



Universidad Autónoma de Querétaro  
 Facultad de Ingeniería  
 Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DE ALTO DESEMPEÑO UTILIZANDO  
 MATERIALES DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP)

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
 Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

**Presenta:**

Ing. Orlando Fabrizio Ramos Villanueva

**Dirigido por:**

Dr. José Antonio Romero Navarrete

**Co-Dirigido por:**

Dr. Pedro Limón Covarrubias

**SINODALES**

Dr. José Antonio Romero Navarrete  
 Presidente

Dr. Pedro Limón Covarrubias  
 Secretario

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
 Vocal

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca  
 Suplente

M. I. José Antonio Gómez López  
 Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González  
 Director de la Facultad de Ingeniería

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
 Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
 Querétaro, Qro.  
 Octubre de 2017  
 México

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DE ALTO DESEMPEÑO  
UTILIZANDO MATERIALES DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP)

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

**Presenta:**

Ing. Orlando Fabrizio Ramos Villanueva

**Dirigido por:**

Dr. José Antonio Romero Navarrete

**Co-Dirigido por:**

Dr. Pedro Limón Covarrubias

**SINODALES**

Dr. José Antonio Romero Navarrete  
Presidente

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Pedro Limón Covarrubias  
Secretario

\_\_\_\_\_

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Vocal

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca  
Suplente

\_\_\_\_\_

Firma

M. I. José Antonio Gómez López  
Suplente

\_\_\_\_\_

Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad de Ingeniería

\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca  
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
México

## RESUMEN

Una alternativa para mitigar los efectos negativos asociados a la reconstrucción de pavimentos asfálticos es el reciclado de los materiales del mismo pavimento deteriorado (RAP). Así se pueden obtener beneficios ambientales al reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) del orden de 10 a 20 kilogramos por tonelada, o reducir el consumo energético para la producción de mezclas asfálticas entre 10 y 20% respecto a la producción de pavimentos asfálticos nuevos.

Por otro lado, la construcción sustentable de caminos no solo requiere del uso de materiales reciclados, sino que debe reforzarse con metodologías de diseño que garanticen un adecuado comportamiento de los materiales de construcción. Es por esto que se propuso diseñar mezclas asfálticas utilizando la guía de diseño denominada Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 “Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño”, incorporando productos reciclados, persiguiendo con ello una mayor vida útil de los pavimentos asfálticos.

La investigación consistió en la búsqueda de porcentajes óptimos de RAP, con los cuales se puedan fabricar mezclas asfálticas que cumplan las características de alto desempeño estipuladas por el Protocolo AMAAC. Con este objetivo, se diseñaron tres mezclas recicladas, las cuales incorporaron 15%, 30% y 45% de RAP, respectivamente. Adicionalmente, una mezcla patrón fue diseñada, sirviendo como referencia para evaluar, de manera comparativa, el desempeño de cada una de las mezclas. Los resultados apuntan a que todas las mezclas diseñadas se comportan muy similar, como fue en la susceptibilidad al daño inducido por humedad y la resistencia a la deformación permanente (formación de roderas). Los resultados obtenidos revelaron que las mezclas recicladas presentaron mejor comportamiento mecánico, pues se exhibieron incrementos en Módulo Dinámico desde 30% a 40%, con respecto a la mezcla de referencia. Además, el uso de estas mezclas recicladas permite ahorrar desde 24% hasta 57% en consumo de asfalto. La presente investigación surge de la necesidad de aportar conocimiento sobre el manejo del RAP, contribuyendo así a la mejora de la infraestructura carretera de México, intentando en el proceso conciliar la sustentabilidad en la construcción y reparación de la infraestructura carretera, con la potencialización de las mezclas asfálticas.

**Palabras clave:** Recuperado de pavimento asfáltico, alto desempeño, mezcla asfáltica.

## SUMMARY

A possible alternative to solve the negative effects associated with reconstruction of asphalt pavements is the recycling of materials of the same deteriorated pavement, (RAP). In this way, environmental benefits can be obtained by reducing greenhouse gas (GHG) emissions of the order of 10 to 20 kilograms per tons, or reducing the energy consumption for the production of asphalt mixtures by 10 to 20% compared to the production of asphalt pavements.

On the other hand, the sustainable road construction not only requires using recycled materials, but also, it must be strengthened with design methodologies to provide a suitable behavior of the construction materials. This is why it was proposed to design asphalt mixes using the design guide named AMAAC Protocol PA-MA 01/2013 “Design of High Performance Dense Graded Hot Mix Asphalt”, incorporating recycled byproducts, in order to achieve a longer service life in asphalt pavements.

This research aims to establish the optimum percentage of RAP materials in order to obtain asphalt mixes complying with high performance characteristics mentioned in AMAAC Protocol. For this purpose, three recycled mixes were designed, which incorporating 15%, 30% and 45% of RAP, respectively. In addition, a control mix was designed, which is used as a reference in order to assess, in a comparative way, the performance of the recycled mixes. The findings suggest that all designed HMA (hot mix asphalt) behave in a like manner, as it was in susceptibility to moisture-induced damage, and high resistance to permanent deformation (rutting). The results also shown that the recycled mixes exhibit a better mechanical performance, since increments in Dynamic Modulus were exhibited from 30% to 40%, with respect to the control mix. In addition, the use of these recycled mixes allows savings from 24% to 57% in virgin asphalt consumption. This research arises from the need to contribute knowledge on RAP management, thus contributing to the improvement of the road infrastructure in Mexico, and at the same time join the sustainable construction with the road reconstruction, helped with the maximum potential of asphalt mixes.

**Keywords:** Reclaimed asphalt pavement, high performance, hot mix asphalt (HMA).

A los alumnos de los posgrados de la Universidad Autónoma de Querétaro

A mis padres, mi novia y mis amigos

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por haberme dado las fuerzas y el ánimo para esforzarme y concluir estos estudios de posgrado.

A mis padres Raúl Jaime Ramos Licea y María del Socorro Villanueva Cerda, porque siempre estuvieron al pendiente de mí, tanto para prestarme una palabra de apoyo, como velar por mi salud, seguridad y estabilidad económica, pues aún en la distancia siempre sentí que podía contar con su apoyo.

A mi novia Mildred Estivaly Montes Arvizu, quien durante mi periodo de investigación fue un gran apoyo, un ejemplo a seguir y mi mejor consejera. Le agradezco demasiado que estuvo al pendiente de mí, y que se esforzó por hacer que todos los días fueran lindos y llenos de oportunidades.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, la Facultad de Ingeniería y a la División de Investigación y Posgrado porque me brindaron la oportunidad de continuar mi preparación profesional mediante un posgrado de calidad, en el cual adquirí nuevos conocimientos y experiencias, todo gracias a estas instituciones y los maestros que se prestaron a compartirnos sus conocimientos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber brindado el apoyo económico necesario para sustentarme y con esto complementar mis estudios y poder lograr esta meta.

Al Dr. José Antonio Romero Navarrete, quien fungió como mi director de tesis, al cual considero una persona ejemplar, pues siempre estuvo en el momento en el que lo necesite y que sin su remarcable asesoría no se hubiera llegado a cumplir esta meta.

Al Dr. Pedro Limón Covarrubias, quien fue mi co-director y un segundo tutor, así como un punto de apoyo, quien siempre estuvo disponible para ayudarme en cualquier aspecto que necesitara.

A mis sinodales, el Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca, la Dra. María de la Luz Pérez Rea y al M. I. José Antonio Gómez López, por haberme brindado apoyo, asesoría y su tiempo, además de aconsejarme oportunamente en ausencia de mi director de tesis.

A Don Fulgencio Noh Pat, Ignacio Ramírez, Omar Adame y Enrique Villa, personal de Lasfalto quienes me apoyaron y me dieron consejos muy atinados que rindieron frutos en esta investigación.

# TABLA DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>VI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1    GENERALIDADES.....	1
1.2    JUSTIFICACIÓN. ....	5
1.3    DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA. ....	8
1.4    HIPÓTESIS. ....	9
1.5    OBJETIVOS. ....	9
<b>2. REVISIÓN DE LA LITERATURA</b> .....	<b>10</b>
2.1    ANTECEDENTES. ....	10
2.2    CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN CALIENTE. ....	11
2.3    DISEÑO Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN CALIENTE. ....	20
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>26</b>
3.1    CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. ....	28
3.1.1 <i>Caracterización del RAP</i> .....	28
3.1.2 <i>Caracterización de los agregados vírgenes</i> . ....	31
3.1.3 <i>Selección de aglutinantes asfálticos</i> .....	38
3.2    SELECCIÓN DE GRANULOMETRÍAS DE DISEÑO Y COMBINACIÓN DE PROPIEDADES DE AGREGADOS. ....	48
3.3    DISEÑO VOLUMÉTRICO DE LAS MEZCLAS. ....	51
3.3.1 <i>Diseño de la mezcla de Referencia</i> . ....	55
3.3.2 <i>Diseño de las mezclas Recicladas</i> . ....	56
3.4    PRUEBAS DE DESEMPEÑO PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	57
3.4.1 <i>Susceptibilidad a la humedad “TSR”</i> .....	58
3.4.2 <i>Susceptibilidad a la deformación permanente</i> .....	59
3.4.3 <i>Ensayes Dinámicos</i> . ....	59
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>64</b>
4.1    CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. ....	64
4.1.1 <i>Caracterización del RAP</i> .....	64

4.1.2	<i>Caracterización de los agregados vírgenes.</i>	69
4.1.3	<i>Selección de aglutinantes asfálticos.</i>	71
4.2	SELECCIÓN DE GRANULOMETRÍAS DE DISEÑO Y COMBINACIÓN DE PROPIEDADES DE AGREGADOS.	77
4.3	DISEÑO VOLUMÉTRICO DE LAS MEZCLAS.	80
4.3.1	<i>Diseño de mezcla de referencia.</i>	81
4.3.2	<i>Diseño de las mezclas recicladas.</i>	84
4.3.3	<i>Análisis comparativo de las mezclas diseñadas.</i>	89
4.4	PRUEBAS DE DESEMPEÑO PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.	91
4.4.1	<i>Susceptibilidad a la humedad “TSR”.</i>	91
4.4.2	<i>Susceptibilidad a la deformación permanente.</i>	94
4.4.3	<i>Ensayos Dinámicos.</i>	98
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>108</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>114</b>
<b>7.</b>	<b>APÉNDICE</b>	<b>120</b>
7.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.	120
7.2	SELECCIÓN DE GRANULOMETRÍAS DE DISEÑO.	130
7.3	DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS.	132
7.4	PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS.	134

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Reducción de costos, consumo energético y emisiones de las mezclas recicladas comparadas con mezclas vírgenes. ....	6
Tabla 2-1. Especificación para la selección del aglutinante virgen para mezclas con RAP. ....	14
Tabla 3-1. Requisitos de calidad de la fracción gruesa del agregado pétreo virgen para mezclas asfálticas de granulometría densa. Adaptado de Protocolo AMAAC (AMMAC, 2013). ....	32
Tabla 3-2. Requisitos de calidad de la fracción fina del agregado pétreo virgen para mezclas asfálticas de granulometría densa. Adaptado de Protocolo AMAAC (AMMAC, 2013). ....	32
Tabla 3-3. Ensayos requeridos para el asfalto virgen grado PG para mezclas asfálticas. Adaptado de ASTM D6373. ....	40
Tabla 3-4. Requisitos de calidad para el asfalto virgen grado PG para mezclas asfálticas. ....	41
Tabla 3-5. Requisitos granulométricos para los agregados pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa. ....	49
Tabla 3-6. Esfuerzos de compactación giratoria según el tránsito esperado. Adaptado de Protocolo AMAAC (2013). ....	52
Tabla 3-7. Valores de los parámetros volumétricos necesarios para el diseño óptimo de mezclas asfálticas de granulometría densa. ....	53
Tabla 3-8. Diseño experimental de especímenes de compactador giratorio para la evaluación de parámetros volumétricos de la mezcla de referencia. ....	55
Tabla 3-9. Características físicas de los especímenes para la prueba de Módulo Dinámico de las mezclas diseñadas. ....	61
Tabla 3-10. Configuración de ensayo realizada durante la investigación. ....	62

Tabla 4-1. Resultados de la extracción centrífuga de las muestras de RAP ensayadas.....	66
Tabla 4-2. Análisis reológico en Reómetro de Corte Dinámico y Reómetro de Viga a Flexión sobre el asfalto proveniente del RAP.....	67
Tabla 4-3. Resultados del análisis granulométrico de manera integral de las dos fracciones de RAP.....	68
Tabla 4-4. Análisis granulométrico de los agregados vírgenes estudiados.....	70
Tabla 4-5. Resultados de la caracterización de los agregados gruesos.....	70
Tabla 4-6. Resultados de la caracterización de los agregados finos.....	70
Tabla 4-7. Datos necesarios para la determinación del PG del asfalto de diseño.....	72
Tabla 4-8. Ajuste del grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad de tránsito esperada y con la velocidad de operación.....	72
Tabla 4-9. Resumen de resultados de la caracterización del asfalto modificado de proyecto.....	73
Tabla 4-10. Resultados del ensayo de Viscosidad Rotacional.....	74
Tabla 4-11. Selección del Grado de Desempeño PG para los asfaltos de aporte por utilizar en las mezclas con RAP.....	75
Tabla 4-12. Influencia del aditivo rejuvenecedor sobre la alta temperatura crítica del asfalto de proyecto.....	76
Tabla 4-13. Dosificaciones seleccionadas de aditivo rejuvenecedor para las mezclas con RAP.....	77
Tabla 4-14. Distribuciones granulométricas de las mezclas por diseñar.....	78
Tabla 4-15. Resumen del cálculo de propiedades combinadas de los agregados en las mezclas con RAP.....	80

Tabla 4-16. Propiedades volumétricas obtenidas para un contenido de asfalto inicial. .....	81
Tabla 4-17. Resumen de propiedades volumétricas para distintos contenidos de asfalto. Resultados del diseño experimental. ....	82
Tabla 4-18. Datos de propiedades volumétricas para la construcción del polígono de vacíos para diferentes mezclas con RAP. ....	85
Tabla 4-19. Resultados de los cálculos para la construcción del polígono de vacíos. .....	85
Tabla 4-20. Resumen de propiedades volumétricas para las mezclas recicladas.	88
Tabla 4-21. Características físicas de los especímenes para TSR de las mezclas diseñadas. ....	92
Tabla 4-22. Resumen de resultados para el parámetro TSR de las mezclas diseñadas. ....	92
Tabla 4-23. Resumen de resultados de las pruebas de las mezclas asfálticas diseñadas. ....	95
Tabla 4-24. Resumen de resultados de los ensayos de Módulo Dinámico para la mezcla de referencia. ....	99
Tabla 4-25. Resumen de resultados de los ensayos de Módulo Dinámico para la mezcla con 15% de RAP. ....	100
Tabla 4-26. Resumen de resultados de los ensayos de Módulo Dinámico para la mezcla con 30% de RAP. ....	101
Tabla 4-27. Resumen de resultados de los ensayos de Módulo Dinámico para la mezcla con 45% de RAP. ....	102
Tabla 7-1. Registro de prueba: Granulometría de agregado grueso. ....	120
Tabla 7-2. Registro de prueba: Granulometría de agregado fino. ....	121

Tabla 7-3. Registro de prueba: Desgaste de Los Ángeles de agregado grueso.	121
Tabla 7-4. Registro de prueba: Desgaste Micro-Deval de agregado grueso.....	122
Tabla 7-5. Registro de prueba: Forma de partículas de agregado grueso. ....	123
Tabla 7-6. Registro de prueba: Caras Fracturadas de agregado grueso. ....	123
Tabla 7-7. Registro de prueba: Gravedad Específica y Absorción de agregado grueso. ....	124
Tabla 7-8.Registro de prueba: Equivalente de Arena de agregado fino.....	125
Tabla 7-9. Registro de prueba: Gravedad Específica y Absorción de agregado fino. ....	125
Tabla 7-10. Registro de prueba: Angularidad de agregado fino.....	126
Tabla 7-11. Registro de prueba: Pérdida en masa después de envejecimiento en RTFO. ....	127
Tabla 7-12. Registro de prueba: Densidad del asfalto. ....	128
Tabla 7-13. Resultados del análisis reológico en el Reómetro de Corte Dinámico del asfalto proveniente del RAP, para estado original y envejecido en RTFO. ....	129
Tabla 7-14. Resultados del análisis reológico en el Reómetro de Corte Dinámico del asfalto proveniente del RAP, para estado envejecido en RTFO y PAV. ....	129
Tabla 7-15. Resultados del análisis reológico en el Reómetro de Viga a Flexión (BBR) del asfalto proveniente del RAP. ....	129
Tabla 7-16. Cálculos de combinación de agregados para Mezcla de Referencia. ....	131
Tabla 7-17. Cálculo del contenido de asfalto inicial.....	133
Tabla 7-18. Registro de prueba: Determinación de la Gravedad Teórica Máxima de una mezcla suelta. Ejemplo de cálculo. ....	133

Tabla 7-19. Registro de prueba: Determinación de la Gravedad Bruta compacta de un espécimen proveniente del Compactador Giratorio. Ejemplo de cálculo. ....	133
Tabla 7-20. Cálculo de propiedades estimadas. ....	134
Tabla 7-21. Determinación de la Relación de Resistencias a Tensión TSR .....	135
Tabla 7-22. Determinación de los parámetros para la construcción de curva maestra de Módulo Dinámico.....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Estructura de pavimento flexible convencional. Adaptado de Zárate (2011).....	2
Figura 1-2. Estructura de pavimento flexible convencional. Adaptado de Huang (2004).....	2
Figura 1-3. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compacta con características volumétricas. Fuente: Garnica et al. (2005a).....	3
Figura 1-4. Comparativa de desempeño de mezclas Marshall vs SUPERPAVE. Adaptado de Jitsangiam (2013).....	7
Figura 2-1. Cartas de mezclado para la determinación de la alta temperatura crítica y baja temperatura crítica para el asfalto de aporte, mediante módulo de corte dinámico (DSR) y módulo de rigidez (BBR). ....	14
Figura 3-1. Primera etapa: Caracterización de materiales. ....	26
Figura 3-2. Segunda etapa: Diseño volumétrico y análisis de desempeño de las mezclas asfálticas. ....	27
Figura 3-3. Procesamiento del RAP. a) Almacenamiento del RAP muestreado. b) Cuarteador mecánico para la reducción de muestras de RAP.....	28
Figura 3-4. Equipo Rotarex para la extracción centrífuga del cemento asfáltico proveniente del RAP. ....	29
Figura 3-5. Equipo cuarteador mecánico. ....	31
Figura 3-6. Mallas para granulometría. ....	33
Figura 3-7. Máquina de desgaste de los Ángeles. ....	33
Figura 3-8. "Máquina Micro-Deval" para abrasión de los agregados gruesos.....	34
Figura 3-9. Equipo para la prueba de Equivalente de Arena.....	35

Figura 3-10. "Calibrador Proporcional" para la prueba de partículas planas y alargadas.....	35
Figura 3-11. Equipo de Angularidad para agregado fino. ....	36
Figura 3-12. Equipo para la determinación de la Gravedad Específica (Densidad) de los agregados gruesos. ....	37
Figura 3-13. Equipo para la determinación de la Gravedad Específica (Densidad) de los agregados finos. ....	38
Figura 3-14. Modificación de asfalto base para obtener el asfalto con PG de proyecto.....	40
Figura 3-15. Reómetro de Corte Dinámico (DSR) para la determinación de las propiedades visco-elásticas lineales de los aglutinantes asfálticos.....	42
Figura 3-16. Reómetro de viga a flexión (BBR).....	43
Figura 3-17. Equipo aplicador de flama para la determinación del punto de inflamación. ....	44
Figura 3-18. Equipo para determinar la densidad del asfalto. ....	44
Figura 3-19. Viscosímetro Rotacional Brookfield.....	45
Figura 3-20. Horno RTFO.....	46
Figura 3-21. Horno PAV. ....	46
Figura 3-22. Incorporación de aditivo rejuvenecedor para producir los asfaltos de aporte. ....	48
Figura 3-23. Ejemplo de especificación granulométrica y puntos de control para una mezcla de tamaño nominal de 19 mm.....	49
Figura 3-24. Equipo Compactador Giratorio Superpave marca Rainhart. ....	52
Figura 3-25. Gráficos de diseño para selección del contenido de asfalto óptimo..	56

Figura 3-26. Niveles de diseño de mezcla asfáltica de alto desempeño y pruebas contempladas en cada uno de ellos. Fuente: AMAAC (2013).	57
Figura 3-27. Prensa y Mordaza Lottman para ensaye de TSR.	58
Figura 3-28. Equipo Rueda Carga de Hamburgo. Equipo propiedad de Lasfalto..	59
Figura 3-29. Proceso de obtención de especímenes de ensayo: a) Fabricación de especímenes de compactador giratorio, b) Extracción de núcleo de 100 mm de diámetro, c) Corte de los extremos del espécimen, d) Resultado final de la extracción de especímenes.	61
Figura 3-30. a) Colocación de pines; b) acondicionamiento de especímenes a temperatura de ensayo, c) colocación de LVDT's y espécimen bajo el pistón de la prensa dinámica.	62
Figura 3-31. Equipo Servo-neumático marca Cooper, para la realización de ensayos dinámicos.	63
Figura 4-1. Localización del sitio de extracción de la muestra de RAP. Fuente: Google Earth, 2016.	64
Figura 4-2. Reducción de muestra de RAP a tamaño de ensayo.	65
Figura 4-3. Proceso de Extracción Centrífuga para separar el asfalto de los agregados de RAP.	65
Figura 4-4. Método Abson para recuperación de aglutinantes asfálticos inmerso en soluciones.	66
Figura 4-5. Pruebas reológicas para el asfalto envejecido de RAP.	68
Figura 4-6. Ubicación del banco Tonalá, de la empresa Asfaltos de Guadalajara.	69
Figura 4-7. Ejemplo de Mapa de temperaturas máximas promedio mensual.	71
Figura 4-8. Carta de relación Viscosidad versus Temperatura para el asfalto analizado.	74

Figura 4-9. Influencia del aditivo rejuvenecedor sobre la alta temperatura crítica del asfalto de proyecto. ....	77
Figura 4-10. Gráfica de distribución granulométrica de las mezclas asfálticas diseñadas.....	78
Figura 4-11. Realización del ensayo para determinar la Gravedad Teórica Máxima. ....	80
Figura 4-12. Mezclado y elaboración de probetas para la determinación de la Gravedad Bruta compacta mediante el Compactador Giratorio Superpave.....	81
Figura 4-13. Probetas del diseño experimental para la mezcla de referencia. Probetas de 100mm de diámetro y 63,5 mm de altura aproximadamente. ....	82
Figura 4-14. Gráficos de diseño para la selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla de referencia.. ....	83
Figura 4-15. Polígonos de vacíos de las tres mezclas asfálticas recicladas para la selección del contenido óptimo de asfalto.....	86
Figura 4-16. Determinación del contenido óptimo de asfalto para la mezcla con 15% de RAP.....	87
Figura 4-17. Influencia del contenido de RAP sobre las propiedades volumétricas: Gravedad Teórica Máxima y Contenido Óptimo de Asfalto.....	89
Figura 4-18. Influencia del contenido de RAP sobre las propiedades volumétricas: Vacíos en Agregado Mineral y Vacíos Llenos con Asfalto. ....	89
Figura 4-19. Probetas para la ejecución de la prueba de susceptibilidad al daño inducido por humedad. Mezcla de referencia.....	91
Figura 4-20. Realización de la prueba de susceptibilidad al daño inducido por humedad. ....	92
Figura 4-21. Relación entre el Porcentaje de RAP en las mezclas con la Resistencia a Tensión Indirecta.....	93

Figura 4-22. Relación entre el Porcentaje de RAP en las mezclas con la Relación de Resistencias a Tensión (TSR).....	93
Figura 4-23. No existe rotura de agregados, por lo que se deduce que la falla en las probetas fue debido a que se superó el límite de fluencia de la mezcla asfáltica.	94
Figura 4-24. Preparación y montaje de probetas para el ensayo de deformación permanente por rodera. Mezcla de referencia.....	95
Figura 4-25. Comportamiento de las mezclas asfálticas analizadas ante la aplicación de ciclos de carga (pasadas de la rueda).....	96
Figura 4-26. Probetas deformadas después del ensayo. Nótese que al centro de las probetas se aprecia ligeramente la marca de la rueda.....	97
Figura 4-27. Interfaz del Software de Cooper Technology para Módulo Dinámico donde se aprecian las gráficas de esfuerzo y deformación durante la ejecución de una prueba. ....	98
Figura 4-28. Curvas Isotérmicas de Módulo Dinámico ( $ E^* $ ) y Ángulo de fase ( $f$ ) para cada una de las mezclas asfálticas diseñadas.....	103
Figura 4-29. Curvas maestras de Módulo Dinámico para las cuatro mezclas asfálticas diseñadas, con una temperatura de referencia de 20°C. ....	105
Figura 4-30. Curvas maestras del Ángulo de fase para las cuatro mezclas asfálticas diseñadas, con una temperatura de referencia de 20°C. ....	105
Figura 7-1. Realización del ensayo Desgaste de Los Ángeles.....	122
Figura 7-2. Realización del ensayo Desgaste Micro-Deval. ....	122
Figura 7-3. Realización del ensayo Forma de Partícula.....	123
Figura 7-4. Realización del ensayo Caras Fracturadas.....	124
Figura 7-5. Realización de prueba: Gravedad Específica y Absorción de agregado grueso. ....	124

Figura 7-6. Realización de prueba: Equivalente de Arena de agregado fino. ....	125
Figura 7-7. Realización de prueba: Gravedad Específica y Absorción de agregado fino. ....	126
Figura 7-8. Realización de prueba: Angularidad de agregado fino.....	126
Figura 7-9. Realización de prueba: Azul de metileno. ....	127
Figura 7-10. Realización de prueba: Pérdida en masa después de envejecimiento en RTFO.....	128
Figura 7-11. Realización de varias pruebas en el asfalto.....	128
Figura 7-12. Parámetros de ajuste para la función sigmoide de Witczak y aplicación del principio tiempo-temperatura para la construcción de la curva maestra de Módulo Dinámico. ....	137

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Generalidades.

Un pavimento se puede definir como la estructura de una capa o conjunto de capas que están comprendidas entre la superficie de rodamiento y el nivel superior de las terracerías, teniendo como principal función la de proporcionar una superficie cómoda, uniforme en color y textura, resistente a los esfuerzos inducidos por el tráfico, y capaz de transmitir dichos esfuerzos de una forma adecuada a las terracerías. En la práctica ingenieril de las vías terrestres, un pavimento flexible es aquel construido con concreto asfáltico (Rico & Del Castillo, 2005)

Zárate (2011) indica que una estructura de pavimento flexible convencional (ver Figura 1-1) se conforma de una capa de mezcla asfáltica, comúnmente llamada “Carpeta Asfáltica”, ubicada en la superficie y que estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los esfuerzos verticales. Debajo de esta carpeta, se construye una capa de materiales granulares denominada “Base”, a la cual se le transmiten la mayor parte de los esfuerzos verticales y es la encargada de resistir las sollicitaciones repetidas del tránsito. La “Sub-base” es colocada por debajo de la Base y por encima de la capa Subrasante; su función es servir como un cimiento para la Base y una transición entre el pavimento y las terracerías.

En contraste con lo estipulado por Huang (2004), una estructura convencional de pavimento se conforma por cinco capas, como la que se ilustra en la Figura 1-2. La primera capa, en orden descendente, es la “capa de rodadura”, unida por un riego de liga a una “capa asfáltica intermedia”; inmediatamente debajo se coloca un riego de impregnación, la capa base, una sub-base, y finaliza en el cuerpo de terracerías denominado “subgrade”. Las capas de rodadura e intermedia son elaboradas con mezcla asfáltica, con la diferencia que la primera es una mezcla en caliente de granulometría densa, la cual se pretende que sea resistente al deslizamiento y pulimiento, pues es esta capa la que recibe directamente la carga vehicular; la segunda es una capa que le sirve de apoyo a la capa de rodadura y además proporciona un diseño más económico.

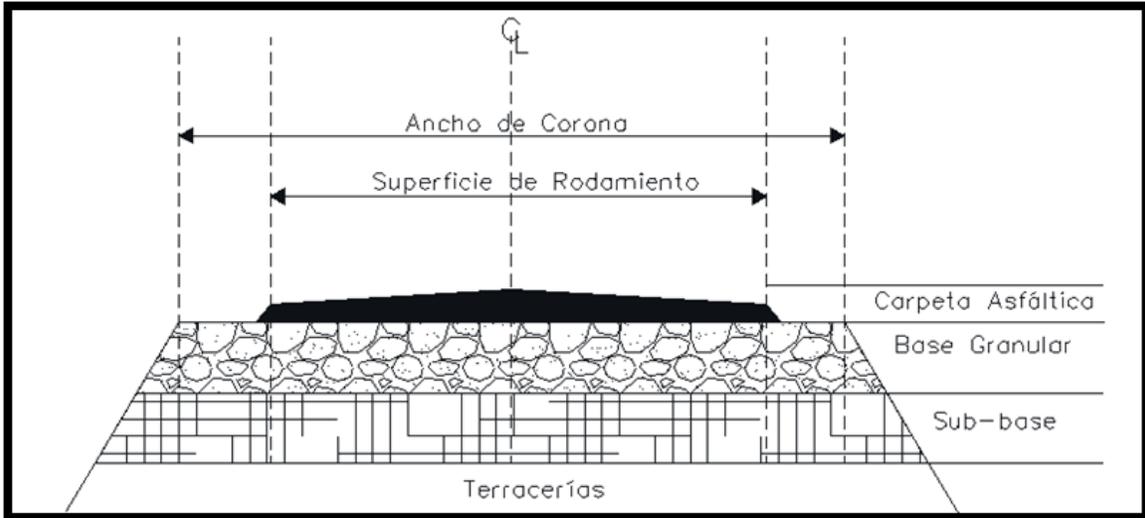


Figura 1-1. Estructura de pavimento flexible convencional. Adaptado de Zárate (2011).

