad-a-corte-cero/>
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte, SCT. (2020). Cemento Asfáltico, Origen y clasificación para su uso en las obras de infraestructura carretera. *Cemento Asfáltico, Origen y clasificación para su uso en las obras de infraestructura carretera*. Ciudad de México , México: SCT.
- Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transporte . (2006). *Normativa para la Infraestructura del Transporte - CMT. Características de los materiales* . México: SICT - IMT.
- Transportation Research Board. (2011). *NCHRP Report 673 A Manual for Desing of Hot Mix Asphalt with Commentary*. Washintong, D.C.: Transportario Research Board.
- Vieira, J. M., Desmoulin, D., & Pellevoisin, P. (2012). Indirect Tensile Fatigue Teste for Asphalt Mixes Commonly Used in France. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 5th*, 1-16.

- Wang, H., Liu, X., Apostolidis, P., & Scarpas, T. (2018). Rheological Behavior and Its Chemical Interpretation of Crumb Rubber Modified Asphalt Containing Warm-Mix Additives. *Transportation Research Record*, 337–348.
- Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., & El-Basyouny, M. (2002). *NCHRP Report 465 Simple Performance Test for Superpave Mix Design*. Washington D.C: Transportation Research Board.
- Yang, X., You, Z., Mohd Hasan, M., Diab, A., Shao, H., Chen, S., & Ge, D. (2017). Environmental and Mechanical Performance of Crumb Rubber Modified Warm Mix Environmental and Mechanical Performance of Crumb Rubber Modified Warm Mix. *Journal of Cleaner Production*, 1-34. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.168
- Yu, H., Zhu, Z., Leng, Z., Wu, C., Zhang, Z., Wang, D., & Oeser, M. (2019). Effect of Mixing Sequence on Asphalt Mixtures Containing Waste Tire Rubber and Warm Mix Surfactants. *Journal Cleaner Production*, 1-39. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119008>
- Yu, H., Chen, Y., Wu, Q., Zhang, L., Zhang, Z., Zhang, J., . . . Oeser, M. (2020). Decision support for selecting optimal method of recycling waste tire rubber into wax-based warm mix asphalt based on fuzzy comprehensive evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 1-11.
- Yu, H., Zhu, Z., Leng, Z., Wu, C., Zhang, Z., Wang, D., & Oeser, M. (2019). Ecto de la secuencia de mezcla en mezclas de asfalto que contienen goma de neumáticos fuera de uso y tensioactivos de mezcla tibia. *Journal Cleaner Production*, 1.
- Yucel, A. O., Ozturk, H., & Guler, M. (2021). Influence of warm mix additive on internal structure of dry process crumb rubber modified mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127959>
- Zarini, A. (2011). Alternativas de reutilización y reciclaje de neumáticos en desuso . *Alternativas de reutilización y reciclaje de neumáticos en desuso* . Buenos Aires , Argentina : Instituto Tecnológico de Buenos Aires .
- Ziari, H., Divandari, H., Mohammad, S., Akbar, S. A., & Hosseinian, S. (2021). Investigation of the Effect of Crumb Rubber Powder and Warm Additives on Moisture Resistance of SMA Mixtures. *Hindawi*, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1155/2021/6653594>