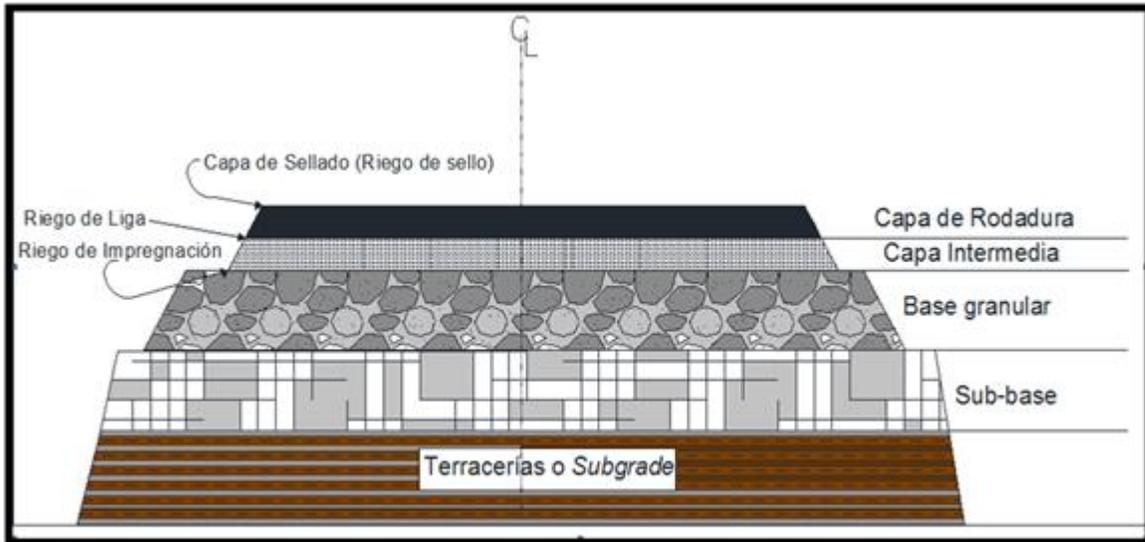
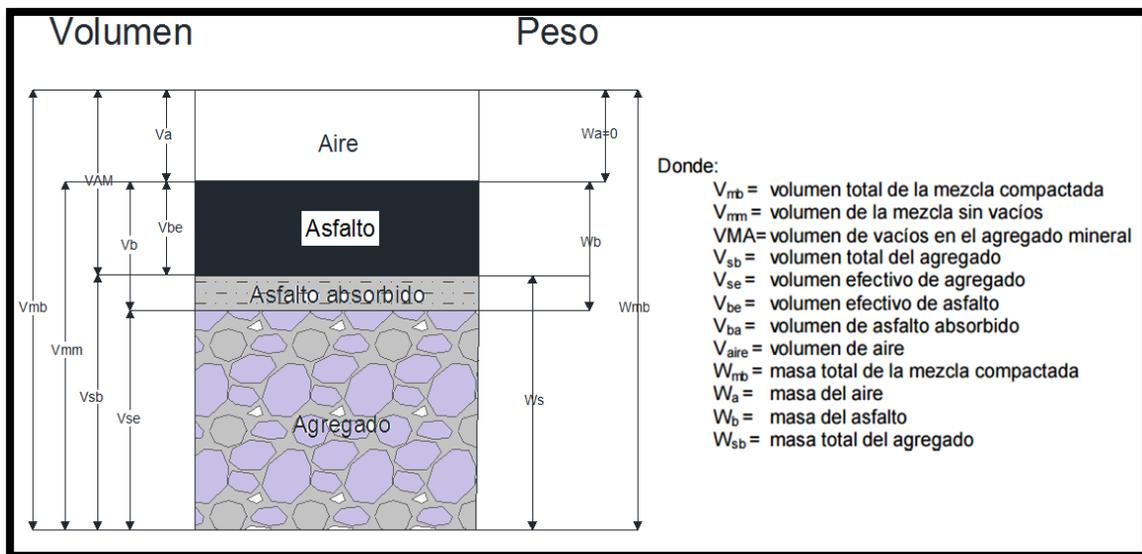


Figura 1-2. Estructura de pavimento flexible convencional. Adaptado de Huang (2004).

Las mezclas asfálticas en caliente (HMA, por sus siglas en inglés) consisten de la combinación de agregados gruesos (gravas, roca triturada, entre otros), agregados finos y polvo relleno (*filler*) en varias proporciones, con la finalidad de producir una mezcla de graduación densa, semi-abierta y abierta, por mencionar

algunas. Las características de cada uno de los materiales y la forma en que interactúan dictaminará la durabilidad y desempeño que pueda lograr la mezcla asfáltica a través del tiempo (Garnica *et al.*, 2005a; Valdés-Vidal *et al.*, 2015).

La mezcla asfáltica en cuestiones de diseño, debe entenderse como un sistema compuesto de tres fases: a) una sólida, compuesta por el agregado pétreo; b) una fase líquida, proporcionada por el aglutinante asfáltico; y c) una fase gaseosa, compuesta por los vacíos intersticiales llenos de aire (Garnica *et al.*, 2005a). La Figura 1-3 muestra un diagrama de fases de una mezcla asfáltica.



**Figura 1-3. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compacta con características volumétricas. Fuente: Garnica *et al.* (2005a).**

Eventualmente, los pavimentos de mezcla asfáltica presentan deterioros a lo largo de su periodo de servicio y al finalizar su vida útil, lo que hace necesario realizar trabajos de rehabilitación y reconstrucción de los mismos (Asi, 2007; Wang *et al.*, 2011). Sin embargo, estas labores conllevan la utilización de materia prima nueva (agregados y cemento asfáltico vírgenes), repercutiendo en trabajos de explotación de recursos naturales, expedición de gases de efecto invernadero, costos energéticos para la producción de mezclas asfálticas nuevas y problemas de disposición de desechos (Romera *et al.*, 2006; Celauro *et al.*, 2010; Pradyumna *et al.*, 2013).

Una alternativa para mitigar lo anterior es el reciclado de materiales existentes que provienen del mismo pavimento deteriorado que se pretenda reconstruir. Bajo esa misma idea es cómo nace el concepto de Recuperado de Pavimento Asfáltico (*Reclaimed Asphalt Pavement*, RAP) (Kaur *et al.*, 2013).

En cuanto al diseño de mezclas, se han utilizado distintas metodologías en aras de establecer un contenido óptimo de asfalto en laboratorio, siendo algunas de ellas, el método Marshall y el método Hveem, siendo la primera la más comúnmente utilizada en México (Garnica *et al.*, 2004; Garnica *et al.*, 2005b).

En 1993, el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras SHRP (por sus siglas en inglés), comenzó a trabajar en un nuevo sistema de especificaciones, ensayos y normas de diseño para materiales asfálticos, agregados pétreos y propiedades de las mezclas asfálticas, ahora involucrando el concepto de “*performance*” o desempeño, así como la predicción de comportamiento de las mismas. De aquí nació el método de diseño de mezclas de alto desempeño conocido como Superpave (*Superior Performance Asphalt Pavement*) (McGennis *et al.*, 1994; Serratos, 2014).

En 2008, se hace la presentación oficial del Protocolo AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto A. C.), en la ciudad de Querétaro, el cual conjuga las experiencias y recomendaciones de laboratorios internacionales como CEDEX de España, LCPC de Francia, SEMMaterials y el *Asphalt Institute* de los Estados Unidos. Esto generó la propuesta de guía de diseño, que está muy adaptada de la metodología Superpave, enriquecida con los avances en la materia por parte de las dependencias antes citadas.

## 1.2 Justificación.

Para el desarrollo sustentable de la sociedad, es completamente necesario la reducción del consumo de recursos naturales y, al mismo tiempo, la reutilización al máximo de los recursos que están presentes en la construcción de caminos. Esto ha propiciado que los especialistas en el ramo consideren nuevas técnicas de reciclado para capas superficiales o estructurales en pavimentos asfálticos (Celauro, *et al.*, 2010).

Son numerosas las ventajas de utilizar RAP en la construcción, rehabilitación y reconstrucción de pavimentos asfálticos, entre las cuales destacan:

1. Ahorros económicos en materias primas, puesto que el RAP ya contiene agregado, lo que reduce costos debido a la explotación, triturado, transporte y secado de estos materiales. También se disminuye la cantidad necesaria de aglutinante asfáltico, ya que el RAP es una fuente valiosa de este insumo (Copeland 2011; Kaur *et al.*, 2013). Esto puede ser visto en la Tabla 1-1.
2. Ahorros en consumo de energéticos necesarios para la fabricación de mezclas asfálticas, así como reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, generados durante la producción de aglutinantes asfálticos y elaboración de las mezclas nuevas (Yang *et al.*, 2015). La Tabla 1-1 muestra valores al respecto.
3. Reducción de desechos provenientes de la molienda y extracción de subproductos de pavimentos envejecidos, así como de los lugares para su disposición (Han *et al.*, 2011).
4. Las mezclas asfálticas en caliente son un producto 100% renovable, lo que convierte al RAP en una alternativa de restauración de pavimentos flexibles altamente rentable y sostenible y es el material más reciclado del mundo (Al-Qadi *et al.*, 2007; Reyes-Ortiz *et al.*, 2012; Liphardt *et al.*, 2015).

**Tabla 1-1. Reducción de costos, consumo energético y emisiones de las mezclas recicladas comparadas con mezclas vírgenes.**

Fuente	Porcentaje de RAP en la mezcla (%)	Ahorro económico (%)	Ahorro Energético (%)	Reducción de emisiones (kg/t)
Zaumanis <i>et al.</i> , 2014	100	50 -70	20	18
(Biedermann 2013)	100	40	--	--
(Aurangzeb et al. 2014)	50	--	12	12
(Cooper 2011)	25	--	20	--
(Cooper 2011)	20	16.5	--	--

Por otro lado, Celauro *et al.* (2010), define que una mezcla asfáltica de alto desempeño es aquella que cumple los requisitos y especificaciones locales, que soporta altos niveles de tráfico pesado y que presenta un buen rendimiento ante los factores climáticos. En su investigación, muestran que una mezcla asfáltica elaborada con asfalto reciclado (hasta 50 %), puede presentar características de desempeño similares o incluso mejores que las mezclas tradicionales. También nos indica la metodología que llevó a cabo para determinar cada una de las características mecánicas que debe cumplir la mezcla para ser considerada de “alto rendimiento”. Esto incluye pruebas como: Estabilidad Marshall, ensayo de tensión indirecta, resistencia al daño inducido por humedad, ensayo de módulo complejo y ensayos de fatiga.

Lo anterior puede ser confirmado con el trabajo de Jitsangiam *et al.* (2013), quienes realizaron una investigación donde se compararon los rendimientos de dos mezclas: una mezcla asfáltica convencional diseñada por el método Marshall y otra mediante Superpave el cual produce mezclas de alto desempeño. En sus experimentos se evaluaron tres características relacionadas con el desempeño de la muestra: Estabilidad Marshall, Resistencia a la tensión indirecta y Módulo de resiliencia de la mezcla. En la Figura 1-4 se resumen los resultados de la comparación, en la cual se aprecia que las mezclas Superpave son mezclas más competentes en términos de resistencia mecánica y susceptibilidad a la humedad.

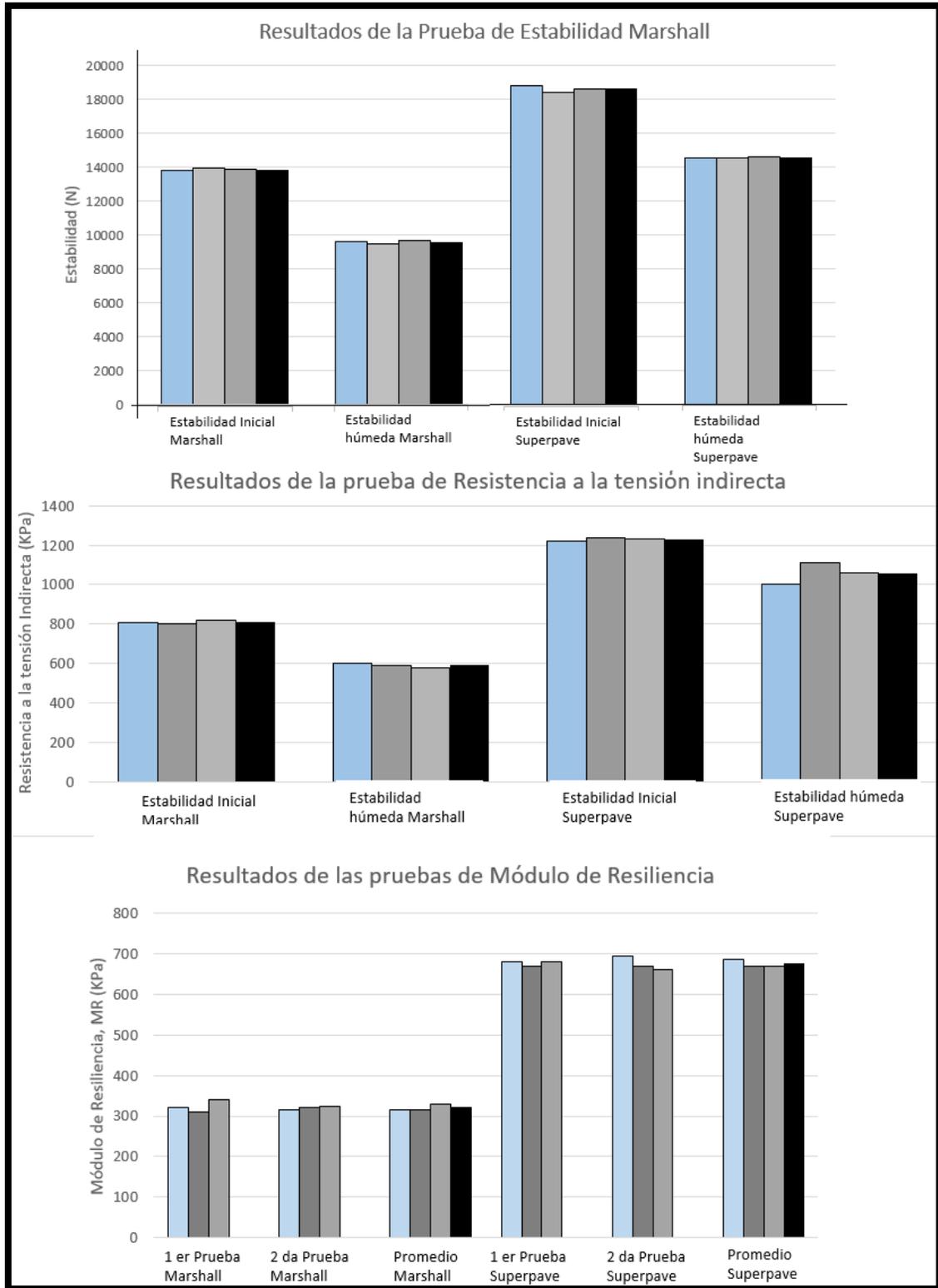


Figura 1-4. Comparativa de desempeño de mezclas Marshall vs SUPERPAVE. Adaptado de Jitsangiam (2013).

### 1.3 Descripción del problema.

En las ciudades mexicanas existen vialidades cuyos pavimentos asfálticos presentan fallas tanto funcionales (baches, desgranamiento, entre otras.), como estructurales (baches, piel de cocodrilo, etc.), pues ya cumplieron con su vida útil y ya no ofrecen una superficie de rodamiento cómoda y segura. Esto mismo sucede en muchas carreteras y autopistas en la nación.

Sin embargo, la reconstrucción de esas vialidades involucra la utilización de nuevos materiales y la explotación de la naturaleza para conseguirlos. No obstante, los pavimentos asfálticos pueden reciclarse, ayudando consigo a la sustentabilidad; es decir, en lugar de utilizar materiales vírgenes y procesados, se puede utilizar un porcentaje significativo del material existente.

Por otro lado, todavía faltan recomendaciones, estudios o metodologías que integren a los materiales reciclados como el "RAP" en los diseños de mezclas, que proporcionen productos de Alto Desempeño y aseguren una larga vida útil, reduciendo consigo los costos por trabajos de conservación y/o reconstrucción de los pavimentos.

Por lo tanto, se puede plantear la siguiente pregunta: ¿Se puede incorporar RAP en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño de granulometría densa (Protocolo AMAAC) para que nos asegure estructuras de pavimento más eficientes y duraderas?

#### 1.4 Hipótesis.

La utilización de altos contenidos (mayor de 15%) de recuperado de pavimento asfáltico (RAP) permite producir mezclas asfálticas recicladas que desarrollen propiedades de alto desempeño, esto es, baja susceptibilidad al daño inducido por humedad ( $TSR \geq 80\%$ ), reducida susceptibilidad a las deformaciones permanentes (profundidad de rodera menor a 10 mm en rueda cargada de Hamburgo) y con comportamiento en ensayos dinámicos de igual o inclusive superior calidad a los que exhiben las mezclas asfálticas vírgenes.

#### 1.5 Objetivos.

##### General:

Establecer una metodología para el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño de granulometría densa teniendo como guía el Protocolo AMAAC 2013, con distintas proporciones de recuperado de pavimento asfáltico (RAP).

##### Particulares:

Determinar el porcentaje máximo de RAP que puede incorporarse a una mezcla reciclada para que esta pueda considerarse de “alto desempeño” según Protocolo AMAAC 2013.

Determinar el impacto de un aditivo rejuvenecedor en el rendimiento de las mezclas recicladas, así como en la reducción de consumo de asfalto.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1 Antecedentes.

Los primeros casos documentados del uso del RAP en la construcción de pavimentos asfálticos datan de principios de 1900's; sin embargo, como resultado del Embargo Petrolero Árabe de principios de los años 1970's, se incrementaron los precios del hidrocarburo como de la energía en general, provocando por consiguiente el alza de los precios de los aglutinantes asfálticos. Con esto surgió la necesidad de implementar el reciclado de pavimentos asfálticos, siendo fortalecido por la introducción y desarrollo de equipos para el fresado de los pavimentos. De hecho, los primeros esfuerzos de la recuperación y reutilización de materiales de pavimento asfáltico de los que se tiene conocimiento fueron desarrollados durante 1974 en Nevada y Texas (Newcomb *et al.*, 2007; Hajj *et al.*, 2009; Copeland, 2011; West, 2015).

En 1977 la *National Asphalt Pavement Asociacion* (NAPA) publicó el primer "Reporte sobre reciclado", en un entorno en el cual el reciclado de las mezclas asfálticas era completamente desconocido y nuevo. Por su parte, entre 1978 y 1980, la *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) publicó dos documentos afines al tema. El primero fue la "Síntesis práctica de carreteras No.54", y el "reporte No.224 sobre reciclado de materiales para carreteras", ambos dirigidos hacia el reciclado de materiales de pavimentos, mediante la unión de experiencias de distintas dependencias y organizaciones interesadas en el tema (Young, 1996; Newcomb *et al.*, 2007).

La implementación del sistema Superpave en los Estados Unidos, limitó el uso de RAP en mezclas asfálticas, debido a que esta metodología de diseño había sido concebida solo para su uso en materiales vírgenes (asfalto y agregados); sin embargo, a mediados de los años 1990's, NAPA trabajó en sinergia con la *Federal Highway Administration* (FHWA) y la *American Asociation State Highway Transportation Officials* (AASHTO) con el fin de establecer nuevos lineamientos que hicieran posible la utilización de estos subproductos en las mezclas asfálticas

Superpave. Posteriormente, el documento “NCHRP 9-12, Incorporación de Pavimento Asfáltico Recuperado en el sistema Superpave”, confirmó la posibilidad de usar RAP en los diseños de mezclas asfálticas, así como lineamientos y procedimientos para ejecutar dichos diseños (Young, 1996).

En el año 2006 se registró una situación equiparable con la de los años setenta durante el embargo petrolero. Grandes incrementos en los costos de energía y de los cementos asfálticos dieron como resultado un aumento considerable en los costos de fabricación y transporte de las mezclas asfálticas en caliente, además que en algunas regiones de los Estados Unidos se presentó escasez de cemento asfáltico. Aunado a esto, se observó un aumento en la preocupación por el medio ambiente derivado de lo difícil de extraer nuevas fuentes de agregado (Newcomb *et al.*, 2007). Hoy en día el uso del RAP se ve ampliamente afectado por dos factores: ahorros económicos y los beneficios ambientales (Newcomb *et al.*, 2007; Izaks *et al.*, 2015).

## 2.2 Consideraciones para el diseño de mezclas asfálticas recicladas en caliente.

Diversas han sido las experiencias de algunos investigadores alrededor del mundo con respecto al diseño de mezclas recicladas, así como su posterior análisis de desempeño. Los más importantes son los siguientes:

### a) Grado de mezclado o compatibilidad.

En el diseño de mezclas asfálticas recicladas se han reconocido tres condiciones en cuanto a la interacción que existe entre los asfaltos envejecidos y los vírgenes, las cuales son (Al-Qadi *et al.*, 2007; Shirodkar *et al.*, 2011; Zaumanis *et al.*, 2014b):

- Mezclado Total, en el cual se considera un 100% de mezclado entre ambos aglutinantes. Considerar esta condición, puede llevar a formular mezclas rígidas y subestimadas en asfalto que presentarán problemas de agrietamiento y desgranamiento del pavimento.

- Roca Negra, en la cual no existe el mezclado entre aglutinantes y el RAP es considerado como un agregado más. Esta condición puede generar mezclas suaves y sobreestimadas en asfalto que son propensas al daño por deformación permanente (formación de roderas).
- Práctica Real o Mezclado Parcial, en la cual se reconoce que existe un grado de mezclado o compatibilidad entre los aglutinantes y la interacción entre ambos dictará el desempeño de la mezcla. El grado de mezclado es definido como el porcentaje de asfalto envejecido de RAP que es reactivado en una mezcla asfáltico por la presencia de un agente rejuvenecedor o un asfalto más suave (Coffey *et al.*, 2013).

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores, resulta de suma importancia conocer la forma como se comportará el aglutinante asfáltico definitivo dentro de la mezcla reciclada. En el trabajo de (Shirodkar *et al.*, 2011) se presenta la formulación de una metodología para determinar el grado de mezclado parcial en las mezclas con alto contenido de RAP. El experimento consistió en combinar RAP que pasa la malla No. 8 (2.36 mm), agregado virgen retenido en la malla No. 4 (4.75 mm) y dos cementos asfálticos de distinto grado de desempeño (PG). Se realizó un estudio de recubrimiento del asfalto sobre los agregados y finalmente se propusieron las siguientes expresiones:

$$Tasa\ de\ mezclado = \frac{|A(ag.\ virgen)_{a.m.} - A(ag.\ RAP)_{a.m.}|}{|A_{a.v.} - A_{a.RAP}|} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

$$Grado\ de\ Mezclado\ (\%) = 100 |1 - Tasa\ de\ mezclado| \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Dónde:

A = Propiedad del aglutinante que se desea conocer, por ejemplo, el factor de ahuellamiento “G\*/sen δ”;

- (ag. virgen) <sub>a.m.</sub> = Proveniente del asfalto mezclado que cubre los agregados vírgenes;
- (ag. RAP) <sub>a.m.</sub> = Proveniente del asfalto mezclado que cubre los agregados del RAP;
- a.v. = Proveniente del asfalto virgen;
- a.RAP = Proveniente del asfalto del RAP.

El estudio concluyó que el grado de mezclado parcial del aglutinante de RAP depende de factores tales como la temperatura de los agregados durante el mezclado, el grado PG del asfalto, las propiedades del asfalto de RAP, el porcentaje de RAP, y las propiedades del asfalto virgen. También encontraron que el grado de mezclado parcial es mayor en aglutinantes más suaves, y que es independiente de la temperatura de ensaye del asfalto. La metodología completa es explicada a detalle en la referencia bibliográfica correspondiente.

Heneash (2013), en contraste, menciona que el tiempo de precalentamiento del RAP afecta las propiedades de la mezcla reciclada, pues periodos cortos no permiten que las partículas de RAP se disgreguen ni se mezclen con los materiales vírgenes. Sin embargo, períodos largos provocan un extra envejecimiento que endurece al RAP e imposibilita el mezclado. Por lo tanto, se menciona que debe determinarse la duración óptima de precalentamiento para facilitar el mezclado. Además, se indica que el RAP de menor tamaño ayuda a la homogeneidad, aunque su efecto es despreciable cuando se aplica precalentamiento.

Coffey *et al.* (2013) concluyeron que la predicción en la formación de roderas no se ve afectada significativamente por el grado de mezclado asumido ni por la calidad del RAP, caso contrario a la predicción de agrietamiento por fatiga, donde se presentan diferencias importantes entre las mezclas con distintas calidades de RAP, esto es, conforme mejora la calidad del RAP, se reducirán las diferencias en desempeño entre las mezclas con grados de mezclado real y completo. Los autores recomiendan suponer que se realizó un mezclado completo cuando el grado de

mezclado sea mayor al 85%, sin comprometer el desempeño de la mezcla, siempre y cuando el RAP sea uniforme en granulometría y sea separado en fracciones de tamaño. La suposición adecuada del grado de mezclado puede ser crítica en el desempeño ante la fatiga, sobre todo para tráfico pesado.

b) Interacción entre asfaltos vírgenes y envejecidos.

Las propiedades fundamentales para caracterizar un asfalto envejecido son el módulo de corte dinámico ( $G^*$ ), ángulo de fase ( $\delta$ ) y viscosidad. Partiendo de lo anterior, hace falta determinar que cemento asfáltico virgen (asfalto de aporte) se debe incorporar para una dosificación determinada de RAP o viceversa. En la Tabla 2-1 se muestra el enfoque propuesto por AASHTO M323, donde para altos contenidos de RAP se debe acudir a cartas de mezclado como las que se muestran en la Figuras 2-1 (Al-Qadi *et al.*, 2007; Copeland, 2011; Rad, 2013).

Tabla 2-1. Especificación para la selección del aglutinante virgen para mezclas con RAP.

Porcentaje de RAP por utilizar	Observaciones
< 15	Sin cambio en la selección del grado PG
16 al 25	Reducir un grado PG
> 25	Utilizar carta de mezclado

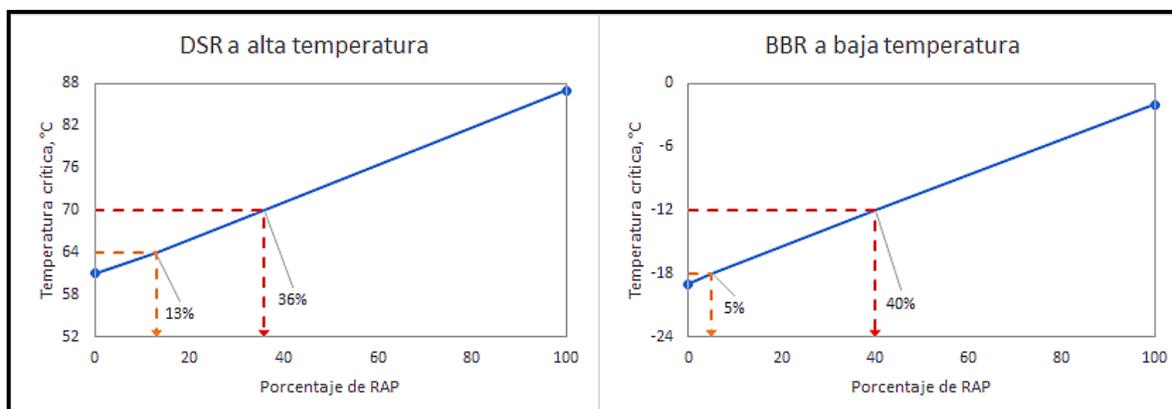


Figura 2-1. Cartas de mezclado para la determinación de la alta temperatura crítica y baja temperatura crítica para el asfalto de aporte, mediante módulo de corte dinámico (DSR) y módulo de rigidez (BBR).

Se tienen entonces dos opciones (Al-Qadi *et al.*, 2007; Copeland, 2011):

- Determinar el grado PG del asfalto de aporte manteniendo fijo el porcentaje de RAP. Se parte de conocer la temperatura crítica del asfalto de diseño que se desea alcanzar con la mezcla de aglutinantes y la temperatura crítica del asfalto de RAP, la línea que forman es extendida hasta el eje de las ordenadas que corresponde a 0% de RAP. La siguiente expresión también puede ser utilizada:

$$T_v = \frac{T_{mezcla} - (\%RAP \times T_{RAP})}{(1 - \%RAP)} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

- Determinar cuál será el porcentaje de RAP, cuando se ha fijado la Temperatura crítica del aglutinante de diseño, para lo cual se traza una línea horizontal partiendo del valor de Temperatura crítica, se intercepta la gráfica y se obtiene el porcentaje de RAP correspondiente. De manera alterna se utiliza la expresión:

$$\%RAP = \frac{T_{mezcla} - T_v}{T_{RAP} - T_v} \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Dónde:

$T_{mezcla}$  = Temperatura de falla de la mezcla de aglutinantes asfálticos,

$T_v$  = Temperatura de falla del asfalto virgen,

$T_{RAP}$  = Temperatura de falla del asfalto proveniente de RAP,

$\%RAP$  = Porcentaje de RAP que se incorporará a la mezcla reciclada.

En el estudio realizado por Noferini *et al.* (2017) se investigó la interacción entre un asfalto nuevo y un asfalto envejecido (RAP), con el cual definieron valores umbrales en los que el asfalto envejecido no provee cambios significativos en el aglutinante asfáltico total. Durante este trabajo contenidos de RAP en la mezcla de 0%, 10%, 20% y 30% fueron probados. Los resultados finales de este trabajo

apuntan a que incrementar el contenido de RAP en una mezcla tiene como consecuencia un incremento en el punto de reblandecimiento y en la viscosidad, producto del endurecimiento del aglutinante compuesto. Los análisis reológicos mediante la curva maestra del Módulo de corte dinámico ( $G^*$ ), el Diagrama de Cole-Cole y el Espacio de Black, muestran que un endurecimiento en el aglutinante está acompañado de un incremento en el comportamiento elástico, provocado por la presencia de RAP en la mezcla de aglutinantes. Con estos últimos gráficos, es posible identificar cuando el comportamiento de los aglutinantes pasa de elástico a viscoso, lo que permite un mejor entendimiento de los mismos en función del cambio de temperatura. Por último, resumen que para contenidos de RAP iguales o inferiores al 10%, no habrá cambio significativo en el comportamiento del aglutinante combinado; sin embargo, para contenidos mayores al 20% de RAP, se debe realizar una investigación de laboratorio para determinar el comportamiento final.

No obstante, el desarrollo de las anteriores investigaciones requiere de la extracción del asfalto proveniente del RAP para poder estudiar su interacción con otros aglutinantes. Debido a que los procesos de extracción de asfalto pueden alterar su composición química (uso de solventes), Riccardi *et al.* (2017) desarrollaron un modelo para retro-calcular las características reológicas de los aglutinantes del RAP y de su combinación, a partir de mediciones en el Reómetro de Corte Dinámico para morteros de RAP, todo con la finalidad de acudir a un método sencillo, rápido en ejecución y con buena aproximación.

La metodología vista hasta el momento pretende mitigar los efectos del envejecimiento del asfalto de RAP, que como se comentó, tiene efectos negativos en el desempeño de las mezclas recicladas. Lo anterior se realizó considerando añadir asfaltos más suaves suponiendo que existe un Mezclado Total. Sin embargo, el uso de aditivos rejuvenecedores ofrece otra alternativa para suministrar aglutinantes de diseño, su uso también es ampliamente conocido y se comenta a continuación.

c) Aditivos rejuvenecedores y su influencia en las mezclas recicladas.

Los aditivos rejuvenecedores son compuestos orgánicos que tienen la finalidad de restaurar las propiedades físicas, químicas y reológicas de los asfaltos degradados, es decir, invertir el proceso de envejecimiento para resistir otro período de servicio. Por otro lado, los agentes ablandadores solo se encargan de reducir la viscosidad de los asfaltos envejecidos, efecto que también logran los rejuvenecedores (Al-Qadi *et al.*, 2007; Heneash, 2013; Zaumanis *et al.*, 2014b).

El uso de agentes rejuvenecedores trae consigo las siguientes ventajas (Yu *et al.*, 2014; Zaumanis *et al.*, 2015):

- Amplían el rango de uso de RAP, por consiguiente, favorecen el uso de 100% de RAP.
- Almacenamiento económico, ya que por lo general no requieren calentamiento.
- Fácil adición en la mezcla mediante bombas o sistemas de dosificación en líquido.
- Alta probabilidad de dosificarlos adecuadamente en base a las propiedades del asfalto de RAP.
- Por lo general, reducen los costos en la fabricación de mezclas asfálticas recicladas.

Dos aspectos deben ser tomados en cuenta cuando se desea compensar el envejecimiento de un asfalto mediante el uso de rejuvenecedores: la selección del tipo de agente rejuvenecedor y su dosificación. Los agentes rejuvenecedores, deben ser compatibles con el asfalto envejecido, lo cual se logra con aditivos con bajo contenido de saturados pero alta proporción de aromáticos. Además, tanto la incompatibilidad, como la sobredosis de estos productos puede ser causa de deterioros en el pavimento, especialmente daños inducidos por humedad debidos a la falta de adherencia de los agregados con el aglutinante (Al-Qadi *et al.*, 2007; Zaumanis *et al.*, 2014b). Una dosis adecuada de agente rejuvenecedor debe reducir

la rigidez del aglutinante combinado y mejorar la resistencia al agrietamiento sin comprometer la resistencia a la formación de roderas (Zaumanis *et al.*, 2014a).

Con respecto a lo anterior, Zaumanis *et al.* (2013) y Zaumanis *et al.* (2014a) categorizaron agentes rejuvenecedores de acuerdo a su capacidad de restablecer las propiedades del asfalto envejecido. Algunos productos probados fueron manufacturados para ese fin, otros son de origen orgánico y también algunos materiales de desecho fueron considerados. Las pruebas de deformación por fluencia a la tensión indirecta (AASHTO T322), la prueba de resistencia a la tensión indirecta (ASTM D6931), la prueba penetración y las pruebas reológicas (en DSR y BBR) fueron utilizadas en estos estudios. Sus resultados proponen un Índice de Penetración (PI) determinado a partir de dos temperaturas, el cual es una buena medida para predecir el desempeño de las mezclas a bajas temperaturas (recomienda un  $PI \leq 2.23$  para evitar agrietamiento térmico). Se descubrió que la alta y baja temperatura del grado de desempeño de un aglutinante envejecido se puede reducir linealmente aumentando la dosis de rejuvenecedores, mientras que la penetración exhibe un comportamiento exponencial ante tales incrementos. La contribución más importante fue el establecimiento de un rango de dosis de rejuvenecedor en las que se consiguen las propiedades de diseño del aglutinante. La dosis máxima se establece para asegurar suficiente resistencia al ahuellamiento, mediante la ecuación 2-5:

$$Dosis\ máx.\ (\%) = \frac{(PG\ alta_{objetivo} - PG\ alta_{RAP}) * (-1 * \%_{prueba})}{PG\ alta_{RAP} - PG\ alta_{prueba}} \quad \text{Ecuación 2-5}$$

Dónde:

- PG alta objetivo = Grado de desempeño para alta temperatura del aglutinante de diseño (objetivo),
- PG alta RAP = Grado de desempeño para alta temperatura del aglutinante de RAP,
- PG alta prueba = Grado de desempeño para alta temperatura en el primer intento o mezcla de prueba,

$\%_{prueba}$  = Porcentaje de RAP que se incorporará a la mezcla reciclada.

Por otro lado, la dosis mínima se considera aquella que cumple el requisito de resistencia al agrietamiento ante bajas temperaturas (PG baja) y resistencia a la fatiga (PG intermedio), la que resulte mayor y se calculan conforme a la ecuación 2-6 y ecuación 2-7:

$$Dosis\ mín.\ (\%) = \frac{(PG\ baja_{objetivo} - PG\ baja_{RAP}) * (-1 * \%_{prueba})}{PG\ baja_{RAP} - PG\ baja_{prueba}} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

$$Dosis\ mín.\ (\%) = \frac{(5000 - PG\ intermedio_{RAP}) * (-1 * \%_{prueba})}{PG\ intermedio_{RAP} - PG\ intermedio_{prueba}} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

Dónde:

PG baja objetivo = Grado de desempeño para baja temperatura del aglutinante de diseño (objetivo),  
 PG baja RAP = Grado de desempeño para baja temperatura del aglutinante de RAP,  
 PG baja prueba = Grado de desempeño para baja temperatura en el primer intento o mezcla de prueba,  
 PG intermedio RAP = Grado de desempeño para temperatura intermedia del aglutinante de RAP,  
 PG intermedio prueba = Grado de desempeño para temperatura intermedia en la mezcla de prueba,  
 $\%_{prueba}$  = Porcentaje de RAP que se incorporará a la mezcla reciclada.

Por último, los resultados de las investigaciones indicaron que los rejuvenecedores orgánicos son más efectivos ya que requieren dosis menores para provocar un ablandamiento similar, en comparación con los derivados de petróleo.

De suma importancia en la utilización de agentes recicladores (asfaltos suaves o aditivos rejuvenecedores) es la difusión, el cual es un proceso de movimiento aleatorio de transferencia de masa (moléculas) generado por una ganancia de energía (Rad, 2013). En las mezclas asfálticas recicladas, la ganancia de energía se debe al calentamiento de todos los componentes y conforme mayor sea la temperatura, mayor será la velocidad de difusión de los agentes recicladores. La difusión se presenta durante el mezclado, almacenamiento, transporte, tendido y compactación de las mezclas asfálticas, aunque también puede continuar cuando el pavimento es puesto en servicio (Heneash, 2013; Zaumanis *et al.*, 2014b).

El proceso de difusión es seriamente afectado por la forma, tamaño y fuerza de inter-atracción de las moléculas, así como de la temperatura (Rad, 2013). La importancia de una adecuada difusión radica en el desempeño de las mezclas, pues la falta de activación del asfalto envejecido conlleva a una condición similar al de la “Roca Negra” perjudicando la resistencia al agrietamiento; por el contrario, si se produce una alta activación se podría pensar en la condición de mezclado completo con sus correspondientes deformaciones plásticas. Otro problema identificado para una inadecuada difusión, es cuando un pavimento con mezcla reciclada es abierto a la circulación y el rejuvenecedor no se ha dispersado en la mezcla reciclada, la imposición de cargas vehiculares podría provocar exudación del producto y reblandecer excesivamente la superficie de rodamiento, lo que originaría la formación de roderas. Para evitar lo anterior, prácticas como incrementar las temperaturas de mezclado y compactación, así como prolongar el tiempo de mezclado y almacenamiento han sido identificadas como recomendables (Zaumanis *et al.*, 2014b).

### 2.3 Diseño y análisis de desempeño de mezclas asfálticas recicladas en caliente.

Huang *et al.* (2011) presentaron un estudio que evaluó el desempeño mediante los ensayos de Tensión Indirecta, Módulo de Resiliencia, la resistencia a la Fatiga en la viga a flexión en cuatro puntos y un ensayo de flexión semicircular,

de mezclas asfálticas que contenían RAP cribado por la malla No. 4, en proporciones de 0,10, 20 y 30%. Se utilizaron dos tipos de agregados, mientras que el RAP fue obtenido de 4 fuentes distintas y los cementos asfálticos de aporte fueron clasificados como PG 64-22, PG 70-22 y PG 76-22. Durante los ensayos se encontró que, para envejecimientos a largo plazo y a mayores contenidos de RAP, la mezcla se rigidiza, lo que conlleva a un incremento en el valor de módulo de resiliencia, pero reduce la energía de fatiga y energía disipada de deformación por fluencia. Los asfaltos más suaves tienen la tendencia de reducción en la resistencia al agrietamiento por fatiga, sin embargo, cuando se trata con un asfalto modificado, esa tendencia de reducción no es tan impactante. El análisis global de los resultados de ese estudio concluyó que la inclusión de RAP pondría en peligro la resistencia al agrietamiento de las mezclas asfálticas en distintos grados.

Otra forma de medir la energía de deformación a la falla o Energía de Fractura es la prueba Fénix. Miró *et al.* (2011) y Valdés *et al.* (2011) hacen uso de esta prueba, la cual consiste en someter a esfuerzos de tensión a una mitad de probeta cilíndrica a la cual se le hace una hendidura por donde se propaga la falla. La prueba se aplica a velocidad constante de 1 mm/min y temperatura específica. Ambos autores han concluido que esta es una buena medida para con ello estimar la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas recicladas, indicando además que cuando se incluye RAP en una mezcla, se obtienen valores similares a los que se obtienen en mezclas nuevas.

Con una idea similar, Izaks *et al.* (2015) evaluaron mezclas asfálticas recicladas con RAP proveniente de dos fuentes distintas y dosificado al 30% y 50%, para compararse contra una mezcla de materiales vírgenes. Dos tipos de agregado virgen fueron utilizados, se utilizó un asfalto virgen clasificado como 70/100 para ser utilizado en la mezcla de referencia y otro más suave clasificado como 50/70 para mezclarse con el asfalto envejecido del RAP y compensar la pérdida de viscosidad. Los resultados de las propiedades volumétricas son comparados contra las especificaciones de Letonia, la mezcla fue diseñada por el Método Marshall para intensidades medias y altas de tránsito, y las propiedades de desempeño fueron

evaluadas mediante la Estabilidad y Flujo Marshall, el ensaye de la rueda cargada para medir la resistencia a la formación de roderas, el ensayo de la viga a flexión en cuatro puntos para medir la resistencia a fatiga y el módulo de rigidez de la mezcla. Los resultados de los ensayos demostraron lo siguiente:

- Los vacíos de aire se reducen en las mezclas recicladas cuando se incrementa el porcentaje de RAP, debido a la adición de agregado fino.
- Las mezclas con mayor cantidad de RAP muestran incrementos en la Estabilidad y Flujo Marshall.
- En el ensaye de la rueda cargada, todas las mezclas recicladas cumplieron las especificaciones de Letonia, sin embargo, las mezclas con 30% de RAP demostraron menor deformación permanente y menor valor en la pendiente de la gráfica de la rueda cargada.
- En cuanto a los ensayos de rigidez y fatiga, encontraron que no existe diferencia significativa entre las mezclas recicladas y las vírgenes.

Como última recomendación de esta investigación se indica que “incrementar” el contenido de asfalto efectivo de las mezclas recicladas ayudará a incrementar la durabilidad y resistencia a fatiga de dichas mezclas asfálticas.

Sin embargo, las anteriores investigaciones presentan el inconveniente de diseñar las mezclas asfálticas con el Método Marshall, el cual es un procedimiento empírico que carece de la facultad de identificar con precisión toda aquella mezcla susceptible a deformarse. Su forma de compactar (mediante impactos) no es representativa de la densificación que se produce en la construcción de un pavimento. Por el contrario, el método Superpave desarrollado por la SHRP cubre las deficiencias de la anterior alternativa (Asi, 2007; Jitsangiam *et al.*, 2013).

Tomando en cuenta lo anterior, una investigación como la de Schieber (2012) analizó mediante la Rueda Cargada de Hamburgo (HWT), el comportamiento de mezclas asfálticas diseñadas con el método Superpave que incorporaban RAP y que fueron colocadas en campo. Encontraron que las mezclas con altos contenidos de RAP (del 35 al 50%) se comportaron mejor (mayor número de pasadas en el

ensayo y menor profundidad de rodera como resultado) que aquellas mezclas con un rango de 25 a 30% de RAP. Los autores explican que esto es debido al endurecimiento del asfalto que proviene del RAP. Por otro lado, también investigaron la influencia de otras fuentes de asfalto de aporte sobre las mezclas diseñadas y encontraron distintos comportamientos aun y cuando todos los asfaltos tenían la misma clasificación (PG 58-28). Por último, al analizar las propiedades volumétricas de las mezclas encontraron que solo los vacíos en el agregado mineral (VAM) tienen significancia en el desempeño de la mezcla ante la formación de roderas.

Un estudio comparativo de laboratorio elaborado por Ghabchi *et al.* (2016), reportó que las proporciones de RAP, así como de RAS (reciclado de tejas de asfalto, por sus siglas en inglés), tiene diversos efectos en el comportamiento de las mezclas asfálticas recicladas. En este estudio, se utilizaron 2 asfaltos clasificados como PG 64-22 y PG 70-28, para los cuales se utilizaron 4 dosificaciones de RAP/RAS. Los autores acusan al RAS como el principal causante de la reducción de ciclos de carga en los ensayos de Fatiga. Los autores también señalan que el incremento en la rigidez de las mezclas, tal y como se indica en los resultados de Módulo Dinámico, es un indicativo de que dichas mezclas recicladas se desempeñaran de manera adecuada ante el fenómeno de ahuellamiento. Sin embargo, ese aumento de rigidez lleva consigo un aumento en el potencial de agrietamiento por baja temperatura.

Shen *et al.* (2007), por su parte, evaluaron el desempeño de mezclas Superpave de 9.5 mm de tamaño nominal, conteniendo desde 0% a 38% de RAP cuando se utilizaba un asfalto suave y desde 0% a 48% cuando se utilizaba un aditivo rejuvenecedor. También, se investigó la factibilidad de utilizar cartas de mezclado de asfaltos envejecidos que contenían aditivo rejuvenecedor haciendo uso del reómetro de corte dinámico (DSR) y el reómetro de viga a flexión (BBR) y así determinar el contenido adecuado de ese producto para cumplir con las especificaciones Superpave para cementos de asfálticos. Los resultados del diseño volumétrico y propiedades de desempeño apuntan que la resistencia a la formación

de roderas para las mezclas que contienen RAP y aditivo rejuvenecedor es tan buena o incluso mejor que la que ofrecen las mezclas con asfaltos suaves. Además, los requisitos volumétricos y de Resistencia a la Tensión Indirecta (ITS) son cumplidos y equiparables con los obtenidos para las mezclas vírgenes de control.

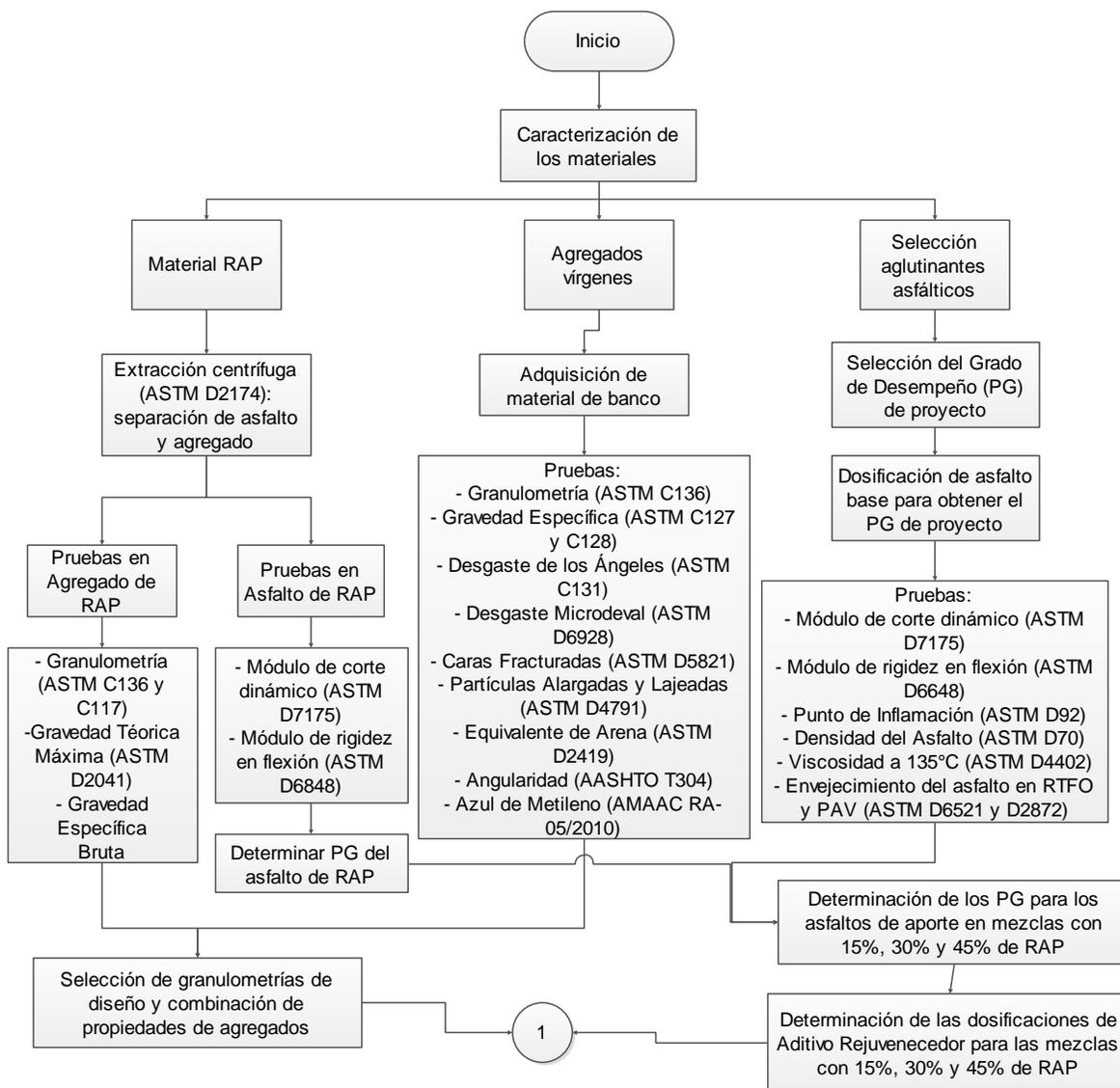
Algunos estudios han medido las cualidades de las mezclas recicladas a su máxima expresión, es decir mezclas 100% RAP, como es el caso de Silva *et al.* (2012) quienes utilizaron dos aditivos rejuvenecedores (ACF Interlene 1000 y aceite de motor) que se combinaron con un asfalto muy duro para simular el asfalto envejecido de RAP. La mejor dosis se encontró que fue al 5% con respecto a la masa del aglutinante. Todas las mezclas presentaron una alta resistencia al daño inducido por humedad medido en la prueba de Resistencia a la Tensión Indirecta (ITS) y cuando fueron sometidas al ensayo de rueda cargada para medir la deformación permanente, las mezclas rejuvenecidas exhibieron un comportamiento parecido a una mezcla convencional. El comportamiento ante la fatiga se vio mejorado ante la incorporación de aditivo rejuvenecedor, ya que, redujo la rigidez de la mezcla e incremento el ángulo fase. Conclusiones similares se aprecian con Elkashef y Williams (2017), quienes encontraron mejoría en el desempeño a bajas temperaturas y ante la fatiga en mezclas 100% recicladas al utilizar un aditivo rejuvenecedor derivado del aceite de soya.

Boyacá *et al.* (2015) compararon los comportamientos ante fatiga de mezclas elaboradas con 2 granulometrías distintas y dos asfaltos clasificados como 60/70 y 80/100. Confirmaron que todas las mezclas con RAP independientemente de la granulometría y asfaltos utilizados, son más rígidas y presentan mayores pendientes al momento de graficar sus comportamientos y obtener las leyes de fatiga que las rigen. Como conclusiones adicionales de los autores, explican que el mejor comportamiento a fatiga se tendrá con aquellas mezclas que estén bien dosificadas en la fracción fina, que sean mezclas con asfaltos suaves que aumenten la trabajabilidad, sean menos viscosos y por lo tanto menos rígidos lo que trae consigo una mayor capacidad de deformación (mayores ciclos de vida).



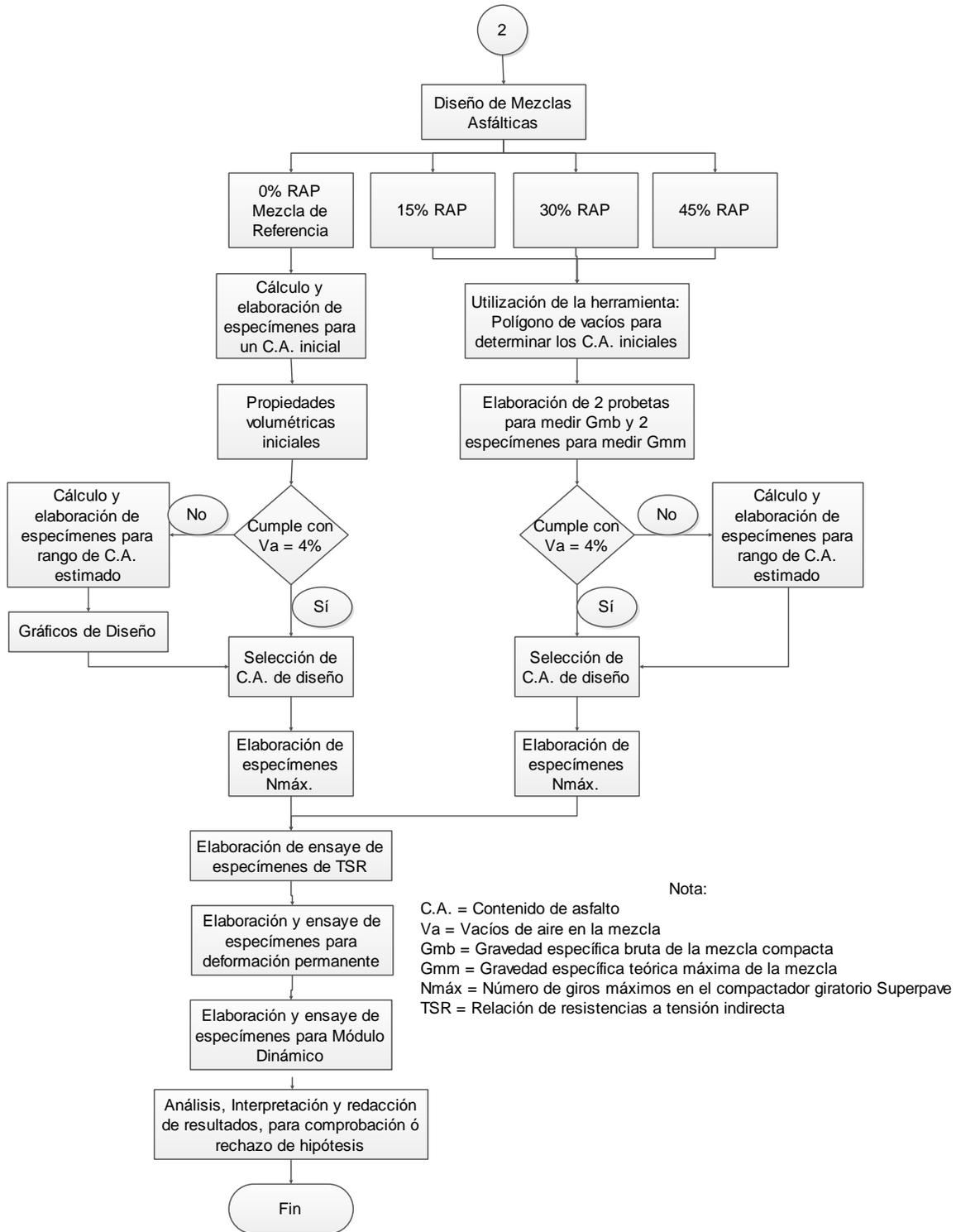
### 3. METODOLOGÍA

Los siguientes diagramas de flujo muestran el desarrollo experimental de este trabajo, cuyas etapas son las siguientes: 1) caracterización de materiales (Figura 3-1), 2) diseño volumétrico y análisis de desempeño de las mezclas diseñadas (Figura 3-2).



Nota:  
RTFO = Horno de Película Delgada Rotatoria  
PAV = Vasija de Envejecimiento a Presión

Figura 3-1. Primera etapa: Caracterización de materiales.



**Figura 3-2. Segunda etapa: Diseño volumétrico y análisis de desempeño de las mezclas asfálticas.**

### 3.1 Características de los materiales.

Este apartado indica los procedimientos necesarios para conocer las características de los materiales involucrados, lo cual será de ayuda para lograr el propósito de esta investigación, por lo que se llevan a cabo las siguientes etapas:

#### 3.1.1 Caracterización del RAP.

- Muestreo y Reducción de muestras de RAP.

El material RAP fue obtenido de los procesos de fresado de la carpeta asfáltica proveniente de una obra de reconstrucción de pavimento.

El RAP se almacenó en varios recipientes para facilitar su manipulación, de aquí se tomaron las muestras pertinentes mediante reducción para su posterior extracción de asfalto, así como la caracterización correspondiente de agregados (Figura 3-3a y 3-3b).



**Figura 3-3. Procesamiento del RAP. a) Almacenamiento del RAP muestreado. b) Cuarteador mecánico para la reducción de muestras de RAP.**

- Extracción Centrífuga del asfalto de RAP.

Las muestras de RAP para realizar esta actividad fueron preparadas mediante un calentamiento en horno. Se procedió con la extracción del cemento asfáltico proveniente del RAP, mediante el método de extracción centrífuga de ASTM D2174 que utiliza un equipo comúnmente llamado “Rotarex”, como el mostrado en la Figura 3-4. Con esto se determinó el contenido de asfalto proveniente de este material. A continuación, se ejecutó el ensayo ASTM D1856 “Método de Prueba Estándar para la recuperación de asfalto de una solución mediante el Método Abson” con lo que se separó el aglutinante asfáltico envejecido del solvente utilizado en la práctica anterior. Con esto se prepararon las muestras para la ejecución de pruebas de reología del mismo.



**Figura 3-4. Equipo Rotarex para la extracción centrífuga del cemento asfáltico proveniente del RAP.**

- Reología del asfalto envejecido de RAP.

El asfalto recuperado fue analizado para conocer su grado de desempeño (PG) mediante el reómetro de corte dinámico (DSR), con la finalidad de encontrar sus características (módulo complejo de corte dinámico y ángulo de fase) ante la alta temperatura crítica, según lo indicado en el método de prueba ASTM D7175. Además, el reómetro de viga a flexión (BBR) fue utilizado para determinar su comportamiento ante la baja temperatura crítica según el método ASTM D6648.

- Pruebas para los agregados de RAP.

Los agregados provenientes del RAP fueron sometidos a pruebas de granulometría según ASTM C136 y ASTM C117, para determinar su distribución por tamaños y verificar si es necesario algún tratamiento. Luego de lo anterior, se obtuvo la Gravedad Específica Teórica Máxima ( $G_{mm}$ ) de las muestras de RAP, de conformidad con ASTM D2041, de aquí, se retro-calculó la Gravedad Específica Efectiva del agregado ( $G_{se}$ ), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

**Ecuación 3-1.**  
**Fuente: AMAAC (2013).**

Dónde:

$G_{mm}$  = Gravedad Específica Teórica Máxima del RAP determinado de acuerdo con ASTM D2041.

$G_b$  = Gravedad Específica del asfalto de RAP, determinado mediante ASTM D70.

$G_{se}$  = Gravedad Específica Efectiva del agregado de RAP.

$P_b$  = Contenido de Asfalto en la muestra de RAP.

Según Newcomb *et al.* (2007), las pruebas de dureza/desgaste, forma y angularidad de partículas, limpieza y solidez, no son necesarias puesto que los productos RAP son materiales ya procesados que ya cumplieron esas características cuando se diseñó la mezcla a la cual pertenecían, además que muchas agencias en los Estados Unidos, las consideran inapropiadas e irrelevantes.

### 3.1.2 Caracterización de los agregados vírgenes.

- Muestreo y Reducción de muestras.

Las muestras representativas fueron proporcionadas por un banco de material de la región, mismas que serán útiles para formar el esqueleto mineral de las mezclas asfálticas. El muestreo debe realizarse conforme indica ASTM D75 “Práctica Estándar para el Muestreo de Agregados”.

La reducción de muestras se llevó a cabo mediante la combinación de cuarteo manual y cuarteo mecánico, con la finalidad de obtener muestras o especímenes representativos de tamaño adecuado a los ensayos que se realizaron, todo de conformidad con ASTM C702 “Práctica Estándar para la Reducción de Muestras de Agregados a Tamaños de Ensayo”. En la Figura 3-5 se aprecia la reducción de muestras haciendo uso de un cuarteador mecánico.



**Figura 3-5. Equipo cuarteador mecánico.**

Los agregados fueron sometidos a las pruebas que se enlistan en las Tablas 3-1 y 3-2, a fin de verificar su calidad con respecto a lo estipulado en el Protocolo AMAAC (2013):

**Tabla 3-1. Requisitos de calidad de la fracción gruesa del agregado pétreo virgen para mezclas asfálticas de granulometría densa. Adaptado de Protocolo AMAAC (AMMAC, 2013).**

Característica	Norma de referencia / año	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131 / 2006	30 máx. (capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	ASTM D6928 / 2010	18 máx. (capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Caras fracturadas, %	ASTM D5821 / 2006	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D4791 /2010	Relación 5 a 1, 10% máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D4791 /2010	Relación 5 a 1, 10% máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08/2010	90 mín.

**Tabla 3-2. Requisitos de calidad de la fracción fina del agregado pétreo virgen para mezclas asfálticas de granulometría densa. Adaptado de Protocolo AMAAC (AMMAC, 2013).**

Característica	Norma de referencia / año	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D2419 / 2009	50 mín. (capas estructurales) 55 mín. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T304 / 2011	40 mín.
Azul de metileno, ml/g	Recomendación AMAAC RA-05/2010	15 máx. (capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

- Análisis granulométrico de los agregados.

Los agregados se caracterizaron en primer lugar, mediante un análisis granulométrico en seco y vía húmeda como indican los Métodos Estándar de Prueba ASTM C136 y ASTM C117. La prueba consiste en hacer pasar la muestra de agregados a través de un conjunto de mallas como las mostradas en la Figura 3-6, cada una con distinta abertura y en orden decreciente, para evaluar la

distribución de tamaños de partículas en la muestra y observar el porcentaje en masa de dicha distribución.



**Figura 3-6. Mallas para granulometría, a la izquierda se encuentran las mallas para gravas y a la derecha las mallas para arenas.**

- Ensayo de Desgaste de los Ángeles.

Los agregados fueron también evaluados mediante la prueba descrita en ASTM C131 “Método de Prueba Estándar para la Resistencia a la Degradación de Agregado Grueso de tamaño pequeño por Abrasión e Impacto en la Máquina de Los Ángeles”. Esta prueba ha sido ampliamente utilizada como un indicador de la calidad relativa o competencia de varias fuentes de agregados que tienen composición mineral similar. La prueba mide la resistencia a la trituración de los agregados al introducirse en un tambor de acero (Figura 3-7) e impactar los agregados contra unas esferas de acero para degradar los agregados.



**Figura 3-7. Máquina de desgaste de los Ángeles.**

- Ensayo de Desgaste Micro-Deval.

Los agregados también fueron evaluados conforme a lo indicado en ASTM D6928 “Método de Prueba Estándar para la Resistencia de los Agregados Gruesos a la Degradación por Abrasión en el aparato Micro-Deval (como en la Figura 3-8), el cual determina la pérdida en masa de agregados por abrasión en presencia de agua y una carga abrasiva. Esta prueba se realiza de esta forma debido a que muchos agregados son más susceptibles a la abrasión cuando están húmedos que cuando se encuentran secos, por lo cual, el uso de agua en la prueba incorpora una reducción en la resistencia a la degradación comparado con otras pruebas que se realizan en seco.



**Figura 3-8. "Máquina Micro-Deval" para abrasión de los agregados gruesos.**

- Ensayo de Equivalente de Arena.

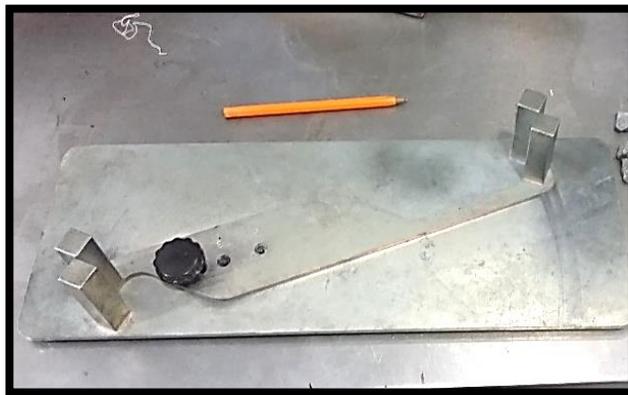
El agregado fino fue ensayado según ASTM D2419 “Método de Prueba Estándar para el Valor Equivalente de Arena de suelos y agregado fino”. El propósito de esta prueba es indicar bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de arcillas o finos plásticos (contaminación) presentes en los suelos granulares o agregado fino. El equipo básico para la realización de este ensayo se muestra en la Figura 3-9.



**Figura 3-9. Equipo para la prueba de Equivalente de Arena.**

- Ensayo de Forma de Partículas.

Ensayo llevado a cabo de conformidad con ASTM D4791 "Método de Prueba estándar para las partículas planas, partículas alargadas, o partículas planas y alargadas en el agregado grueso", utilizando el procedimiento B, el cual involucra una comparación de las dimensiones máximas de las partículas (largo, ancho y espesor) y es utilizado con especificaciones Superpave, con un equipo como el que se muestra en la Figura 3-10.



**Figura 3-10. "Calibrador Proporcional" para la prueba de partículas planas y alargadas.**

- Ensayo de Angularidad.

Este parámetro se determina conforme lo señala AASHTO T 304 "Método Estándar de prueba para la determinación del contenido de vacíos del agregado

fino”. Este método describe la forma de determinar la pérdida del contenido de vacíos de una muestra de agregado fino sin compactar. Cuando la medición se hace en cualquier agregado de graduación conocida, el contenido de vacíos proporciona un indicador de la angularidad, forma y textura superficial respecto a otros agregados finos probados en similares graduaciones. Cuando el contenido de vacíos es medido sobre una granulometría tal y como se recibe (granulometría natural), puede ser indicador del efecto del agregado fino en la trabajabilidad de la mezcla. El equipo adecuado para la ejecución de este ensayo es el mostrado en la Figura 3-11, el cual consiste en un embudo que vacía a una altura establecida una muestra de agregado fino sobre un recipiente de volumen conocido.



**Figura 3-11. Equipo de Angularidad para agregado fino.**

- Caras Fracturadas.

Similar a la prueba anterior, se realiza la prueba de caras fracturadas, aplicable en este caso para gravas. El ensaye se realiza de conformidad con ASTM D5821, buscando asegurar un alto grado de fricción interna del agregado y adecuada resistencia al ahuellamiento. Dicho parámetro queda definido como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4.75 mm con una o más caras fracturadas.

- Ensayo de Azul de Metileno.

Esta prueba se realizó con la finalidad de medir el grado de reactividad de los finos (material que pasa la malla No. 200) presentes en las muestras de arena para la fabricación de mezclas asfálticas, dicho fino puede tener influencia nociva en el desempeño de la mezcla, para lo cual se utiliza como medición el valor azul de metileno, de conformidad con la Recomendación AMAAC RA-05/2010.

- Ensayo de Gravedad Específica y Absorción.

Estas propiedades se obtienen mediante ASTM C127 “Método de Prueba estándar para la densidad, densidad relativa (Gravedad Específica), y absorción del agregado grueso”, y ASTM C128 “Método de Prueba estándar para la densidad, densidad relativa (Gravedad Específica), y absorción del agregado fino”. Estos valores son necesarios para diseño volumétrico de mezclas, tanto asfálticas como de concreto hidráulico. En las Figuras 3-12 y 3-13, se muestran equipos necesarios para la ejecución de ambas pruebas, como lo son básculas digitales, canastillas para agregados, matraz picnómetro, cono y pisón para pruebas de humedad superficial, termómetros, entre otros.



**Figura 3-12. Equipo para la determinación de la Gravedad Específica (Densidad) de los agregados gruesos.**



**Figura 3-13. Equipo para la determinación de la Gravedad Específica (Densidad) de los agregados finos.**

### 3.1.3 Selección de aglutinantes asfálticos.

#### 3.1.3.1 Selección del Grado de Desempeño (PG) de proyecto.

La selección del Grado de Desempeño del cemento asfáltico de proyecto se realizó conforme a lo estipulado en el Protocolo AMAAC 2013 (Anexo 1), para lo cual también se asignó como caso de estudio el lugar de donde se extrajo el RAP, haciendo imperante la necesidad de contar con las temperaturas de la zona, así como su posición geográfica. Lo anterior es de ayuda para calcular la temperatura teórica del pavimento a una profundidad de 2 cm. Las ecuaciones 3-1 y 3-2, se utilizaron para el cálculo de las temperaturas máximas y mínimas que debe cumplir el asfalto de proyecto (AMAAC, 2013).

$$T_{m\acute{a}x} = [(T_a - (0.00618 * Lat^2) + (0.2289 * Lat) + 42.2) * (0.9545)] - 17.78 \quad \text{Ecuaci3n 3-2.}$$

$$T_{min} = (0.859 * T_a) + 1.7 \quad \text{Ecuaci3n 3-3.}$$

donde:

$T_{\text{máx}}$  = Temperatura a los 20 mm de profundidad en el espesor de la capa asfáltica.

$T_{\text{mín}}$  = Temperatura mínima en la capa asfáltica

$T_a$  = Temperatura máxima/mínima del aire

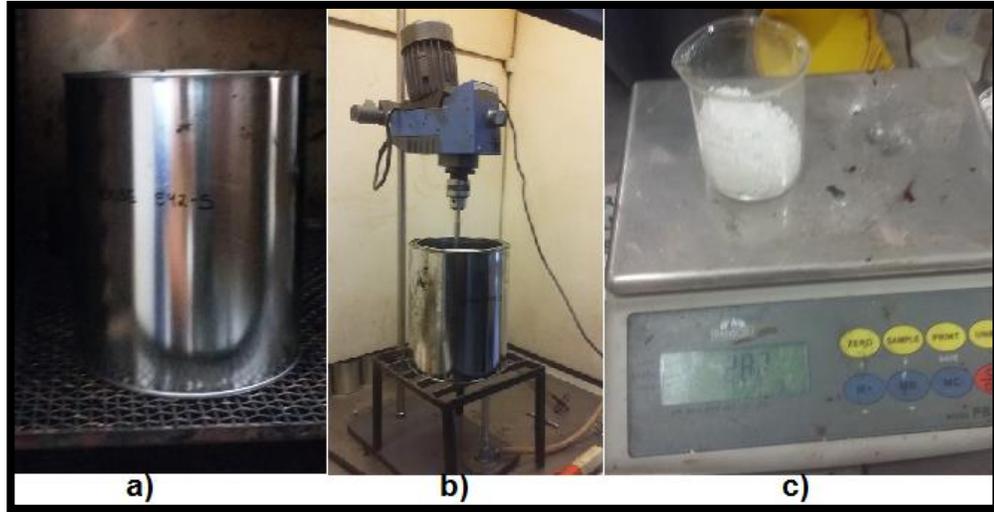
Lat = Latitud donde se tomó la temperatura.

Esta temperatura será ajustada por efectos de la temperatura del aire y la intensidad de tránsito que se pronostica, circulará por dicho pavimento. Por último, AMAAC sugiere un ajuste tomando en cuenta factores de confiabilidad, con lo cual se definirá el grado de desempeño que debe cumplir el asfalto que se utilizará para el diseño de la mezcla.

### *3.1.3.2 Dosificación de asfalto base para obtener el PG de proyecto.*

Se realizaron modificaciones al asfalto base con un modificador polimérico distribuido por el Grupo SURFAX, denominado “Elvaloy® 5170, terpolímero elastomérico reactivo” y un agente catalizador a base de “ácido poli-fosfórico” (PPA). A continuación, se analizaron y ajustaron las dosificaciones de los componentes antes mencionados, hasta fabricar un asfalto que cumpliera con el grado de desempeño deseado. La Figura 3-14, ilustra cómo se llevó a cabo este proceso:

- a) Se muestra el calentamiento de la muestra de asfalto en horno hasta llevarlo a una temperatura cercana a los 185 °C, que es la que recomienda LASFALTO para modificar el asfalto original,
- b) El conjunto es llevado a un equipo de mezclado donde se añaden las cantidades correspondientes de polímero,
- c) Se realizó el mezclado por un lapso de una hora y treinta minutos, luego de lo cual se añadió el catalizador para garantizar la disolución del polímero y se mezclaron por otros treinta minutos.



**Figura 3-14. Modificación de asfalto base para obtener el asfalto con PG de proyecto.**

Una vez que se estableció la dosificación ideal, se realizaron las pruebas de caracterización indicadas en la Tabla 3-3, cuyos resultados se compararon con lo establecido en ASTM D6373 “Especificación Estándar para el Grado de Desempeño de Aglutinantes Asfálticos” y la norma SCT N-CMT-4-05-004 “Calidad de materiales asfálticos grado PG”, lo cual se muestra en la Tabla 3-4:

**Tabla 3-3. Ensayos requeridos para el asfalto virgen grado PG para mezclas asfálticas. Adaptado de ASTM D6373.**

Característica	Norma de referencia / año
Punto de Inflamación	ASTM D92
Módulo reológico de corte dinámico	ASTM D7175 / 2008
Pérdida en masa	ASTM D2872 / 2004
Módulo reológico de corte dinámico, envejecido en RTFO	ASTM D7175 / 2008, ASTM D2872 / 2004
Densidad del asfalto “Gb”	ASTM D70 / 2009
Viscosidad Rotacional	ASTM D4402
Módulo reológico de corte dinámico, envejecido en PAV	ASTM D7175 / 2008, ASTM D6521 / 2008
Módulo de rigidez en viga a flexión (rigidez a la fluencia)	ASTM D6648 / 2008

**Tabla 3-4. Requisitos de calidad para el asfalto virgen grado PG para mezclas asfálticas.**

Grado de comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-22	-28	-34	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34
<b>Asfalto original</b>																	
Punto de inflamación Cleveland, °C, mín.	230																
Viscosidad a 135°C, Pa·s, máx.	3																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ), kPa, mín.	1																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
<b>Después de prueba de horno de película delgada rotatoria</b>																	
Pérdida por calentamiento; %, máx.	1																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ), kPa, mín.	2.2																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
<b>Después de envejecimiento en vasija de presión</b>																	
Temperatura de envejecimiento PAV; °C	100				100				100			100			100		
· En climas normales	100				110				110			110			110		
· En climas desérticos																	
Rigidización (G*sen δ); kPa, máx.	5000																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	25	22	19	16	28	25	22	19	31	28	25	34	31	28	34	31	28
Rigidización de Flexión S(t); MPa, máx.	300																
Temperatura de prueba @ 60 s; °C	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24

**Fuente: SCT N-CMT-4-05-004 “Calidad de materiales asfálticos grado PG”.**

- Módulo de corte dinámico.

Esta prueba se realizó de conformidad con ASTM D7175, en la cual se determinan las propiedades visco-elásticas lineales de los aglutinantes asfálticos. La prueba consiste en someter a una muestra de cemento asfáltico a tensiones de corte oscilante, mediante muestras comúnmente de 25 mm de diámetro y 1mm de espesor, o muestras de 8 mm de diámetro y 2 mm de espesor, que son colocadas

entre 2 platos paralelos. El equipo para realizar este ensayo es el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), como el que se muestra en la Figura 3-15, en el cual se mide la respuesta de la deformación específica por corte de la muestra que es sometida a un torque, con lo cual se calcula el Módulo de Corte Dinámico ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ).



**Figura 3-15. Reómetro de Corte Dinámico (DSR) para la determinación de las propiedades visco-elásticas lineales de los aglutinantes asfálticos.**

- Módulo de Rigidez a Flexión.

Esta importante propiedad se determina mediante un Reómetro de viga en flexión (BBR), como el que se muestra en la Figura 3-16. Esta prueba se llevó a cabo según lo indicado en ASTM D6648 “Método de Prueba Estándar para la determinación de la Rigidez de fluencia por flexión utilizando un Reómetro de viga a flexión”, y se aplica para caracterizar las propiedades de rigidez de los aglutinantes asfálticos a bajas temperaturas. La prueba consiste en someter a flexión a bajas temperaturas, a una probeta de cemento asfáltico, el cual ha sido moldeado en forma de viga. Al

conocer la carga aplicada y la deflexión en la viga, la rigidez de fluencia es calculada. Además del módulo de rigidez, este ensayo determina una propiedad conocida como pendiente “m”, la cual es el logaritmo de la velocidad de deformación por fluencia. Estas propiedades sirven para identificar cementos asfálticos que pudieran fisurarse por bajas temperaturas, así como identificar asfaltos más efectivos en términos de relajación de tensiones que se presentaran en los pavimentos.



**Figura 3-16. Reómetro de viga a flexión (BBR).**

- Punto de Inflamación.

Esta prueba se realizó de acuerdo con ASTM D92, en un equipo aplicador de flama como el que se muestra en la Figura 3-17. Esta prueba sirve para identificar las temperaturas en la que los cementos asfálticos comienzan a producir pequeñas flamas y la combustión del mismo. Esta prueba se realiza para añadir un factor de seguridad en las actividades que manejan el asfalto a elevadas temperaturas. La prueba consiste en incrementar gradualmente la temperatura de una muestra de asfalto contenida en un recipiente con mango, hasta que se comienzan a desprender y volatilizar los compuestos del asfalto, una flama se hace pasar por encima del recipiente y a la temperatura en la que se producen haces de luz, producto de la combustión de los gases expedidos al contacto con la flama, se le conoce como punto de inflamación.



**Figura 3-17. Equipo aplicador de flama para la determinación del punto de inflamación.**

- Densidad del asfalto.

Esta propiedad define las relaciones masa a volumen de una muestra de asfalto, con respecto de la densidad del agua; dicha propiedad, es ampliamente utilizada para el diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Esta prueba se realizó tal como indica ASTM D70. La Figura 3-18 muestra un matraz y una báscula, los cuales son necesarios para determinar este parámetro.



**Figura 3-18. Equipo para determinar la densidad del asfalto.**

- Viscosidad Rotacional.

Esta prueba se efectuó tomando los procedimientos indicados en ASTM D4402, en la cual una aguja de un determinado calibre es introducida en una muestra de cemento asfáltico contenida en un recipiente tubular y a temperatura controlada, se aplica un par de torsión, para luego medir la resistencia que ofrece la muestra a la deformación. La información que de aquí se obtiene, es útil para conocer la consistencia del aglutinante en un rango de temperaturas, y con ello saber si es un producto que pueda ser bombeado en las plantas de producción de mezcla asfáltica, es decir, saber si un asfalto es trabajable. La Figura 3-19 muestra un ejemplar de estos equipos.



**Figura 3-19. Viscosímetro Rotacional Brookfield.**

- Envejecimiento del asfalto.

Estas actividades se llevan a cabo en el Horno de Película Delgada Rotatoria (RTFO), de acuerdo a ASTM D2872, la cual es una práctica para simular el envejecimiento que se produce durante la producción, transporte, tendido y compactación de mezclas asfálticas; así como en la Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV), de conformidad con ASTM D6521, siendo esta, una simulación del envejecimiento y oxidación a largo plazo que sufren los concretos asfálticos que ya están en operación. Las Figuras 3-20 y 3-21, muestran los equipos a los que se acaba de hacer referencia.



Figura 3-20. Horno RTFO.



Figura 3-21. Horno PAV.

### 3.1.3.3 Determinación de los Grados de Desempeño para los asfaltos de aporte en las mezclas con RAP.

Una vez analizado el asfalto virgen (asfalto modificado) y el asfalto de RAP, se determinaron los Grados de Desempeño de los asfaltos de aporte para las distintas dosificaciones de RAP. El asfalto de aporte es el aglutinante modificado que se fabricó con anterioridad, el cual fue alterado con un aditivo rejuvenecedor denominado “SURFAX RF1”, en distintas proporciones, lo que reduce el grado de desempeño del aglutinante. Con lo anterior se pretende que la combinación del asfalto de aporte y el aglutinante envejecido proveniente del RAP, proyecte un PG igual o muy similar al asfalto que se utilizará en la mezcla de referencia (asfalto virgen en la mezcla con 0% de RAP). Para encontrar estos valores se tienen dos opciones, la primera es utilizar la fórmula siguiente:

$$T_v = \frac{T_{mezcla} - (\%RAP \times T_{RAP})}{(1 - \%RAP)}$$

**Ecuación 3-4.**  
**Fuente: Al-Qadi et al. (2007).**

donde:

$T_{mezcla}$  = Temperatura de falla de la mezcla de aglutinantes asfálticos, es decir, el PG de alta temperatura de la mezcla de aglutinantes, el cual debe ser igual al PG del asfalto virgen (modificado con polímero) de la mezcla de referencia.

$T_v$  = Temperatura de falla del asfalto de aporte, es decir, el PG de alta temperatura del asfalto virgen (modificado con polímero), y adicionado con el aditivo rejuvenecedor.

$T_{RAP}$  = Temperatura de falla del asfalto proveniente de RAP, es decir, el PG de alta temperatura del asfalto envejecido proveniente del RAP.

%RAP = Porcentaje de RAP que se incorporará a la mezcla reciclada.

Se sigue un procedimiento análogo para determinar el PG a bajas temperaturas.

#### *3.1.3.4 Determinación de las dosificaciones de Aditivo Rejuvenecedor para las mezclas asfálticas con RAP.*

Para esta etapa se mezclaron pequeñas muestras de asfalto modificado con distintos porcentajes de aditivo rejuvenecedor, hecho esto, se obtuvieron especímenes para ser ensayados en el Reómetro de corte dinámico DSR conforme a ASTM D7175, con lo cual se determinó el nuevo PG (o temperatura de falla) de cada uno de los especímenes. Se realizó una gráfica de contenido de aditivo versus temperatura de falla, con lo cual se determinaron los porcentajes de aditivo que asegurarían los PG necesarios en los asfaltos de aporte que serían mezclados con las tres proporciones de RAP de esta investigación. La Figura 3-21 muestra el proceso de incorporación de aditivo rejuvenecedor en una muestra de asfalto modificado, dicha muestra debe calentarse y ser manipulada con un equipo de agitación o mezclado como el mostrado en la figura.



**Figura 3-22. Incorporación de aditivo rejuvenecedor para producir los asfaltos de aporte.**

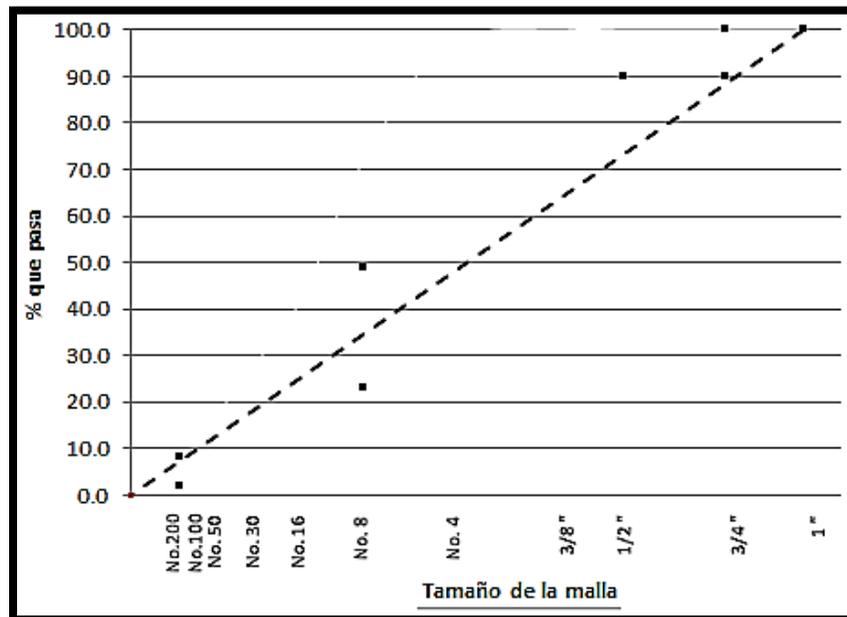
### 3.2 Selección de granulometrías de diseño y combinación de propiedades de agregados.

Con las granulometrías originales de los agregados (vírgenes y provenientes del RAP), se realizaron cálculos de combinación de agregados mediante métodos gráficos y analíticos, esto con la finalidad de obtener la estructura de agregado de diseño (granulometría de proyecto). Las granulometrías para las 4 mezclas a diseñar, se proyectaron de modo que estuvieran de acuerdo a las especificaciones del Protocolo AMAAC, indicadas en la Tabla 3-5. En la Figura 3-23, se puede apreciar un ejemplo de especificación granulométrica para una mezcla con agregados cuyo tamaño máximo nominal es de 19 mm, los puntos plasmados representan los puntos de control por los cuales debe pasar la curva granulométrica y la línea punteada representa la máxima densificación teórica de la mezcla.

**Tabla 3-5. Requisitos granulométricos para los agregados pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa.**

Designación	Abertura mm	Tamaño nominal del material pétreo (pulgadas)				
		37.5 (1 ½")	25 (1")	19 (¾")	12.5 (½")	9.5 (⅜")
Porcentaje que pasa						
2"	50.000	100 - 100	-	-	-	-
1 ½"	37.500	90 - 100	100 - 100	-	-	-
1"	25.000	- 90	90 - 100	100 - 100	-	-
¾"	19.000	-	- 90	90 - 100	100 - 100	-
½"	12.500	-	-	- 90	90 - 100	100 - 100
⅜"	9.500	-	-	-	- 90	90 - 100
No. 4	4.750	-	-	-	-	- 90
No. 8	2.360	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67
No. 16	1.180	-	-	-	-	-
No. 30	0.600	-	-	-	-	-
No. 50	0.300	-	-	-	-	-
No. 100	0.150	-	-	-	-	-
No. 200	0.075	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

Fuente: AMAAC, 2013.



**Figura 3-23. Ejemplo de especificación granulométrica y puntos de control para una mezcla de tamaño nominal de 19 mm.**

Una vez obtenida la granulometría de proyecto, se procede a calcular la “Gravedad Específica Bruta” ( $G_{sb}$ ) neta de la combinación de agregados como sigue:

$$G_{sb} = \frac{(P_A + P_B + P_C + \dots)}{\left(\frac{P_A}{G_{sb_A}} + \frac{P_B}{G_{sb_B}} + \frac{P_C}{G_{sb_C}} + \dots\right)}$$

**Ecuación 3-5.**  
**Fuente: AMAAC (2013).**

donde:

$P_A, P_B, P_C \dots$  son los porcentajes en masa de los distintos agregados combinados.

$G_{sb_A}, G_{sb_B}, G_{sb_C} \dots$  son las gravedades específicas brutas de los agregados combinados.

Para el caso de las mezclas con RAP, la Gravedad Específica Bruta se obtuvo mediante la determinación de la Gravedad Específica Efectiva ( $G_{se}$ ) tal y como se comentó en el apartado 3.1.1. Por consiguiente, la Gravedad Específica Bruta de los agregados en la mezcla reciclada se determinó de la siguiente manera:

$$G_{sb} = \frac{(P_G + P_A + P_{RAP})}{\left(\frac{P_G}{G_{sb_G}} + \frac{P_A}{G_{sb_A}} + \frac{P_{RAP}}{G_{sb_{RAP}}}\right)}$$

**Ecuación 3-6.**  
**Adaptada de AMAAC (2013).**

donde:

$G_{sb}$  = Gravedad Específica Bruta neta para los agregados en las mezclas con RAP.

$G_{sb_G}$  = Gravedad Específica Bruta de los agregados gruesos, mediante ASTM C127.

$G_{sb_A}$  = Gravedad Específica Bruta de los agregados finos, mediante ASTM C128.

$G_{sb_{RAP}}$  = Gravedad Específica Bruta de los agregados de RAP.

$P_G$  = Porcentaje de agregados gruesos vírgenes presentes en la mezcla de agregados.

$P_A$  = Porcentaje de agregados finos vírgenes presentes en la mezcla de agregados.

$P_{RAP}$  = Porcentaje de agregados de RAP presentes en la mezcla de agregados.

Una vez determinadas las granulometrías de proyecto y las propiedades combinadas de los agregados que forman en el esqueleto mineral de cada mezcla, la siguiente etapa fue el diseño de las mezclas asfálticas.

### 3.3 Diseño volumétrico de las mezclas.

La temperatura de mezclado se manejó de 168 °C y la temperatura de compactación se fijó en 158°C, las cuales fueron las ideales según los estudios de viscosidad llevados a cabo en Lasfalto. Toda mezcla elaborada fue curada en horno.

Para las cuatro mezclas asfálticas a diseñar se mezclaron cuatro especímenes para cada contenido de asfalto inicial:

- Dos especímenes fueron procesados y compactados como se indica en ASTM D6925 “Método de prueba estándar para la preparación y determinación de la densidad relativa de especímenes de mezcla asfáltica mediante el Compactador Giratorio Superpave”, como el mostrado en la Figura 3-24. La compactación se realizó con el “número de giros de diseño”, tal y como se indica en la Tabla 3-6, aclarando que para esta investigación se consideró el nivel de tránsito más alto. Sobre dichos especímenes se determinó la gravedad específica bruta de la mezcla compacta ( $G_{mb}$ ), conforme al procedimiento de ASTM D2726 “Método de Prueba estándar para la densidad y gravedad específica bruta de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes”.



Figura 3-24. Equipo Compactador Giratorio Superpave marca Rainhart.

Tabla 3-6. Esfuerzos de compactación giratoria según el tránsito esperado. Adaptado de Protocolo AMAAC (2013).

Intensidad del tránsito ( $\sum L$ ) <sup>1</sup>	Esfuerzo de compactación (giros)			Aplicaciones típicas
	N <sub>ini</sub>	N <sub>dis</sub>	N <sub>máx</sub>	
< 0.3	6	50	75	Tránsito muy ligero (caminos locales, calles de ciudad)
0.3 ≤ $\sum L$ ≤ 3.0	7	75	115	Tránsito medio (carreteras alimentadoras, libramientos)
3.0 ≤ $\sum L$ ≤ 30.0	8	100	160	Tránsito medio a alto (calles de ciudades, caminos estatales)
≥ 30.0	9	125	205	Tránsito alto (intersecciones, estacionamiento de camiones)

<sup>1</sup>  $\sum L$  = Millones de ejes equivalentes de 8.2 t, esperado durante un período de servicio del pavimento de 10 años. Adaptado de Protocolo AMAAC (2013).

- Los otros dos especímenes fueron analizados para determinar la gravedad específica teórica máxima (Gmm) mediante ASTM D2041 “Método de Prueba estándar para la densidad y gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas”. Estos valores son muy importantes para calcular las propiedades volumétricas de la mezcla, tales como: vacíos de aire (Va), vacíos en el

agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA), etc. y que deben ser comparados con los requerimientos para el diseño volumétrico de la mezcla, mostrados en la Tabla 3-7.

**Tabla 3-7. Valores de los parámetros volumétricos necesarios para el diseño óptimo de mezclas asfálticas de granulometría densa.**

Requerimientos para el Diseño volumétrico de la mezcla										
Nivel de tránsito (10 <sup>6</sup> EE)	Densidad requerida, (% de la Gravedad específica teórica máxima - Gmm)			Vacíos de agregado mineral mínimo en % (VMA)					Vacíos llenos de asfalto en % (VFA)	Relación filler asfalto
	Nivel de compactación giratoria			Tamaño nominal (mm)						
	Nini	Ndis	Nmax	37.5	25.0	19.0	12.5	09.5		
< 0.3	≤ 91.5								70 - 80	
0.3 a < 3	≤ 90.5	96	≤ 98	11	12	13	14	15	65 - 78	0.6 - 1.2
3 a < 30	≤ 89								65 - 75	
≥ 30										

Fuente: AMAAC, 2013.

La densidad requerida para las mezclas diseñadas se determina mediante el cociente de la gravedad específica bruta de los especímenes compactados en el compactador giratorio (Gmb) entre la gravedad específica teórica máxima (Gmm), correspondientes al contenido de asfalto para dicha mezcla. Las mezclas asfálticas de diseño deben tener 4% de vacíos, la Ecuación 3-7, indica cómo debe calcularse:

$$V_a = 100 \left( \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad \text{Ecuación 3-7. Fuente: AMAAC (2013).}$$

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) fueron calculados mediante la siguiente expresión:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \quad \text{Ecuación 3-8. Fuente: AMAAC (2013).}$$

donde:

$P_s$  es el contenido de agregado o porcentaje en masa del total de agregados con respecto a la masa total de mezcla.

Por su parte los vacíos llenos con asfalto (VFA), son determinados tal y como indica la Ecuación 3-9:

$$VFA = \left( \frac{V_{AM} - V_a}{V_{AM}} \right) * 100$$

**Ecuación 3-9.**  
**Fuente: AMAAC, 2013.**

La relación filler-asfalto es determinada al dividir el porcentaje que pasa la malla No. 200 entre el contenido de asfalto de la mezcla.

Se debe destacar que esta investigación evaluó las mezclas asfálticas con el Protocolo AMAAC hasta el Nivel 3 de diseño, sin embargo, los valores del último renglón de la Tabla 3-7 fueron tomados como especificación para el diseño de la mezcla (AMAAC, 2013).

Una vez conocidas las propiedades volumétricas iniciales de las mezclas en el primer intento, se compararon contra la especificación (Tabla 3-7), se procedió a estimar el contenido de asfalto que corregiría la volumetría de la mezcla a fin de que se cumpla la especificación. Con dicha información se fabricaron especímenes nuevos en el Compactador Giratorio Superpave, y se evaluaron sus parámetros volumétricos. Por último, se elaboraron especímenes con el contenido de asfalto óptimo, pero estos se compactaron hasta el “Número de giros máximo” (Nmax), con la finalidad de comprobar que su densificación fuera menor o igual que 98%, como se estipula en la Tabla 3-7.

### 3.3.1 Diseño de la mezcla de Referencia.

La mezcla de referencia fue la primera en ser diseñada, cuya primera etapa consistió en estimar un contenido de asfalto inicial para la granulometría de proyecto, contando con el procedimiento descrito en AASHTO R35; a partir de ese valor se asignan las proporciones de cemento asfáltico (virgen) por mezclar con la combinación de agregados.

Adicionalmente a los especímenes con el contenido de asfalto estimado, se fabricaron dos especímenes de Compactador Giratorio por cada contenido de asfalto indicado en la Tabla 3-8, totalizando 10 especímenes a los cuales se les determinaron sus propiedades volumétricas.

**Tabla 3-8. Diseño experimental de especímenes de compactador giratorio para la evaluación de parámetros volumétricos de la mezcla de referencia.**

Grupo	Cantidad de especímenes	Contenido de Asfalto (C.A.) incorporado
1	2	C.A. est. - 1.0%
2	2	C.A. est. - 0.5%
3	2	C.A. est.
4	2	C.A. est. + 0.5%
5	2	C.A. est. + 1.0%

Hecha la evaluación de las propiedades volumétricas de los especímenes descritos en la Tabla 3-8, se procedió a la elaboración de gráficos de diseño que ilustran el comportamiento volumétrico de las mezclas diseñadas. A partir de estos gráficos se seleccionó el “Contenido de Asfalto Óptimo” (C.A.O.). En la Figura 3-25 se ilustra un ejemplo de estas gráficas de diseño.

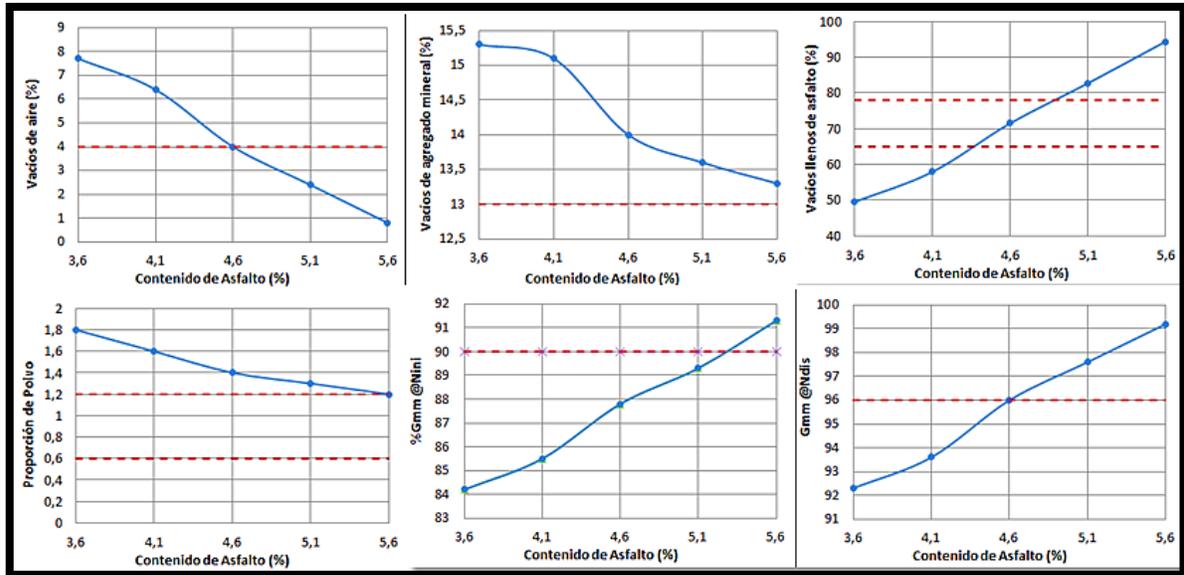


Figura 3-25. Gráficos de diseño para la selección del contenido de asfalto óptimo.

### 3.3.2 Diseño de las mezclas Recicladadas.

Para este diseño se utilizó la herramienta conocida como “Polígono de vacíos”, la cual es una herramienta muy versátil que reduce la cantidad de ensayos por realizar, al calcular Gravedades Brutas compactas en las que se satisfagan los requisitos de vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos de asfalto, a partir de las Ecuaciones 3-10, 3-11 y 3-12 (Marín y Thenoux, 2014):

$$G_{mb} = G_{mm} * \left(1 - \frac{Va}{100}\right) \quad \text{Ecuación 3-10.}$$

$$G_{mb} = \frac{G_{sb}(100 - VMA)}{P_s} \quad \text{Ecuación 3-11.}$$

$$G_{mb} = \frac{VFA}{\frac{VFA * P_s}{100 * G_{sb}} - \frac{P_s}{G_{sb}} + \frac{100}{G_{mm}}} \quad \text{Ecuación 3-12.}$$

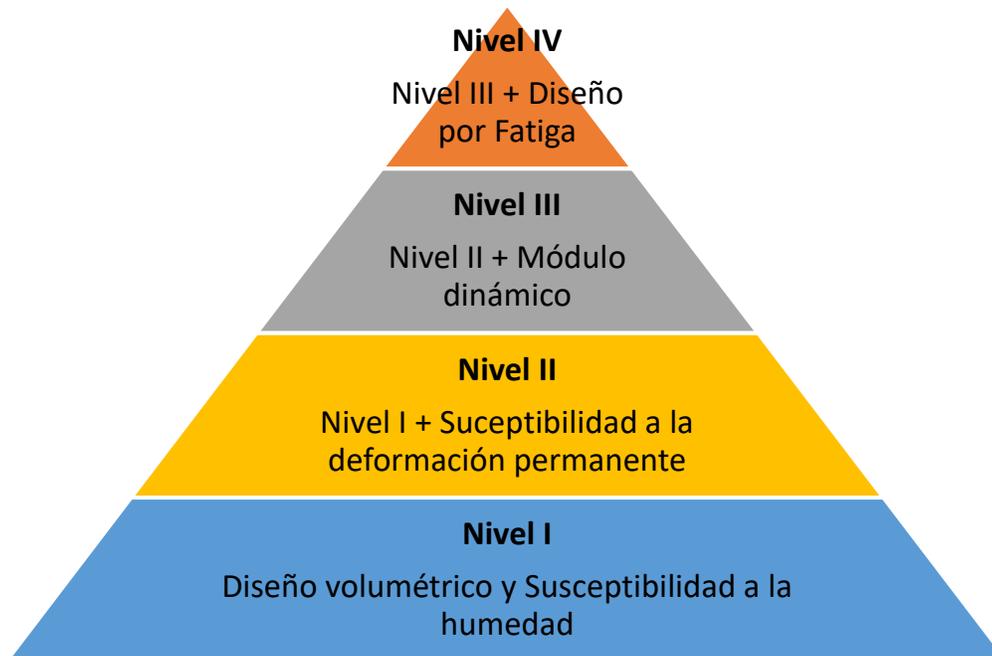
Se fabricaron 2 especímenes compactados para medir la Gravedad Específica Bruta de la mezcla y 2 especímenes de mezcla suelta para medir la Gravedad Teórica Máxima de la mezcla. Todos los especímenes se elaboraron con el contenido de asfalto estimado, luego de lo cual se determinaron sus propiedades

volumétricas. El proceso anterior es repetitivo, hasta que se cumpla la condición de que los vacíos de aire ( $V_a$ ) sean igual a 4%.

El contenido de asfalto de diseño, fue aquel en el que se cumplieron las propiedades volumétricas, siendo los vacíos de aire, la propiedad más importante por satisfacer.

### 3.4 Pruebas de desempeño para las mezclas asfálticas.

En este apartado se describen los procedimientos de las pruebas de desempeño a las que fueron sometidas las mezclas asfálticas diseñadas. El diseño volumétrico descrito en el apartado 3.3 es parte del Nivel I de diseño de Protocolo AMAAC (2013). En la Figura 3-26 se muestran los niveles de diseño propuestos en este protocolo, sin embargo, esta investigación se llevó a cabo hasta el nivel III.



**Figura 3-26. Niveles de diseño de mezcla asfáltica de alto desempeño y pruebas contempladas en cada uno de ellos. Fuente: AMAAC (2013).**

### 3.4.1 Susceptibilidad a la humedad “TSR”.

El primer análisis de desempeño de las mezclas diseñadas consistió de evaluar la relación entre resistencias a tensión indirecta (TSR, por sus siglas en inglés: Tensile Strength Ratio) de especímenes compactos. Un grupo de tres especímenes es acondicionado (humedad), mientras otro grupo de igual tamaño es mantenido sin alteración alguna (especímenes de control). El procedimiento descrito en la Recomendación AMAAC RA 04/2010 “Resistencia de las mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad” es el que se siguió para determinar este parámetro de comportamiento de la mezcla diseñada. La importancia de esta prueba radica en que el valor encontrado, también llamado resistencia retenida, es un indicador de que tan susceptible es la mezcla asfáltica ante la acción de la humedad. En la Figura 3-27 se muestra una prensa “Marshall” y una mordaza Lottman, los cuales son un equipo necesario para la ejecución de este ensayo.



**Figura 3-27. Prensa y Mordaza Lottman para ensayo de TSR.**

### 3.4.2 Susceptibilidad a la deformación permanente.

Con este ensayo se analizó el comportamiento de la mezcla diseñada ante el efecto combinado de presencia de agua, una alta temperatura ambiental y aplicaciones repetidas de carga. El método de ensayo llevado a cabo para analizar esta propiedad fue la Recomendación AMAAC RA 01/2008 “Susceptibilidad a la Humedad y a la Deformación Permanente por Rodera de una mezcla asfáltica tendida y compactada, por medio del Analizador de la Rueda Cargada de Hamburgo (HWT)”. La principal aplicación de esta prueba estriba en la identificación de mezclas asfálticas con estructuras débiles y susceptibles al desgranamiento. La prueba consiste en medir la profundidad de rodera (ahuellamiento) provocada por una rueda metálica de acero con una carga de 72 kg que circula repetidamente a través de una probeta de mezcla asfáltica compactada. Un ejemplo del equipo de prueba se muestra en la Figura 3-28.



**Figura 3-28. Equipo Rueda Carga de Hamburgo. Equipo propiedad de Lasfalto.**

### 3.4.3 Ensayes Dinámicos.

Durante el desarrollo de la investigación para medir el desempeño de las mezclas diseñadas para el nivel III de Protocolo AMAAC, surgió la complicación de disponer de un equipo de ensayo (prensa servo-hidráulica o servo-neumática) que ejecutara las pruebas de acuerdo a los requisitos técnicos que estipula AASTHO

TP-62 “Determinación del Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA)”. El equipo que estuvo disponible (prensa servo-neumática Cooper) no es el más adecuado para este fin debido a que no hace modificación alguna al esfuerzo dinámico aplicado a los especímenes, lo que impide que todas las mediciones realizadas correspondan a un comportamiento visco-elástico en las mezclas analizadas.

A sabiendas de que no se está siguiendo un procedimiento estandarizado, el protocolo de ensayo fue modificado permitiendo así el uso del equipo antes mencionado, con la finalidad de comparar y de identificar si las mezclas recicladas presentan mejor desempeño con respecto a la mezcla de referencia. También las temperaturas de ensayo fueron modificadas tomando algunas recomendaciones del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), con la finalidad de ajustar el rango probable de temperaturas a las que se expondrán las mezclas asfálticas.

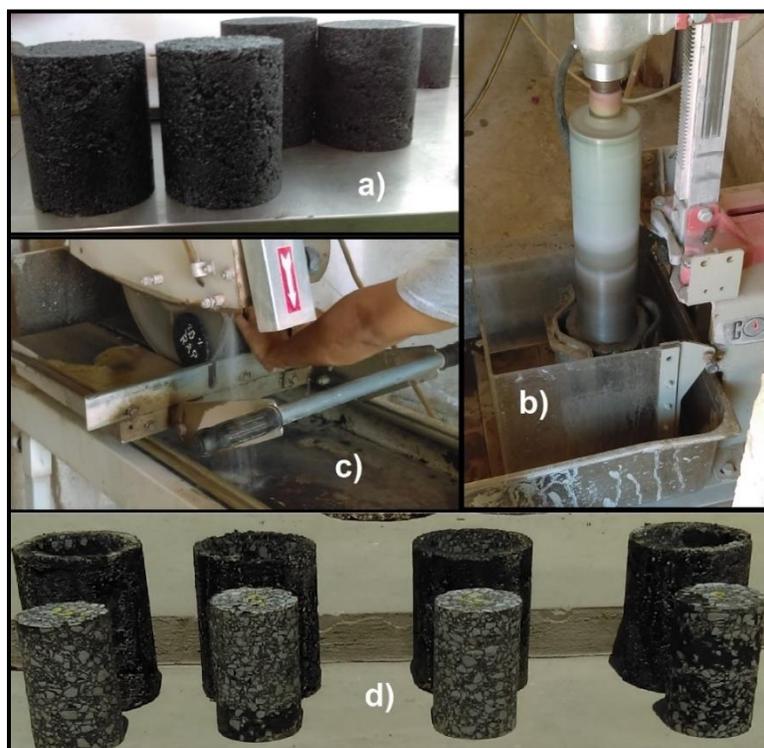
El procedimiento seguido fue el siguiente:

Los especímenes fueron fabricados inicialmente en el Compactador Giratorio Superpave, con un diámetro de 150 mm y una altura aproximada de 170 mm, luego de lo cual se sometieron a un proceso de extracción y corte, con la finalidad de disponer de especímenes de ensayo con una densidad (Gravedad Bruta compacta,  $G_{mb}$ ) de  $96.0 \pm 0.5\%$  con respecto a la máxima densidad ( $G_{mm}$ ), diámetro promedio entre 100 y 104 mm y una altura promedio entre 147.5 y 152.5 mm aproximadamente. En la Tabla 3-9 se muestran las características físicas de los especímenes elaborados, y en la Figura 3-29 se muestra el proceso para la obtención de los especímenes de ensayo. Una vez que se obtuvieron los especímenes, éstos fueron instrumentados al adherirles cuatro soportes (pines), los cuales sirven para fijar los transductores diferenciales de variación lineal, mejor conocidos como LVDT's (por sus siglas en inglés), los cuales miden las deformaciones axiales que experimentan los especímenes durante los ensayos.

**Tabla 3-9. Características físicas de los especímenes para la prueba de Módulo Dinámico de las mezclas diseñadas.**

Identificación de Probeta	Especímenes Giratorio			Especímenes de ensayo		
	%Gmm	Diámetro <sup>1</sup> (mm)	Altura <sup>1</sup> (mm)	%Gmm	Diámetro <sup>1</sup> (mm)	Altura <sup>1</sup> (mm)
MD-0-1	94.0	150.9	172.2	95.9	101.3	148.9
MD-0-2	94.2	151.6	170.3	95.8	101.9	149.6
MD-15-1	94.5	152.1	171.1	95.8	102.3	148.6
MD-15-2	94.3	152.1	169.8	95.7	100.8	147.8
MD-30-1	94.4	151.3	171.1	95.9	101.6	148.2
MD-30-2	94.1	152.4	169.8	95.8	101.1	148.4
MD-45-1	93.9	151.8	170.8	96.2	102.0	149.8
MD-45-2	94.4	150.7	178.0	95.8	101.5	149.1

<sup>1</sup> valores promedio de cuatro mediciones consecutivas.



**Figura 3-29. Proceso de obtención de especímenes de ensayo: a) Fabricación de especímenes de compactador giratorio, b) Extracción de núcleo de 100 mm de diámetro, c) Corte de los extremos del espécimen, d) Resultado final de la extracción de especímenes.**

En la Tabla 3-10, se muestran las frecuencias empleadas, los ciclos de carga aplicados a los especímenes, las temperaturas utilizadas, así como los tiempos mínimos utilizados para conseguir el equilibrio térmico para la ejecución de la prueba.

**Tabla 3-10. Configuración de ensayo realizada durante la investigación.**

Frecuencias utilizadas (Hz)	Ciclos aplicados	Temperaturas utilizadas (°C)	Tiempo para acondicionamiento de los especímenes (h)	Tiempo para acondicionamiento antes de la prueba (h)
25	200	4	Toda la noche	4
10	200	20	1	3
5	100	30	2	2
1	20	40	2	2
0.5	15			
0.1	15			

Las pruebas se realizaron una vez que los especímenes alcanzaron el equilibrio térmico expuesto en la Tabla 3-10; se les montaron los LVDT's y se colocaron debajo del actuador de la prensa dinámica. En la Figura 3-30 se muestra el montaje de pines o soportes, el acondicionamiento de los especímenes, el montaje de los LVDT's y la colocación de especímenes para la realización de la prueba. En la Figura 3-31 se muestra la prensa dinámica que se utilizó en esta etapa.



**Figura 3-30. a) Colocación de pines; b) acondicionamiento de especímenes a temperatura de ensayo, c) colocación de LVDT's y espécimen bajo el pistón de la prensa dinámica.**



**Figura 3-31. Equipo Servo-neumático marca Cooper, para la realización de ensayos dinámicos.**

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Características de los materiales.

#### 4.1.1 Caracterización del RAP.

El recuperado de pavimento asfáltico (RAP) fue analizado conforme indica el apartado anterior, encontrándose los siguientes resultados:

- Muestreo y Reducción de muestras de RAP.

Las muestras de RAP fueron extraídas mediante equipo de fresado en campo proveniente de la autopista Guadalajara-Zapotlanejo Km 17+000 cuerpo B, y fue almacenado en cubetas en las instalaciones del laboratorio LASFALTO. Se realizó la reducción de muestras a tamaño de ensayo para la extracción centrífuga, mediante un cuarteador mecánico. Las Figuras 4-1 y 4-2, muestran tanto el lugar de extracción del RAP como la realización del proceso de reducción de muestra.



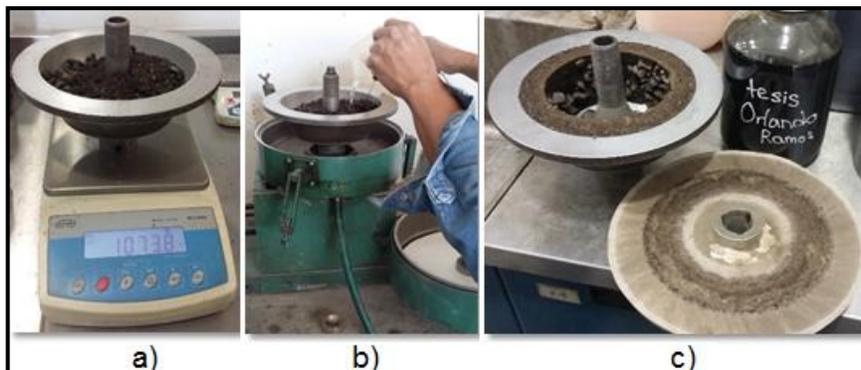
Figura 4-1. Localización del sitio de extracción de la muestra de RAP. Fuente: Google Earth, 2016.



**Figura 4-2. Reducción de muestra de RAP a tamaño de ensayo.**

- Extracción centrífuga del asfalto de RAP.

Se determinó el contenido de asfalto presente en el RAP, así como la distribución granulométrica de los agregados que conforman este material. Con fines de facilitar el proceso de diseño de las mezclas con RAP, la determinación de la granulometría y contenido de asfalto del RAP fue dividido en dos fracciones: fracción fina y fracción gruesa. La Figura 4-3a, muestra la introducción y pesaje de una muestra de RAP en el tazón del “Rotarex”, en la Figura 4-3b se aprecia la instalación del tazón dentro del equipo y la introducción del solvente Tricloroetileno para separar el asfalto de los agregados, mientras que la Figura 4-3c ilustra el resultado final de la prueba: agregado libre de asfalto (tazón), un filtro redondo con finos atrapados y un recipiente con asfalto de RAP y solvente. La Tabla 4-1 muestra un resumen de las propiedades del RAP analizado.



**Figura 4-3. Proceso de Extracción Centrífuga para separar el asfalto de los agregados de RAP.**

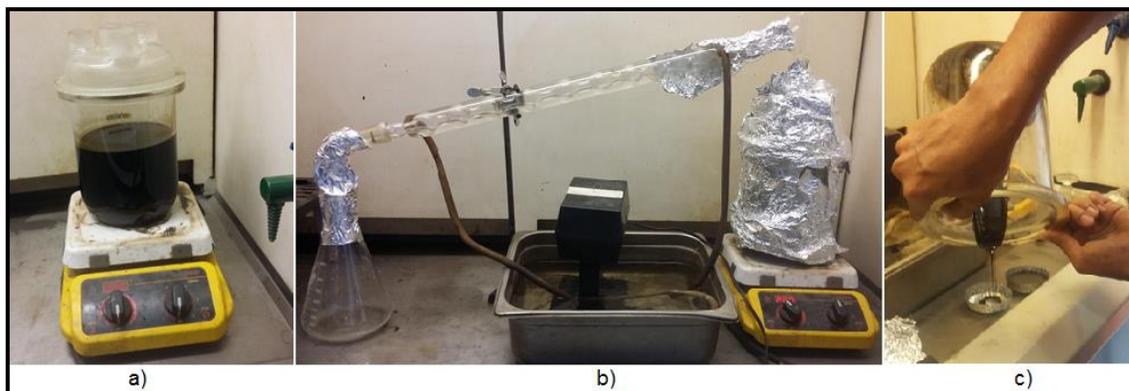
**Tabla 4-1. Resultados de la extracción centrífuga de las muestras de RAP ensayadas.**

Espécimen	Masa Neta (g)	Masa lavada (g)	Masa filtro limpio (g)	Masa filtro + finos (g)	Masa retenida en filtro (g)	Masa total del agregado (g)	Contenido de asfalto (g)	Contenido de asfalto (%)
F <sup>1</sup>	770.5	715.7	9.6	11.8	2.2	717.9	52.6	6.8
G <sup>2</sup>	796.4	767.5	9.6	11.5	1.9	769.4	27.0	3.4

<sup>1</sup> F = Fracción Fina de la muestra de RAP. <sup>2</sup> G = Fracción Gruesa de la muestra de RAP.

Resulta evidente observar con la tabla anterior, que el RAP más fino (aquel que pasa la malla No.4) posee más asfalto absorbido en comparación con el RAP grueso. La anterior observación puede deberse a que el material más fino posee mayor superficie específica donde puede almacenarse el asfalto.

Una vez obtenido el asfalto reciclado proveniente del RAP, se destila la solución de asfalto y solvente mediante el método Abson. La Figura 4-4a muestra un recipiente que contiene solvente con asfalto proveniente de la extracción centrífuga realizada con anterioridad; dicho recipiente se encuentra montado en una parrilla eléctrica para incrementar la temperatura de la solución. En la Figura 4-4b se ilustra un equipo de destilación donde se condensa el solvente y se separa del asfalto. Por último, en la Figura 4-4c, se deposita el asfalto separado del solvente en un recipiente de aluminio para continuar con la caracterización de dicho asfalto.



**Figura 4-4. Método Abson para recuperación de aglutinantes asfálticos inmerso en soluciones.**

- Reología del asfalto envejecido de RAP.

En la Tabla 4-2 se muestran los resultados correspondientes a la alta temperatura de falla del aglutinante para el estado “original” (como viene de campo), y en estado sobre-envejecido en RTFO (horno de película delgada rotatoria) y PAV (vasija de envejecimiento a presión), medidas en el Reómetro de Corte Dinámico (DSR). Se incluye, además, la baja temperatura de falla medida en el Reómetro de Viga a Flexión (BBR) y la clasificación por Grado de Desempeño (PG) que le corresponde.

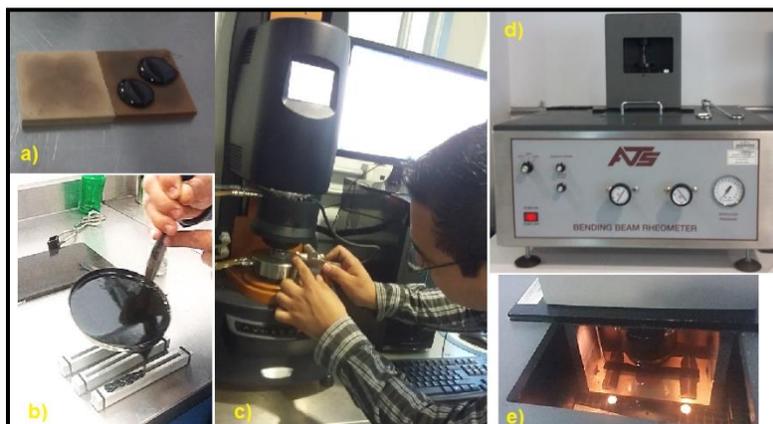
**Tabla 4-2. Análisis reológico en Reómetro de Corte Dinámico y Reómetro de Viga a Flexión sobre el asfalto proveniente del RAP.**

Característica	Medido en	Resultado
Temperatura de falla en estado original (G*/sen $\delta$ = 1.00 KPa)	DSR	107.5 °C
Temperatura de falla en estado envejecido (RTFO) (G*/sen $\delta$ = 2.20 KPa)	DSR	124.9 °C
Temperatura de falla a flexión (S < 300 MPa, m > 0.3)	BBR	0 °C
Clasificación PG correspondiente	N.A.	PG 106-10
Clasificación PG reportada	N.A.	PG 88-10

**N. A. = No aplica.**

Teniendo en cuenta que la clasificación de asfaltos por grados de desempeño se hace en rangos de seis grados centígrados (PG 64, 70, 76, etc. para altas temperaturas y PG XX-10, XX-16, XX-22, etc. para bajas temperaturas) al asfalto en cuestión le corresponde una clasificación PG106-10. De acuerdo con la Tabla 4-2, el hecho de que la alta temperatura de falla sea muy elevada (107°C) indica que dicho cemento asfáltico está muy envejecido, y, por ende, es muy rígido comparado contra un asfalto virgen, lo cual puede llegar a generar problemas de agrietamiento. Por otro lado, para bajas temperaturas (inferiores a -10 °C), este aglutinante no tendrá la suficiente capacidad de resistir grandes cantidades de aplicaciones de carga, terminando por fallar debido a fatiga en el material, así como no será eficiente para resistir los efectos de contracción térmica, lo que, a largo plazo se reflejará en fallas en el pavimento (grietas). En la Figura 4-5 se ilustra lo siguiente: a) Probetas de 25 mm para módulo de corte dinámico. b) Llenado de vigas de asfalto para

prueba de Rigidez del asfalto en BBR, c) Preparación de equipo DSR y corte de pastilla para módulo de corte dinámico, d) Reómetro de viga a flexión (BBR), e) Montaje de viga de asfalto en el interior del BBR. En el Apéndice de este trabajo se encuentran los registros de las pruebas de reología realizadas.



**Figura 4-5. Pruebas reológicas para el asfalto envejecido de RAP.**

- Pruebas para los agregados de RAP.

La distribución granulométrica de los agregados de RAP después de la extracción del aglutinante asfáltico se presenta en la Tabla 4-3, en la cual se muestran los resultados de granulometría de las dos fracciones: fina y gruesa.

**Tabla 4-3. Resultados del análisis granulométrico de manera integral de las dos fracciones de RAP.**

Abertura de mallas (pulgadas)	(mm)	RAP fino % Pasa	RAP grueso % Pasa
1 "	25	100	100
3/4"	19	100	100
1/2 "	12.5	100	99.3
3/8 "	9.5	100	77.4
No. 4	4.75	100	31.3
No. 8	2.36	82.0	23.3
No. 16	1.18	50.2	15.5
No. 30	0.6	33.6	9.1
No. 50	0.3	26.2	6.7
No. 100	0.15	17.6	3.9
No. 200	0.075	8.2	2.2

En el apartado 4.2, perteneciente a la selección de las granulometrías de diseño y combinación de propiedades de los agregados, se mostrarán los cálculos correspondientes a la Gravedad Específica Teórica Máxima ( $G_{mm}$ ) para las combinaciones de RAP fino y grueso, así como su aporte en la Gravedad Específica Bruta ( $G_{sb}$ ) combinada de los agregados que conformarán la estructura mineral de las mezclas asfálticas que incorporan RAP.

#### 4.1.2 Caracterización de los agregados vírgenes.

Los agregados fueron proporcionados por la empresa “Asfaltos de Guadalajara”, y provienen del Banco Tonalá, ubicado en la ciudad de Tonalá, Jalisco. La Figura 4-6 ofrece un mapa de ubicación de dicha fuente de agregados.

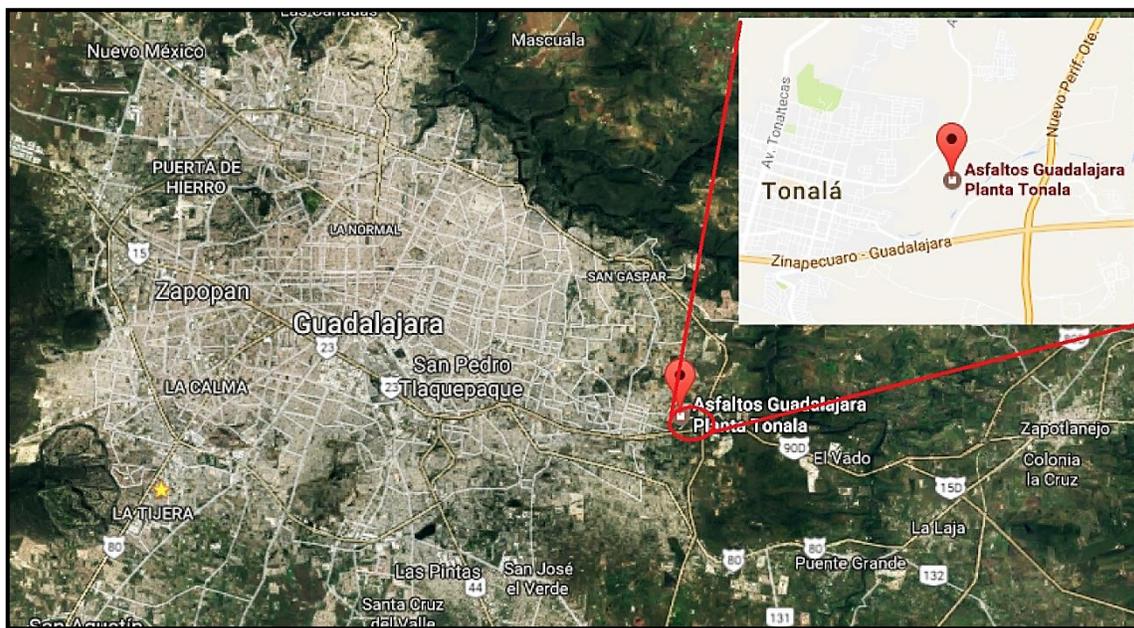


Figura 4-6. Ubicación del banco Tonalá, de la empresa Asfaltos de Guadalajara.

Se realizó el análisis granulométrico para los materiales pétreos conseguidos: Grava de tamaño máximo nominal de 12.5 mm y Arena No.4. Los resultados de dichos ensayos son mostrados en la Tabla 4-4.

**Tabla 4-4. Análisis granulométrico de los agregados vírgenes estudiados.**

Abertura de mallas		Arena No.4	Grava de 12,5 mm
(pulgadas)	(mm)	% Pasa	% Pasa
1 "	25	100	100
3/4"	19	100	100
1/2 "	12.5	100	96
3/8 "	9.5	100	57
No. 4	4.75	100	14
No. 8	2.36	85	1
No. 16	1.18	42	0
No. 30	0.6	30	0
No. 50	0.3	23	0
No. 100	0.15	17	0
No. 200	0.075	13	0

La Tabla 4-5 y Tabla 4-6 muestra un resumen de los resultados de caracterización de los dos materiales obtenidos para esta investigación:

**Tabla 4-5. Resultados de la caracterización de los agregados gruesos.**

Prueba	Resultado	Especificación	¿Cumple?
Desgaste de Los Ángeles, (%)	14	30 máximo	Si
Desgaste Micro-Deval (%)	9	18 máximo	Si
Partículas planas y alargadas (%)	1.3	10 máximo	Si
Caras fracturadas (2 caras mín.) (%)	95	90 mínimo	Si
Gravedad específica aparente (*)	2.813	N. A.	N. A.
Gravedad específica bruta (*)	2.745	N. A.	N. A.
Absorción (%)	0.9	N. A.	N. A.

**Nota: \* sin unidades, N.A. = No aplica.**

**Tabla 4-6. Resultados de la caracterización de los agregados finos.**

Prueba	Resultado	Especificación	¿Cumple?
Equivalente de Arena, (%)	64	50 mínimo	Sí
Angularidad, (%)	37	40 mínimo	No
Azul de Metileno, (ml/g)	13	15 máximo	Sí
Gravedad específica aparente, (*)	2.799	N. A.	N. A.
Gravedad específica bruta, (*)	2.651	N. A.	N. A.
Absorción, (%)	2.0	N. A.	N. A.

**Nota: \* sin unidades, N.A. = No aplica.**

En el Apéndice de este trabajo se encuentran de manera detallada, los registros y fotografías de las pruebas realizadas.

#### 4.1.3 Selección de aglutinantes asfálticos.

##### 4.1.3.1 Selección del Grado de Desempeño (PG) de proyecto.

Esta etapa se llevó a cabo tomando en cuenta la información perteneciente a la autopista Guadalajara – Zapotlanejo, debido a que el RAP provenía de esta zona, la cual se comprende desde el Km 3+000 a las afueras de Zapotlanejo, hasta el km 25+000, en la entrada de la Ciudad de Guadalajara. Los datos necesarios fueron: la temperatura máxima y mínima del aire en el tramo estudiado, y la latitud geográfica de los puntos de inicio y termino del camino. La información se obtuvo del sitio web del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua, donde se investigaron los resúmenes mensuales de temperatura y lluvia de los años disponibles en su base de datos. La Figura 4-7, muestra un mapa de la república donde reporta los resúmenes de temperaturas máximas. Con respecto a la posición geográfica de la autopista en cuestión, se utilizó la herramienta Google Earth 2016 ©. En la Tabla 4-7, se muestra un resumen de la información investigada.

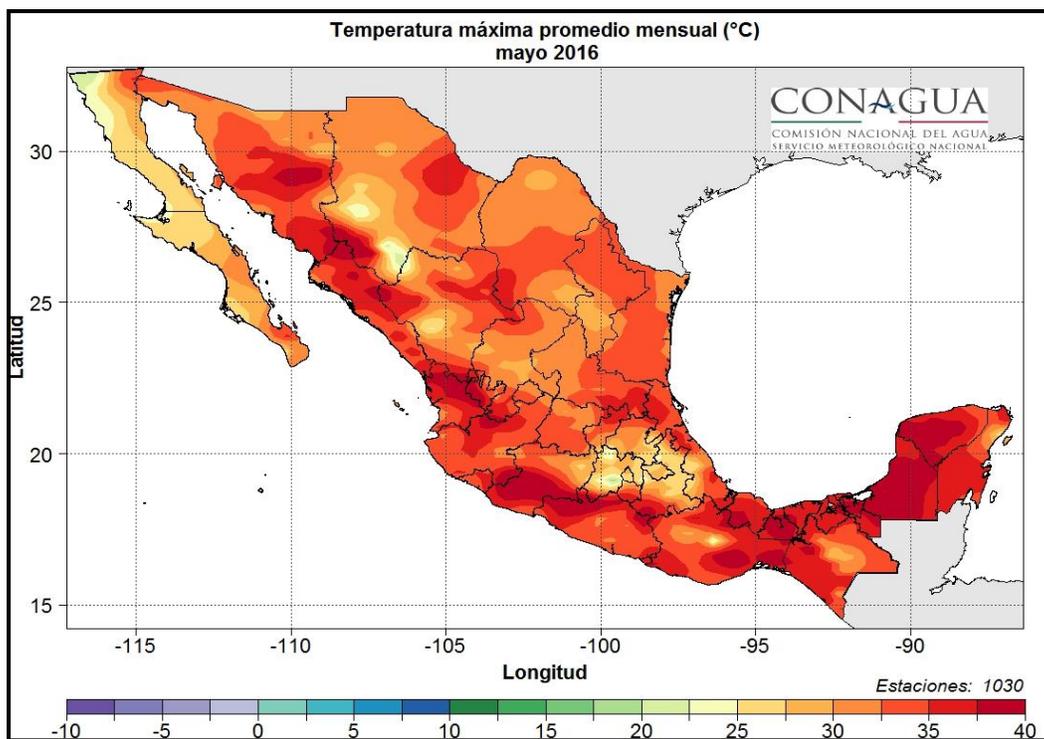


Figura 4-7. Ejemplo de Mapa de temperaturas máximas promedio mensual.

**Tabla 4-7. Datos necesarios para la determinación del PG del asfalto de diseño.**

Aspecto revisado:	Valor encontrado
Temperatura máxima del tramo de estudio	37.5°C
Temperatura mínima del tramo de estudio	2.5 °C
Latitud del Km 3+000, punto de inicio	20.6163
Latitud del Km 25+000, punto de termino	20.6265

Las ecuaciones 3-2 y 3-3 del capítulo anterior, se utilizaron para el cálculo de las temperaturas máximas y mínimas que debe cumplir el asfalto de proyecto.

$$T_{m\acute{a}x} = [(37.5 - (0.00618 * (20.6255)^2) + (0.2289 * 20.6265) + 42.2) * (0.9545)] - 17.78 = 60.29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{m\acute{i}n} = (0.859 * 2.5) + 1.7 = 3.84 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El asfalto necesario por cuestiones climáticas para este proyecto en particular debe ser uno clasificado como “64-4”, mismo que fue corregido por la intensidad del tránsito que circulará en dicha vía. La corrección se hace tomando en consideración los valores expresados en la Tabla 4-8, los cuales se exponen en la Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes:

**Tabla 4-8. Ajuste del grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad de tránsito esperada y con la velocidad de operación.**

Intensidad del tránsito ( $\Sigma L$ ) <sup>1</sup>	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (10 – 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (cruceos)
$\Sigma L < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L > 10^7$	<b>PG 64</b>	<b>PG 76</b>	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

<sup>1</sup>  $\Sigma L$  = Número de ejes equivalentes de 8.2 t, esperado durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años. Tomado de la Norma N-CMT-4-05-004/08 “Calidad de Materiales asfálticos Grado PG”.

Ya que el tránsito esperado en el tramo propuesto es superior a los diez millones de ejes equivalentes y debido a que es una carretera con velocidades altas, se seleccionará como aglutinante asfáltico de proyecto aquel cuyo grado de desempeño sea al menos “**PG 76-10**”.

#### 4.1.3.2 Dosificación de asfalto base para obtener el PG de proyecto.

Se procedió a modificar un asfalto virgen denominado “EKBE 542” cuya dosificación ideal para alcanzar el grado PG esperado fue de 1% de “Elvaloy ® 5170” y 0.1% de “ácido poli-fosfórico” (PPA). Un resumen de caracterización de este producto es presentado en la Tabla 4-9.

**Tabla 4-9. Resumen de resultados de la caracterización del asfalto modificado de proyecto.**

Parámetro o Prueba	Resultado	Especificación <sup>1</sup>
Asfalto Modificado, condición original		
Punto de inflamación Cleveland, °C	< 300	230 mín.
Densidad del asfalto	1.029	No aplica
Viscosidad rotacional a 135°C, Pa-s	2	3
Módulo de corte dinámico a 76°C ( $ G^* /\text{sen } \delta$ ), KPa	1.275	1.00 mín.
Después de RTFO		
Pérdida en masa por calentamiento, %	0.35	1.00 máx.
Módulo de corte dinámico a 76°C ( $ G^* /\text{sen } \delta$ ), KPa	3.198	2.20 mín.
Después de PAV		
Rigidez del asfalto ( $G^* \text{ sen } \delta$ ) a 34°C, KPa	1127	5000 máx.
Módulo de rigidez a flexión (S) a -6 °C, MPa	75.27	300 máx.
Valor "m" a -6 °C,	0.3124	0.3 mín.

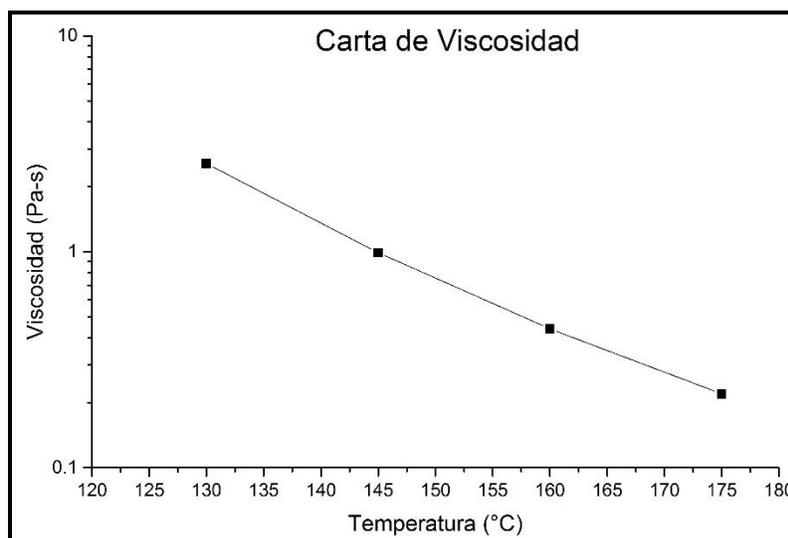
<sup>1</sup> según ASTM D6373

Adicionalmente se realizó el estudio de la viscosidad mediante el Viscosímetro Rotacional Brookfield, cuyos resultados se plasman en la Tabla 4-10 y se muestran de manera gráfica a manera de carta de viscosidad en la Figura 4-8.

**Tabla 4-10. Resultados del ensayo de Viscosidad Rotacional.**

Temperatura (°C)	Viscosidad (Pa-s)			Velocidad (RPM)	Torque (%)		
	15 min.	16 min.	17 min.		15 min.	16 min.	17 min.
130	2.53	2.56	2.56	6	66.8	65.6	65.6
145	0.99	0.99	0.99	10	42.4	42.4	42.4
160	0.44	0.44	0.44	24	44.7	44.7	44.7
175	0.22	0.22	0.22	55	51.9	51.8	51.8

Según ASTM D4402



**Figura 4-8. Carta de relación Viscosidad versus Temperatura para el asfalto analizado.**

Con los resultados anteriores es posible constatar que el asfalto modificado que se elaboró (PG 76-16), cumple los requisitos de calidad recomendados por Protocolo AMAAC y Superpave para ser utilizado en una mezcla asfáltica. Vale la pena mencionar que una de las funciones de la carta de viscosidad es, definir las temperaturas de mezclado (cuando la viscosidad oscila entre  $0.17 \pm 0.02$  Pa-s) y compactación (cuando la viscosidad oscila entre  $0.28 \pm 0.03$  Pa-s); sin embargo, este concepto solo se aplica a asfaltos sin modificadores, ya que si se intentan obtener dichas temperaturas de esta gráfica, se obtendrán valores muy altos para ambos procesos con los cuales el asfalto comenzará a perder sus componentes que lo hacen un material visco-elástico. Por otro lado, este gráfico sirvió para reconocer que el asfalto tiene una viscosidad a  $135$  °C menor a la que se maneja en la especificación ( $3$  Pa-s), con lo cual se asegurará que será un producto

trabajable y con la capacidad de bombearse en cualquier planta de producción de mezcla asfáltica. En el Apéndice de este trabajo se encuentran de manera detallada, los registros y fotografías de las pruebas realizadas.

#### 4.1.3.3 Determinación de los Grados de Desempeño para los asfaltos de aporte en las mezclas con RAP.

Los porcentajes de RAP utilizados en esta investigación fueron: 15%, 30% y 45%, y haciendo uso de la Ecuación 3-4, las temperaturas de falla para los asfaltos de aporte fueron los mostrados en la Tabla 4-11, considerando que las mezclas recicladas deben ser similares en comportamiento a las mezclas vírgenes; por lo tanto, la combinación de ambos aglutinantes (envejecido de RAP y asfalto de aporte) debe cumplir la clasificación PG 76-16.

**Tabla 4-11. Selección del Grado de Desempeño PG para los asfaltos de aporte por utilizar en las mezclas con RAP.**

Porcentaje de RAP en la mezcla (%)	Condición de temperatura de falla	Temperatura de falla del RAP	Temperatura de falla del asfalto de aporte	Grado PG necesario para el asfalto de aporte
15	Alta	107	70.5	PG 70-22
	Baja	-10	-17.0	
30	Alta	107	62.5	PG 58-22
	Baja	-10	-18.6	
45	Alta	107	50.6	PG 46-22
	Baja	-10	-20.9	

Con la información contenida en esta tabla, se hace evidente que conforme se incrementa la cantidad de RAP en la mezcla reciclada, se hace necesario el uso de asfaltos de aporte con temperaturas de falla cada vez menores.

La siguiente etapa consistió en buscar las dosis adecuadas de aditivo rejuvenecedor por mezclar con el asfalto modificado de base, para que se alcance el PG que indica la Tabla 4-11 y establecerlos como asfaltos de aporte en las mezclas con RAP.

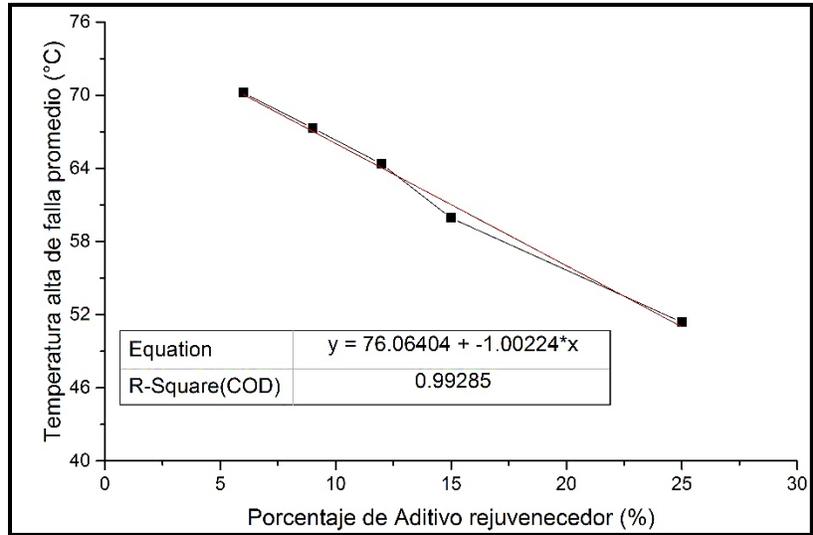
4.1.3.4 *Determinación de las dosificaciones de Aditivo Rejuvenecedor para las mezclas asfálticas con RAP.*

La Tabla 4-12 muestra los resultados del análisis de temperatura de falla para diversos contenidos de aditivo rejuvenecedor “SURFAX RF1”, determinadas mediante el uso del Reómetro de Corte Dinámico (DSR). Cabe aclarar que, en esta investigación, solo se enfocó en lograr el grado PG de alta temperatura, ya que, la temperatura baja del grado PG no es un problema grave en la zona de estudio, puesto que las temperaturas regionales no son tan drásticas.

**Tabla 4-12. Influencia del aditivo rejuvenecedor sobre la alta temperatura crítica del asfalto de proyecto.**

Porcentaje de Aditivo rejuvenecedor	Espécimen	Temperatura alta de falla	Temperatura alta de falla promedio
6%	1	70.30	70.2
	2	70.10	
9%	1	67.00	67.3
	2	67.60	
12%	1	65.20	64.35
	2	63.50	
15%	1	59.85	59.93
	2	60.00	
25%	1	51.41	51.39
	2	51.37	

La Figura 4-9 muestra de forma gráfica la influencia del aditivo sobre la alta temperatura crítica del asfalto de aporte, lo cual será de ayuda para determinar la dosis definitiva de aditivo por utilizar en las mezclas recicladas. Además, se obtuvo una ecuación de regresión lineal, con un coeficiente de correlación cercano a la unidad, con lo que se puede decir, que se tiene confiabilidad en el proceso y que la variación de la temperatura de falla con respecto a la incorporación de aditivo rejuvenecedor presenta un comportamiento casi lineal. Por lo tanto, las dosificaciones seleccionadas de aditivo rejuvenecedor son las que se muestran en la Tabla 4-13:



**Figura 4-9. Influencia del aditivo rejuvenecedor sobre la alta temperatura crítica del asfalto de proyecto.**

**Tabla 4-13. Dosificaciones seleccionadas de aditivo rejuvenecedor para las mezclas con RAP.**

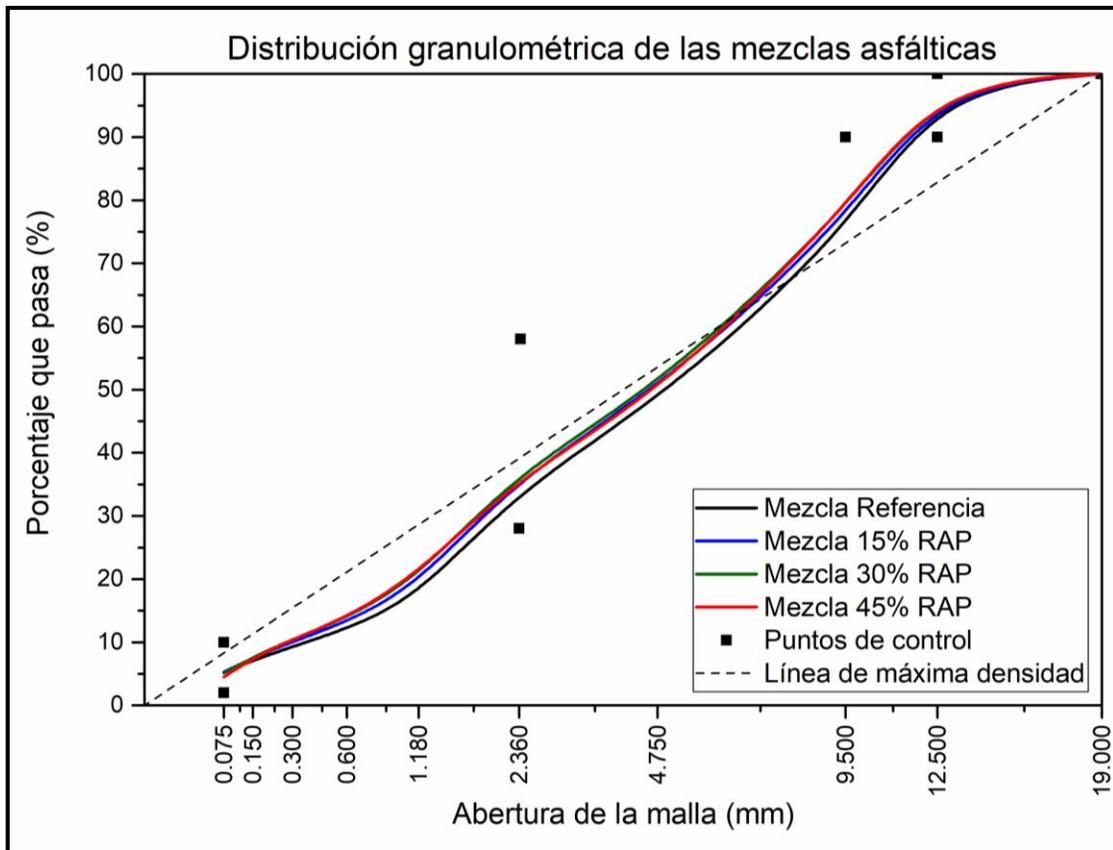
% de RAP	PG de asfalto de aporte	% de Aditivo Rejuvenecedor
0	PG 76-16	0
15	PG 70-22	6
30	PG 58-22	15
45	PG 46-22	27

#### 4.2 Selección de granulometrías de diseño y combinación de propiedades de agregados.

Las granulometrías diseñadas corresponden a los requisitos granulométricos para mezclas de tamaño nominal de 12,5 mm, en las cuales ya se realizaron los cálculos de combinación de agregados (ver Apéndice) de las cuatro fuentes disponibles: agregado grueso virgen, agregado fino virgen, RAP grueso y RAP fino. Las distribuciones granulométricas de las mezclas asfálticas diseñadas se muestran en las Tabla 4-14 y se muestran de manera gráfica en la Figura 4-10. La proporción de cada uno de los materiales se muestra más adelante en la Tabla 4-15.

**Tabla 4-14. Distribuciones granulométricas de las mezclas por diseñar.**

Abertura de mallas (pulgadas)	(mm)	Mezcla Referencia % Pasa	Mezcla 15% RAP % Pasa	Mezcla 30% RAP % Pasa	Mezcla 45% RAP % Pasa
3/4"	19	100	100	100	100
1/2 "	12.5	97.7	98.0	98.3	98.4
3/8 "	9.5	74.4	76.4	78.0	78.3
No. 4	4.75	48.1	49.9	50.3	49.1
No. 8	2.36	34.3	36.4	37.3	36.4
No. 16	1.18	17.2	19.1	20.3	20.8
No. 30	0.6	12.1	13.2	13.8	13.9
No. 50	0.3	9.3	10.1	10.5	10.5
No. 100	0.15	7.1	7.5	7.6	7.4
No. 200	0.075	5.3	5.3	5.1	4.5



**Figura 4-10. Gráfica de distribución granulométrica de las mezclas asfálticas diseñadas.**

Para la mezcla de Referencia la combinación fue: 60% agregado grueso y 40% de agregado fino. Las propiedades que se requiere conocer para el diseño volumétrico de esta mezcla son la Gravedad Específica Aparente ( $G_{sa}$ ) y la Gravedad Específica Bruta ( $G_{sb}$ ) ambas de la combinación de agregados gruesos y finos. Por lo tanto, y tomando como base la Ecuación 3-5, se tiene lo siguiente:

$$G_{sa_{combinado}} = \frac{100}{\left(\frac{P_{AG}}{G_{sa_{AG}}} + \frac{P_{AF}}{G_{sa_{AF}}}\right)} = \frac{100}{\left(\frac{60}{2.813}\right) + \left(\frac{40}{2.799}\right)} = 2.807$$

$$G_{sb_{combinado}} = \frac{100}{\left(\frac{P_{AG}}{G_{sb_{AG}}} + \frac{P_{AF}}{G_{sb_{AF}}}\right)} = \frac{100}{\left(\frac{60}{2.745}\right) + \left(\frac{40}{2.651}\right)} = 2.707$$

Dónde:

- $G_{sb}$  = Gravedad Específica Bruta de los agregados.
- $G_{sa}$  = Gravedad Específica Aparente de los agregados.
- AG = Agregados gruesos.
- AF = Agregados finos.
- $P_{AG}$  = Porcentaje de agregados gruesos vírgenes presentes en la mezcla de agregados.
- $P_{AF}$  = Porcentaje de agregados finos vírgenes presentes en la mezcla de agregados.

En cuanto a las propiedades combinadas de los agregados para las mezclas con RAP, se requiere conocer la Gravedad Teórica Máxima ( $G_{mm}$ ) de la combinación de RAP, de aquí, por retro-cálculo se obtiene el valor de Gravedad Específica Efectiva ( $G_{se}$ ), mismo que se utilizará como Gravedad Específica Bruta ( $G_{sb}$ ) de los agregados reciclados. Por último, se calculará la Gravedad Específica Bruta combinada para los agregados en las mezclas con RAP. La Tabla 4-15, muestra un resumen de los cálculos realizados para obtener los valores antes mencionados.

**Tabla 4-15. Resumen del cálculo de propiedades combinadas de los agregados en las mezclas con RAP.**

%RAP en mezcla	15	30	45
%RAP Fino	5	8	15
%RAP Grueso	10	22	30
% Agregado Grueso	50	40	35
% Agregado Fino	35	30	20
Gmm RAP combinado	2.451	2.500	2.451
Contenido de Asfalto en RAP fino	6.8	6.8	6.8
Contenido de Asfalto en RAP grueso	3.4	3.4	3.4
Gse/Gsb agregados de RAP	2.623	2.672	2.623
Gsb Agregado Grueso	2.745	2.745	2.745
Gsb Agregado Fino	2.651	2.651	2.651
Gsb combinado	<b>2.693</b>	<b>2.694</b>	<b>2.670</b>
Contenido de Asfalto combinado	<b>0.7</b>	<b>1.3</b>	<b>2.0</b>

#### 4.3 Diseño volumétrico de las mezclas.

Para cada contenido de asfalto probado, se elaboraron dos especímenes de mezcla suelta para determinar la Gravedad Teórica Máxima ( $G_{mm}$ ) tal y como se aprecia en la Figura 4-11; además de dos especímenes para determinar la Gravedad Bruta ( $G_{mb}$ ) mediante el Compactador Giratorio Superpave, tal y como se observa en la Figura 4-12. El objetivo del diseño volumétrico es encontrar el contenido de asfalto donde se cumplen las propiedades volumétricas citadas en la Tabla 3-7 del apartado de Metodología.



**Figura 4-11. Realización del ensayo para determinar la Gravedad Teórica Máxima.**



**Figura 4-12. Mezclado y elaboración de probetas para la determinación de la Gravedad Bruta compacta mediante el Compactador Giratorio Superpave.**

#### 4.3.1 Diseño de mezcla de referencia.

Haciendo uso del procedimiento de AASHTO R35, se calcula un contenido de asfalto inicial (ver el Apéndice para información más detallada), luego de lo cual, se elaboran dos especímenes para determinar la Gravedad Específica Teórica Máxima y Gravedad Específica Bruta compacta, con los cuales se determinaron las propiedades volumétricas iniciales. La Tabla 4-16 muestra los resultados encontrados en la primera mezcla de prueba.

**Tabla 4-16. Propiedades volumétricas obtenidas para un contenido de asfalto inicial.**

Propiedad	Resultado	Especificación <sup>1</sup>
Contenido de asfalto inicial, $P_{b_{ini}}$	5.3	N.A.
Gravedad Teórica Máxima, $G_{mm}$	2.533	N.A.
Gravedad Bruta Compacta, $G_{mb}$	2.358	N.A.
Grado de compactación de la mezcla con la cantidad de giros de diseño, $\%G_{mm} @N_{dis}$	93.1 %	96 %
Porcentaje de vacíos de aire, $V_a$	6.9 %	4 %
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral, VMA	17.5 %	14 % mín.

<sup>1</sup> según Protocolo AMAAC 2013 para mezclas con agregados de 12.5 mm de tamaño nominal.

N.A. = No aplica.

La siguiente etapa consistió en corregir el contenido de asfalto de manera que se cumplan los requisitos volumétricos en la mezcla. El cálculo realizado se muestra en el Apéndice, así como un estimado de las propiedades volumétricas que se obtendrían bajo esa corrección de contenido de asfalto. Hecho lo anterior, se

procedió a realizar mezclas para los especímenes de Gravedad Teórica Máxima ( $G_{mm}$ ) y Gravedad Bruta compacta ( $G_{mb}$ ), siguiendo el diseño experimental que aparece en la Tabla 3-8 del apartado de Metodología. La Tabla 4-17, muestra el resumen de resultados obtenidos al seguir el diseño experimental y la Figura 4-13 muestra los especímenes de dicho diseño experimental, mientras que los gráficos de diseño para esta mezcla de referencia se muestran en la Figura 4-14.

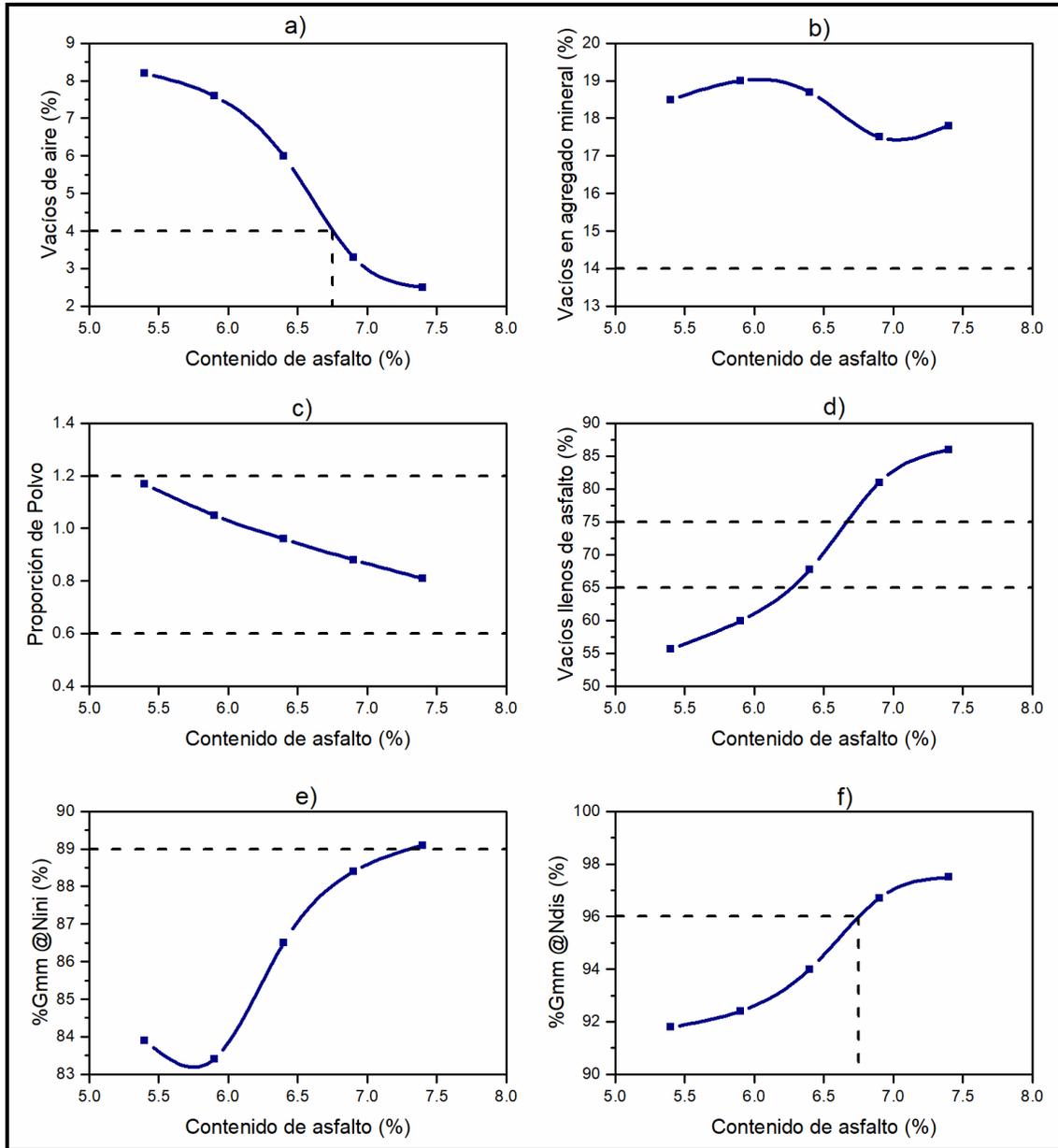
**Tabla 4-17. Resumen de propiedades volumétricas para distintos contenidos de asfalto. Resultados del diseño experimental.**

Contenido de asfalto probado, %	5.4	5.9	6.4	6.9	7.4	Especificación <sup>1</sup>
Gravedad Teórica Máxima, $G_{mm}$	2.541	2.521	2.502	2.481	2.464	N.A.
Gravedad Bruta compacta, $G_{mb}$	2.333	2.329	2.351	2.399	2.403	N.A.
Grado de compactación con la cantidad de giros de diseño, % $G_{mm}$ @ $N_{dis}$	91.8%	92.4%	94.0%	96.7%	97.5%	96 %
Porcentaje de vacíos de aire, $V_a$	8.2%	7.6%	6.0%	3.3%	2.5%	4 %
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral, VMA	18.5	19.0	18.7	17.5	17.8	14 % mín.
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA	55.7%	59.9%	67.7%	81.0%	86.0%	65 – 75 %
Proporción de polvo, DP	1.17	1.05	0.96	0.88	0.81	0.6 – 1.2
Grado de compactación con la cantidad de giros iniciales, % $G_{mm}$ @ $N_{ini}$	83.9%	83.4%	86.5%	88.4%	89.1%	≤ 89 %

<sup>1</sup> según Protocolo AMAAC, 2013 para mezclas con agregados de 12.5 mm de tamaño nominal. N.A. = No aplica.



**Figura 4-13. Probetas del diseño experimental para la mezcla de referencia. Probetas de 100mm de diámetro y 63,5 mm de altura aproximadamente.**



**Figura 4-14. Gráficos de diseño para la selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla de referencia: a) Contenido de asfalto vs Vacíos de aire, b) Contenido de asfalto vs Vacíos en el agregado mineral, c) Contenido de asfalto vs Proporción de polvo, d) Contenido de asfalto vs Vacíos llenos de asfalto, e) Contenido de asfalto vs Grado de compactación inicial, f) Contenido de asfalto vs Grado de compactación de diseño.**

Las observaciones que se desprenden de la figura anterior son las siguientes:

- La propiedad más importante por cumplir en una mezcla asfáltica es que los vacíos de aire sean igual a cuatro por ciento, lo cual se logra para un

contenido de asfalto de 6.75%, con el cual se evalúan el resto de las propiedades.

- Los vacíos en el agregado mineral (VMA) para los contenidos asfálticos analizados siempre fueron mayores de lo especificado (14%), por lo tanto, esta propiedad se cumple para el contenido de asfalto preliminar.
- Los vacíos llenos de asfalto (VFA) sólo se cumplen para contenidos de asfalto que oscilan entre 6.2% y 6.7%. Este hecho ayuda a acotar el rango de contenidos de asfalto en los cuales la mezcla se comportará mejor.
- La proporción de polvo siempre estuvo dentro de la especificación para cualquier contenido de asfalto estudiado.
- Las características de densificación inicial ( $\%G_{mm} @N_{ini}$ ) fue apropiada y menor al límite especificado, a excepción de contenidos de asfalto de 7.4 por ciento y mayores.

El **contenido óptimo de asfalto** fue fijado en **6.7%** con respecto al peso de la mezcla, y una vez establecido este valor, se procede a elaborar los especímenes que medirán el desempeño de la mezcla asfáltica diseñada. Además de lo anterior se analizó la compactación con la cantidad de giros máximo, para lo cual se elaboraron probetas con 205 giros en el Compactador Giratorio Superpave. Se encontró que la Gravedad Bruta compacta para este esfuerzo de compactación fue de 2.435, lo que significa que se tiene un Grado de compactación con la cantidad de giros máxima igual a 97.8%, un valor adecuado, pues la especificación indica que debe ser menor a 98%. Este parámetro es una simulación de las características de compactabilidad que sufrirá la mezcla asfáltica una vez que sea tendida, compactada y puesta en servicio.

#### 4.3.2 Diseño de las mezclas recicladas.

Para cada mezcla reciclada se propuso un contenido de asfalto de prueba, para el cual se obtuvo su Gravedad Teórica máxima ( $G_{mm}$ ). Los datos requeridos para la construcción del polígono de vacíos son los que se estipulan en el Protocolo AMAAC (2013) para mezclas de tamaño nominal de 12.5mm. La Tabla 4-18 muestra la información necesaria para todas las mezclas recicladas por diseñar.

**Tabla 4-18. Datos de propiedades volumétricas para la construcción del polígono de vacíos para diferentes mezclas con RAP.**

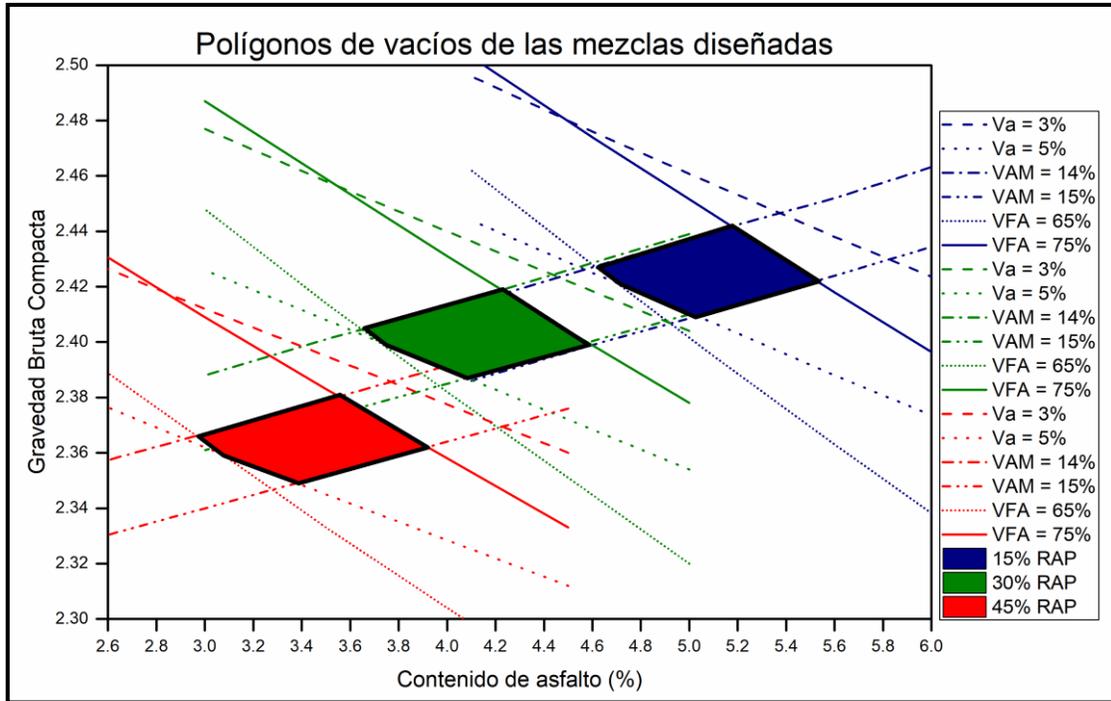
Propiedad	15% RAP	30% RAP	45% RAP
Gravedad Específica del Asfalto ( $G_b$ )		1.029	
Gravedad Bruta combinada de los agregados ( $G_{sb}$ )	2.693	2.694	2.670
Contenido de asfalto de aporte propuesto (C.A. <sub>ini</sub> )	6.0%	5.0%	3.1%
Gravedad Teórica Máxima para C.A. propuesto ( $G_{mm}$ )	2.476	2.478	2.453
Vacíos de aire mínimo ( $V_{a_{min.}}$ )		3.0 % <sup>1</sup>	
Vacíos de aire máximo ( $V_{a_{máx.}}$ )		5.0 % <sup>1</sup>	
Vacíos en el agregado mineral mínimo ( $VMA_{min.}$ )		14.0 % <sup>1</sup>	
Vacíos en el agregado mineral máximo ( $VMA_{máx.}$ )		15.0 %	
Vacíos llenos de asfalto mínimo ( $VFA_{min.}$ )		65.0 % <sup>1</sup>	
Vacíos llenos de asfalto máximo ( $VFA_{máx.}$ )		75.0 % <sup>1</sup>	

<sup>1</sup>Adaptado del Protocolo AMAAC, 2013 para mezclas con agregados de 12.5 mm de tamaño nominal.

Los cálculos para el polígono de vacíos constan de proponer un rango de contenido de asfalto, calcular la Gravedad Bruta Compacta ( $G_{mb}$ ) haciendo uso de la Ecuación 3-10 a Ecuación 3-12, y utilizar los datos mostrados en la Tabla 4-15 y la Tabla 4-18. Los resultados de los cálculos anteriores se muestran en la Tabla 4-19, y en la Figura 4-15 se aprecia su representación gráfica.

**Tabla 4-19. Resultados de los cálculos para la construcción del polígono de vacíos.**

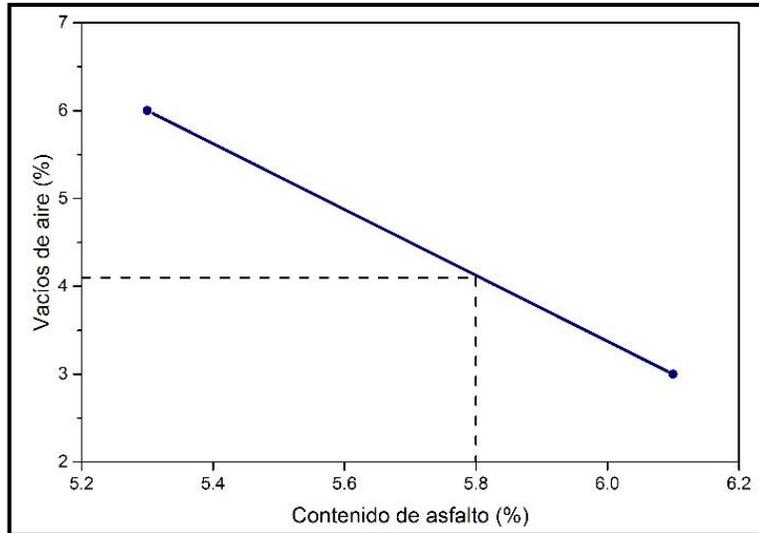
% RAP en mezcla	Contenido de asfalto, %	Gravedad Teórica Máxima ( $G_{mm}$ )	Gravedad Bruta compacta esperada para:					
			$V_a = 3\%$	$V_a = 5\%$	$VAM = 14\%$	$VAM = 15\%$	$VFA = 65\%$	$VFA = 75\%$
15	6.1	2.495	2.420	2.370	2.466	2.437	2.332	2.391
	5.6	2.514	2.438	2.388	2.452	2.424	2.363	2.418
	5.1	2.533	2.457	2.407	2.440	2.411	2.395	2.446
	4.6	2.553	2.476	2.425	2.427	2.399	2.428	2.474
	4.1	2.573	2.496	2.444	2.414	2.386	2.462	2.503
30	5.0	2.478	2.404	2.354	2.439	2.410	2.320	2.378
	4.5	2.497	2.422	2.372	2.426	2.398	2.351	2.404
	4.0	2.515	2.440	2.390	2.413	2.385	2.382	2.431
	3.5	2.534	2.458	2.408	2.401	2.373	2.414	2.459
	3.0	2.554	2.477	2.426	2.388	2.361	2.448	2.487
45	4.5	2.433	2.360	2.312	2.404	2.376	2.275	2.333
	3.5	2.469	2.395	2.345	2.379	2.352	2.333	2.383
	3.0	2.487	2.412	2.362	2.367	2.340	2.364	2.409
	2.5	2.505	2.430	2.380	2.355	2.328	2.395	2.436



**Figura 4-15. Polígonos de vacíos de las tres mezclas asfálticas recicladas para la selección del contenido óptimo de asfalto.**

Con la información obtenida se realizó lo siguiente:

- Para la mezcla con 15% de RAP. De acuerdo a la Figura 4-15, el contenido óptimo de “asfalto de aporte” oscila entre 4.6% y 5.4%, y por tal motivo se elaboraron dos especímenes para medir la Gravedad Teórica Máxima y dos para la Gravedad Bruta compacta con esas proporciones de aglutinante. Debido a que la combinación de agregados para esta mezcla aporta 0.7% de asfalto, las mezclas anteriores contendrán 5.3% y 6.1% de asfalto total combinado. Las propiedades volumétricas para estos contenidos se muestran en la Tabla 4-20, y debido a que no fueron satisfechas se elaboró el gráfico mostrado en la Figura 4-16, con el cual se estimó el contenido óptimo de asfalto en 5.8%, y sus resultados también pueden ser apreciados en la Tabla 4-20.



**Figura 4-16. Determinación del contenido óptimo de asfalto para la mezcla con 15% de RAP.**

- Para la mezcla con 30% de RAP. De acuerdo al polígono de vacíos exhibido en la Figura 4-15 el contenido óptimo de asfalto de aporte para esta mezcla oscila entre 3.6% y 4.6%. En esta ocasión se elaboraron dos especímenes para medir la Gravedad Teórica Máxima y dos para la Gravedad Bruta compacta mezclados con un contenido de asfalto intermedio: se utilizó 4.0% de asfalto de aporte. Debido a que la combinación de agregados aporta 1.3%, el contenido de asfalto total combinado fue de 5.3%. Las propiedades volumétricas se cumplieron para esta mezcla, cuyos resultados se plasman en la Tabla 4-20.
- Para la mezcla con 45% de RAP. El polígono de vacíos correspondiente (véase Figura 4-15) indica que el contenido óptimo de asfalto de aporte se encuentra en un rango de 3.0% a 4.0%. En esta ocasión se elaboraron dos especímenes para medir la Gravedad Teórica Máxima y dos para la Gravedad Bruta compacta mezclados con un contenido de asfalto de aporte de 3.1%. Debido a que la combinación de agregados aporta 2.0% de asfalto, el contenido de aglutinante total combinado fue de 5.1%. La Tabla 4-20 muestra un resumen de las propiedades volumétricas encontradas.

**Tabla 4-20. Resumen de propiedades volumétricas para las mezclas recicladas.**

Mezcla ensayada	15% RAP			30% RAP	45% RAP	Especificación <sup>1</sup>
Contenido de asfalto de aporte, %	4.6	5.4	5.1	4.0	3.1	
Contenido de asfalto total, %	5.3	6.1	5.8	5.3	5.1	
Gravedad Teórica Máxima, $G_{mm}$	2.525	2.498	2.509	2.522	2.527	N.A.
Gravedad Bruta compacta, $G_{mb}$	2.374	2.422	2.406	2.424	2.425	N.A.
Grado de compactación con la cantidad de giros de diseño, $\%G_{mm}@N_{dis}$	94.0%	97.0%	95.9%	96.1%	96.0%	96 %
Porcentaje de vacíos de aire, $V_a$	6.0%	3.0%	4.1%	3.9 %	4.0 %	4.0 %
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral, VMA	16.5	15.5	15.9 %	14.8 %	13.8 %	14 % mín.
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA	63.8%	80.4%	73.9 %	73.8 %	70.8 %	65 – 75 %
Proporción de polvo, DP	1.00	0.87	0.91	0.96	0.88	0.6 – 1.2
Grado de compactación con la cantidad de giros iniciales, $\%G_{mm}@N_{ini}$	84.5%	87.5%	86.4 %	86.8 %	86.7 %	≤ 89 %
Grado de compactación con la cantidad de giros máxima, $\%G_{mm}@N_{max}$	---	---	96.7 %	96.3 %	96.8 %	≤ 98 %

<sup>1</sup> según Protocolo AMAAC, 2013 para mezclas con agregados de 12.5 mm de tamaño nominal.

N.A. = No aplica.

Para todas las mezclas recicladas se cumplieron todas las propiedades volumétricas; para la mezcla con 45% de RAP se presenta un VMA ligeramente menor al especificado, sin embargo, éste se considera aceptable. Los contenidos óptimos de asfalto de aporte y total son los siguientes:

- 5.1% de asfalto de aporte (5.8% total), para la mezcla con 15 % de RAP.
- 4.0% de asfalto de aporte (5.3% total), para la mezcla con 30 % de RAP.
- 3.1% de asfalto de aporte (5.1% total), para la mezcla con 45 % de RAP.

Al revisar el Grado de compactación con el número de giros máximo, se aprecia que los resultados no superan el 97% (98% es el máximo admisible), lo que parece indicar que la compactación excesiva no tiene influencia significativa en la reducción de vacíos o densificación de la mezcla, lo cual podría ser un indicativo de que la mezcla puede tener mayor durabilidad.

### 4.3.3 Análisis comparativo de las mezclas diseñadas.

En este apartado se evalúa la influencia de la incorporación de RAP sobre las propiedades volumétricas en las mezclas asfálticas diseñadas. Se elaboraron la Figura 4-17 y Figura 4-18, como producto de un análisis realizado a la Tabla 4-17 y Tabla 4-20, donde se visualiza como cambian las propiedades volumétricas más importantes con la incorporación de RAP.

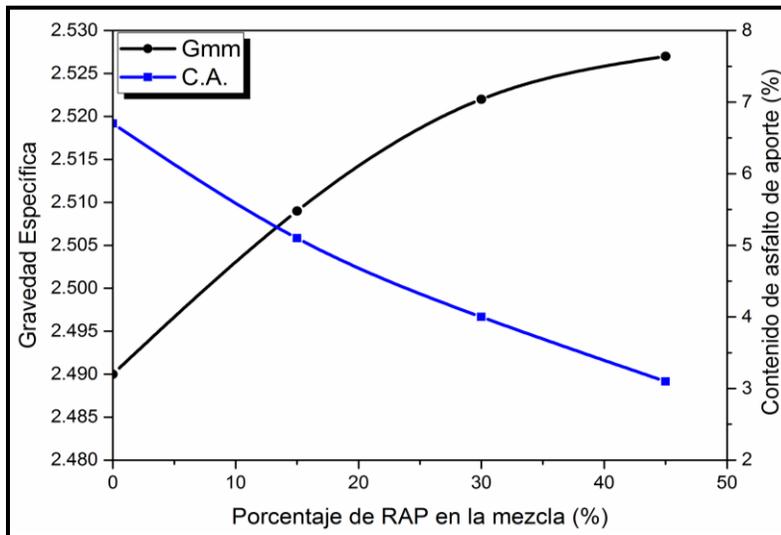


Figura 4-17. Influencia del contenido de RAP sobre las propiedades volumétricas: Gravedad Teórica Máxima y Contenido Óptimo de Asfalto.

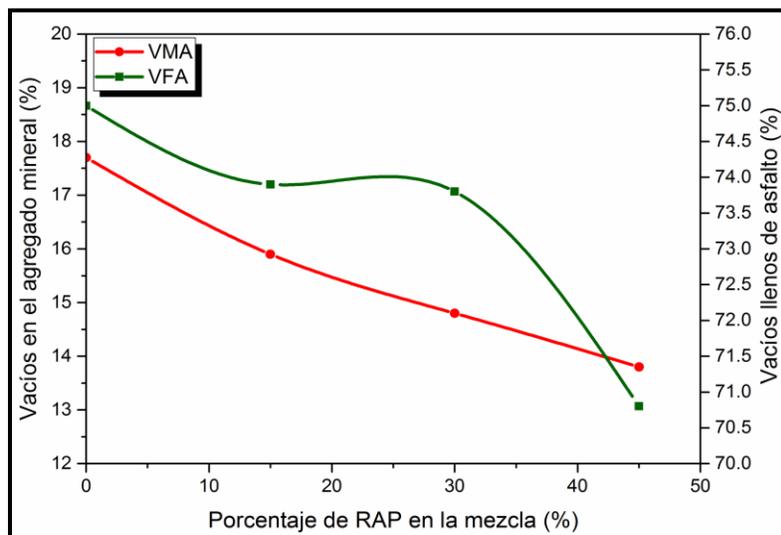


Figura 4-18. Influencia del contenido de RAP sobre las propiedades volumétricas: Vacíos en Agregado Mineral y Vacíos Llenos con Asfalto.

Con las Figuras anteriores es posible apreciar lo siguiente:

- A medida que se incorporan mayores proporciones de RAP en las mezclas asfálticas, se produce un incremento en la Gravedad Teórica Máxima ( $G_{mm}$ ) de las mismas. Esto puede deberse a que los agregados del RAP sean más densos que los agregados vírgenes, lo cual es muy probable según se revisó en la literatura. Otro aspecto que también puede influir, aunque de manera mucho menor, es la densidad del asfalto que proviene del RAP que al combinarse con los asfaltos de aporte podrían generar un aglutinante más denso, fortaleciendo así el incremento en este parámetro.
- Conforme se incorpora más RAP en las mezclas, el contenido de asfalto óptimo necesario para cumplir con las propiedades volumétricas disminuye, siendo de 6.7% para la mezcla de referencia, 5.1% para la mezcla con 15% de RAP, 4.0% para la mezcla con 30% de RAP y 3.1% para la mezcla con 45% de RAP. Lo anterior se puede manifestar como ahorros económicos del orden de 24%, 40%, y 57% respectivamente, en cuanto al consumo de asfalto. Este hecho confirma lo que ya fue citado anteriormente en el Capítulo 1 de este trabajo de investigación.
- Los vacíos en el agregado mineral (VMA) muestran una tendencia clara a reducirse con los aumentos en las cantidades de RAP, lo que puede deberse en gran parte a la distribución de tamaño de partículas, que, aunque las granulometrías son muy parecidas entre sí, es normal encontrar algunas pequeñas discrepancias entre ellas. El hecho de que el RAP sea más denso también colabora con este fin, pues conforme se incrementa la cantidad de materiales más densos que pueden rellenar los huecos existentes, menor será la porosidad o vacíos entre las partículas para un volumen dado.
- Los vacíos llenos con asfalto (VFA) muestran una tendencia de reducción, aunque lo hacen de una manera escalonada, cuando se incorpora más RAP en la mezcla. El escalonamiento puede deberse a las proporciones de RAP fino y grueso, ya que para 30% de RAP se tiene mayor proporción de RAP grueso que fino, en comparación con las otras mezclas recicladas.

#### 4.4 Pruebas de desempeño para las mezclas asfálticas.

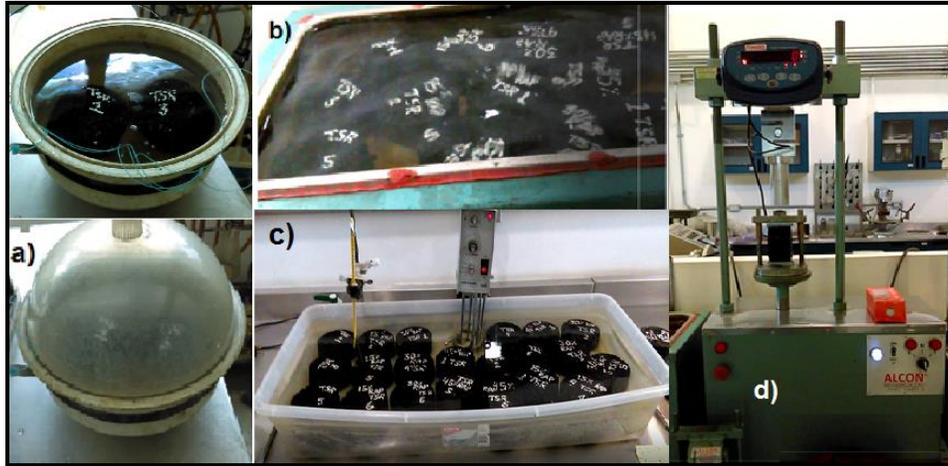
##### 4.4.1 Susceptibilidad a la humedad "TSR".

Este ensayo se realizó sobre especímenes compactos con una densidad (Gravedad Bruta compacta,  $G_{mb}$ ) de  $93.0 \pm 0.5\%$  con respecto a la máxima densidad ( $G_{mm}$ ), siendo estos de un diámetro de 100 mm y una altura de 63.5 mm aproximadamente. En la Figura 4-19 se muestran ejemplares de las probetas elaboradas para la ejecución de esta prueba.



**Figura 4-19. Probetas para la ejecución de la prueba de susceptibilidad al daño inducido por humedad. Mezcla de referencia.**

Un grupo de tres probetas fue acondicionado mediante una saturación por vacío como se aprecia en la Figura 4-20a, mientras que el otro grupo se mantuvo intacto para ser las probetas de control o referencia. El método indica que la opción de congelamiento puede ser descartada si así se acuerda con las partes interesadas, por lo que, debido a que en la zona de estudio no existen tales condiciones de baja temperatura, se decidió eliminar este paso. A continuación, se realizó una inmersión en agua a  $60 \pm 1^\circ$  por 24 horas (Figura 4-20b), para continuar con una preparación a  $25^\circ\text{C}$  por dos horas inmersas las probetas en agua (Figura 4-20c) para finalmente ser ensayadas a tensión indirecta en una prensa Marshall a una velocidad de aplicación de carga de 50 mm por minuto (Figura 4-20d). Este procedimiento fue análogo en todas las mezclas diseñadas en 4.3.1 y 4.3.2.



**Figura 4-20. Realización de la prueba de susceptibilidad al daño inducido por humedad.**

Las características físicas de los grupos de especímenes para cada mezcla diseñada se muestran en la Tabla 4-21; mientras que, los resultados de la resistencia retenida (TSR) para cada mezcla asfáltica diseñada se muestran en la Tabla 4-22. Nota: “MA” significa mezcla asfáltica, los números acompañados de la letra “R” que aparecen después del guion indican el contenido de RAP en porcentaje.

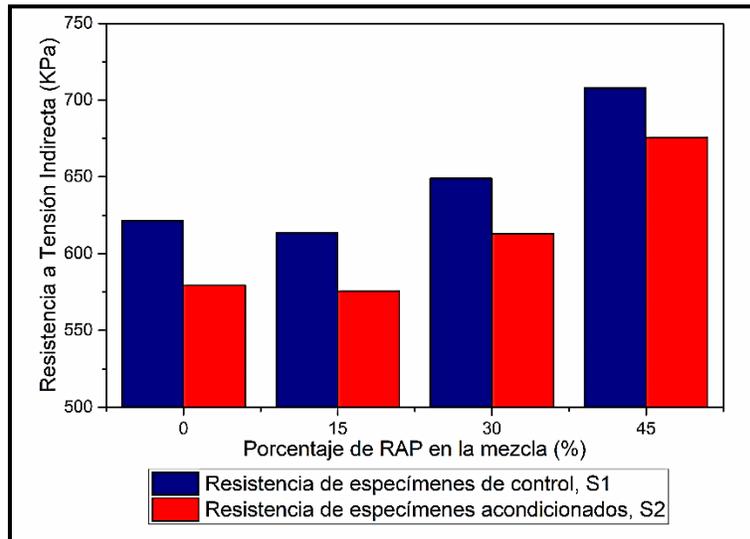
**Tabla 4-21. Características físicas de los especímenes para TSR de las mezclas diseñadas.**

Identificación de la mezcla	Especímenes de control		Especímenes acondicionados		
	Altura prom., $H_1$ (mm)	Vacíos prom., $V_{a1}$ (%)	Altura prom., $H_2$ (mm)	Vacíos prom., $V_{a2}$ (%)	Saturación prom., $S^*$ , (%)
MA – 0R	62.3	7.0	63.6	7.0	73.8
MA – 15R	62.0	7.2	62.3	7.0	76.3
MA – 30R	63.3	6.9	63.6	7.0	73.9
MA – 45R	63.0	6.9	63.3	6.9	73.0

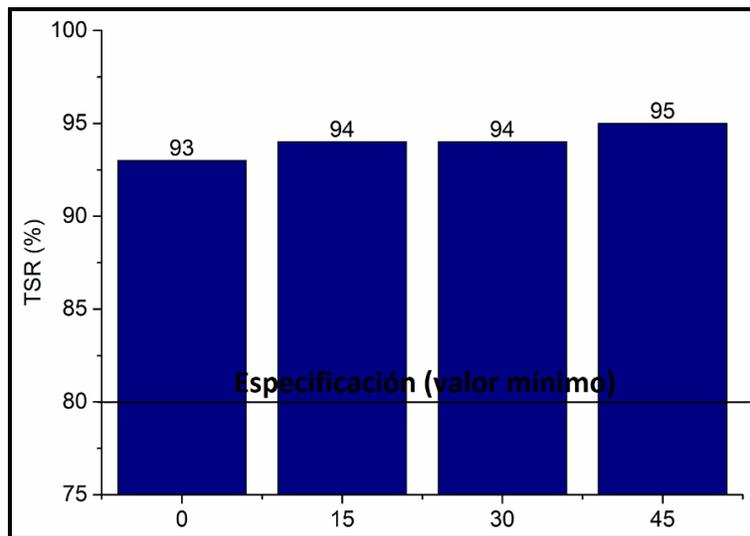
**Tabla 4-22. Resumen de resultados para el parámetro TSR de las mezclas diseñadas.**

Identificación de la mezcla	Resistencia de especímenes de control, $S_1$ (KPa)	Resistencia de especímenes acondicionados, $S_2$ (KPa)	Relación de Resistencias a Tensión, TSR (%)	Especificación
MA – 0R	621.74	579.57	93	80% mín.
MA – 15R	613.90	575.65	94	
MA – 30R	649.20	612.92	94	
MA – 45R	708.04	675.68	95	

La Figura 4-21 y Figura 4-22, comparan de una manera gráfica los resultados obtenidos en la Tabla 4-22 para las mezclas diseñadas en cuestión.



**Figura 4-21. Relación entre el Porcentaje de RAP en las mezclas con la Resistencia a Tensión Indirecta.**



**Figura 4-22. Relación entre el Porcentaje de RAP en las mezclas con la Relación de Resistencias a Tensión (TSR).**

Es posible apreciar que las mezclas diseñadas presentan muy poca susceptibilidad a la humedad, puesto que las resistencias de ambos grupos de probetas tienden a ser muy similar, cuya relación de resistencias supera sin dificultad el valor mínimo recomendado en el Protocolo AMAAC y en Superpave. Al

analizar la Figura 4-21, se aprecia que existe una ligera disminución en las resistencias a tensión indirecta para la mezcla con 15% de RAP, cuando esta se compara con la mezcla de referencia; sin embargo, al incrementar la proporción de RAP, se inicia un nuevo incremento de resistencia en ambos grupos de especímenes. Lo anterior puede deberse posiblemente a la existencia de asfalto cada vez más rígido y de mayor resistencia ante esta sollicitación mecánica. En la Figura 4-22, se aprecia que todas las Relaciones de Resistencia a Tensión (TSR), son muy superiores al mínimo recomendado. Por otro lado, también pudo distinguirse que la falla en las probetas fue en la mezcla, ya que al separarse estas en dos fracciones se aprecia mezcla dividida y no partículas rotas de agregados (Figura 4-23). Por lo tanto, en el aspecto de la susceptibilidad al daño inducido por humedad y observando con detalle los resultados obtenidos, se puede deducir que las mezclas recicladas con RAP presentan un desempeño similar o incluso superior al de la mezcla de referencia.



**Figura 4-23. No existe rotura de agregados, por lo que se deduce que la falla en las probetas fue debido a que se superó el límite de fluencia de la mezcla asfáltica.**

#### 4.4.2 Susceptibilidad a la deformación permanente.

Se elaboraron cuatro probetas de 150mm de diámetro y 50 mm de altura, por cada mezcla a ensayar, las cuales cumplieron con los requisitos establecidos en la Recomendación AMAAC RA 01/2008. En todos los ensayos se aplicaron 20,000

pasadas de la rueda, lo que corresponde a un nivel de tránsito muy alto, según el Protocolo AMAAC (2013), pudiendo detenerse el ensayo si la profundidad de rodera (deformación permanente) superaba los 10 mm. Se procuró que la densidad (Gravedad Bruta compacta,  $G_{mb}$ ) de los especímenes fuera de  $93 \pm 1\%$  con respecto a la máxima densidad ( $G_{mm}$ ). En la Figura 4-24a, se muestran las probetas cortadas, montadas en los moldes, e instrumentadas con yeso para la ejecución de esta prueba. Esta fue la condición: antes del ensayo. Las probetas fueron montadas en el dispositivo de prueba, y saturadas en el baño de agua a una temperatura de 50 °C aproximadamente, tal y como se ilustra en la Figura 4-24b.



**Figura 4-24. Preparación y montaje de probetas para el ensayo de deformación permanente por rodera. Mezcla de referencia.**

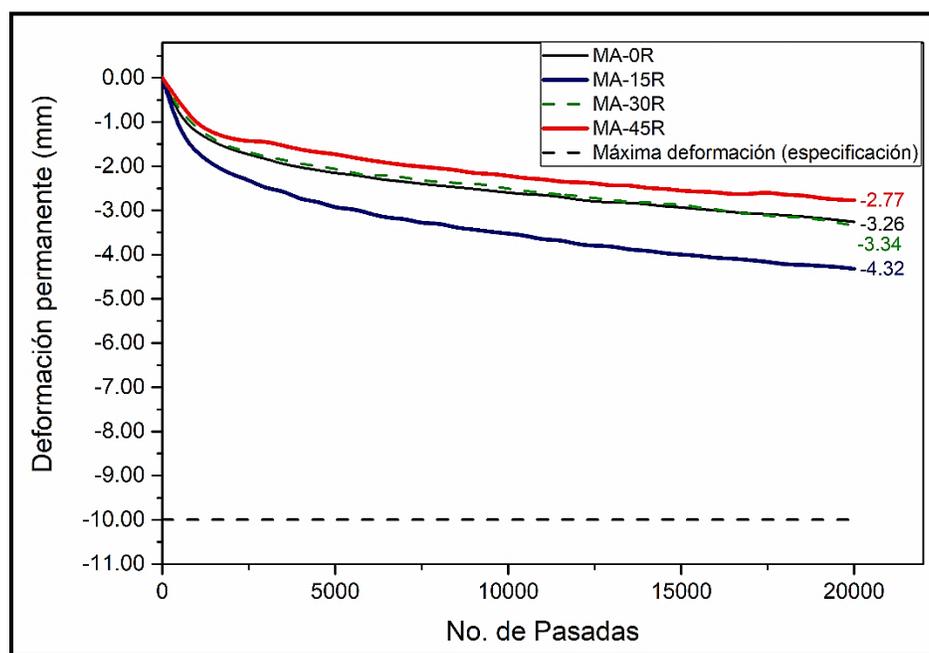
Los resultados del ensayo de deformación permanente para cada mezcla diseñada se muestran de manera resumida en la Tabla 4-23; la identificación de las mezclas es la misma que en el punto 4.4.1.

**Tabla 4-23. Resumen de resultados de las pruebas de las mezclas asfálticas diseñadas.**

Identificación de mezcla	Contenido de vacíos promedio	Temperatura de prueba, °C	Deformación permanente, mm	Especificación <sup>1</sup> , mm
MA – 0R	6.6	50	3.26	10.0 máx.
MA – 15R	7.3	51	4.315	10.0 máx.
MA – 30R	7.2	51	3.34	10.0 máx.
MA – 45R	6.6	50	2.77	10.0 máx.

<sup>1</sup> deformación máxima permitida para un nivel de tránsito muy alto con 20,000 pasadas en la prueba. Según AMAAC (2013).

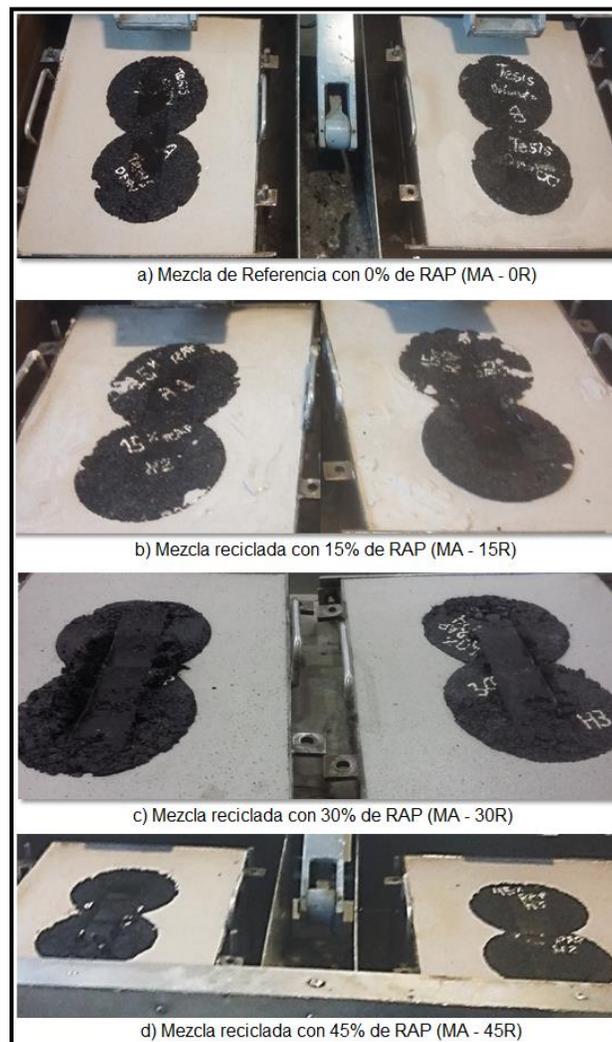
Al analizar la información contenida en la Tabla 4-23, resulta evidente que todas las mezclas diseñadas poseen adecuada resistencia al ahuellamiento, presentando valores inferiores a los 10 mm de profundidad de rodera, valor especificado en el Protocolo AMAAC (2013). Por otro lado, en la Figura 4-25 se presentan las gráficas de comportamiento de las mezclas durante las pruebas.



**Figura 4-25. Comportamiento de las mezclas asfálticas analizadas ante la aplicación de ciclos de carga (pasadas de la rueda).**

Con respecto a la Figura 4-25, se puede inferir que bajos porcentajes de RAP incorporados en las mezclas recicladas (menores al 15%), no parecen tener un aporte significativo en la reducción de la resistencia a la formación de roderas; sin embargo, esta mezcla manifestó una profundidad de rodera por debajo del máximo especificado (10 mm). Por otro lado, la mezcla con 30% de RAP manifiesta un comportamiento muy similar al de la mezcla de referencia, pues ambas aparecen en la Figura 4-25 como dos líneas muy juntas una de la otra, y cuyos valores finales de profundidad de rodera se asemejan. Este hecho apunta a que con 30% de RAP en la mezcla, se igualan las propiedades de resistencia a la deformación permanente con respecto a la mezcla de referencia. Por último, la incorporación de 45% de RAP en la mezcla reciclada tiene una tendencia a reducir la profundidad de

rodera, posiblemente debido a una concentración de asfalto rígido que no pudo combinarse totalmente con el asfalto de aporte (PG 46-22), lo que le confiere a esta mezcla una alta resistencia a la formación de roderas. Teniendo en consideración lo anterior, ante el efecto de deformación permanente, el comportamiento de la mezcla con 45% de RAP supera al de la mezcla de referencia al presentar menor profundidad de rodera. En los siguientes ensayos se podrá confirmar si esta mezcla no presenta problemas con respecto a su respuesta ante esfuerzos y deformaciones aplicados de manera cíclica en la prueba de Módulo Dinámico y la prueba de Fatiga. Adicionalmente la Figura 4-26, muestra el estado final de todas las probetas ensayadas.



**Figura 4-26. Probetas deformadas después del ensayo. Nótese que al centro de las probetas se aprecia ligeramente la marca de la rueda.**

#### 4.4.3 Ensayos Dinámicos.

Como se mencionó en la Metodología, la prueba se realizó utilizando un equipo que no realizó ajustes en el esfuerzo dinámico, en aras de medir deformaciones que estuvieran en un rango de 50 a 150  $\mu\epsilon$  (micras de metro) y correspondieran a un comportamiento visco-elástico de las muestras de mezcla asfáltica. Sin embargo, se continuó con el uso de este equipo, tratando de conservar los demás requisitos estipulados en AASHTO TP-62. Durante la prueba se aplicó una carga sinusoidal (o forma haversiana), aplicada con la configuración de ciclos y frecuencias que se mostró en la Tabla 3-10. El esfuerzo es entonces calculado y la deformación es registrada simultáneamente. En la Figura 4-27, se muestra la pantalla del software que ejecutó la prueba y donde se aprecian los esfuerzos aplicados y la deformación que la acompaña.

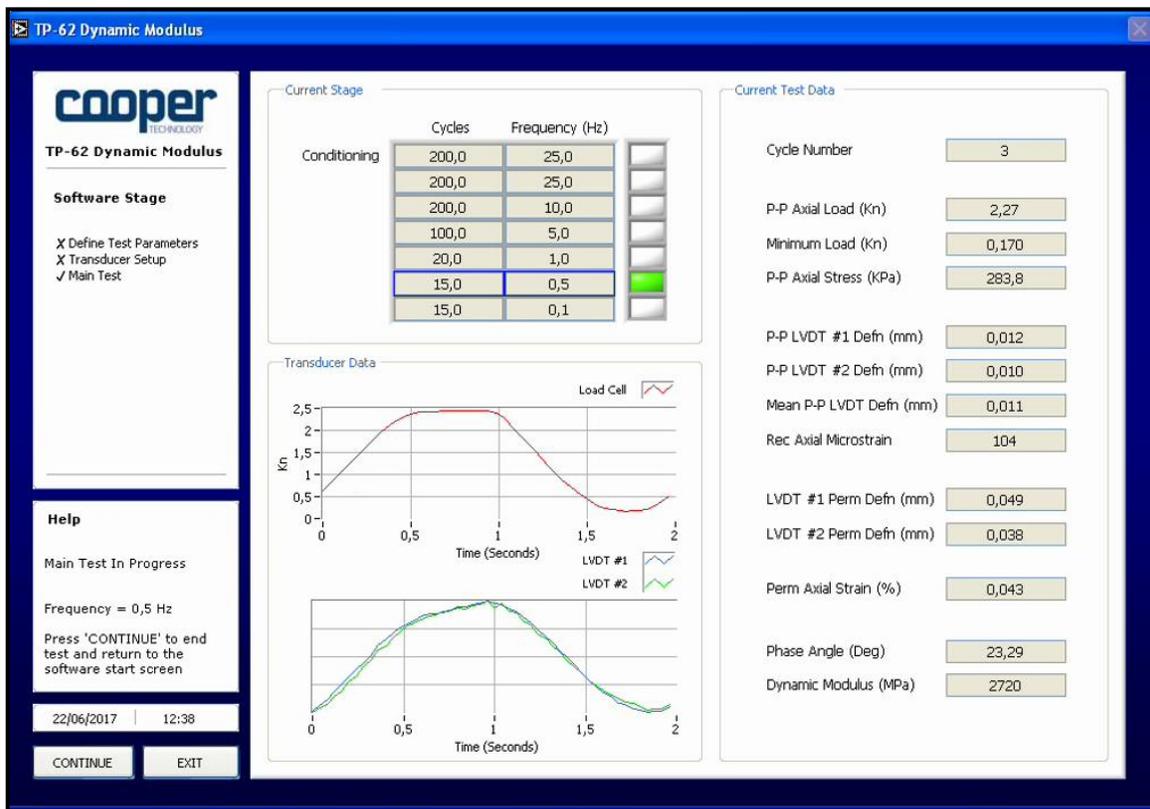


Figura 4-27. Interfaz del Software de Cooper Technology para Módulo Dinámico donde se aprecian las gráficas de esfuerzo y deformación durante la ejecución de una prueba.

Las Tablas 4-24 a Tabla 4-27, muestran los resúmenes de resultados obtenidos en cada prueba para todos los especímenes ensayados y para cada mezcla asfáltica diseñada. Nótese que “|E\*|” es el Módulo Dinámico y “ $\delta$ ” es el ángulo de fase.

**Tabla 4-24. Resumen de resultados de los ensayos de Módulo Dinámico para la mezcla de referencia.**

Frecuencia Hz	Temperatura °C	Probeta 1		Probeta 2	
		E* , (MPa)	$\delta$ , °	E, (MPa)	$\delta$ , °
25	4	9181	8.5	9098	8.8
10	4	8525	12.2	8658	11.2
5	4	8208	14.6	8032	15.4
1	4	6340	18.9	5903	19.1
0.5	4	5517	20.2	5250	20.2
0.1	4	3947	22.1	3917	21.6
25	20	5136	17.1	5192	16.4
10	20	4106	24.0	4464	20.3
5	20	3418	18.2	3573	20.6
1	20	2398	23.8	2442	21.1
0.5	20	2056	25.4	2092	23.7
0.1	20	1398	22.8	1434	23.2
25	30	2541	21.2	2490	22.8
10	30	1894	24.5	1863	25.5
5	30	1586	24.3	1589	24.9
1	30	1065	30.2	1060	29.9
0.5	30	910	28.1	899	29.3
0.1	30	655	33.6	640	35.5
25	40	1106	26.7	1056	26.3
10	40	819	29.1	774	28.5
5	40	674	31.6	640	30.3
1	40	488	33.8	454	33.9
0.5	40	426	36.1	398	35.6
0.1	40	318	38.1	295	40.2

**Tabla 4-25. Resumen de resultados de los ensayos de Módulo Dinámico para la mezcla con 15% de RAP.**

Frecuencia Hz	Temperatura °C	Probeta 1		Probeta 2	
		E* , (MPa)	f, °	E, (MPa)	f, °
25	4	11512	8.8	11524	9.4
10	4	11071	11.4	10160	12.9
5	4	10330	13.3	10099	13.5
1	4	8687	18.1	7976	18.9
0.5	4	7648	19.7	7084	19.9
0.1	4	5760	21.5	5411	22.8
25	20	6713	16.5	6933	15.4
10	20	5716	19.3	5690	19.3
5	20	4875	21.6	5022	23.5
1	20	3370	21.4	3528	22.1
0.5	20	2841	23.7	2996	22.6
0.1	20	1911	24.7	1977	26.9
25	30	3332	22.4	3662	21.7
10	30	2571	24.1	2925	24.6
5	30	2121	25.5	2484	26.1
1	30	1414	27.1	1632	26.9
0.5	30	1185	29.1	1376	29.9
0.1	30	829	35.3	974	32.4
25	40	1547	26.5	1646	25.9
10	40	1160	28.1	1250	28.2
5	40	966	29.1	1034	28.9
1	40	680	32.2	718	29.2
0.5	40	586	35.8	624	35.1
0.1	40	432	39.7	457	38.1

**Tabla 4-26. Resumen de resultados de los ensayos de Módulo Dinámico para la mezcla con 30% de RAP.**

Frecuencia Hz	Temperatura °C	Probeta 1		Probeta 2	
		E* , (MPa)	f, °	E, (MPa)	f, °
25	4	9670	9.4	10550	9.2
10	4	9220	11.4	9261	10.6
5	4	8476	14.3	9576	12.0
1	4	6203	19.6	6903	18.4
0.5	4	5544	21.1	6141	19.6
0.1	4	4130	23.5	4754	22.3
25	20	6541	17.1	6349	17.0
10	20	5625	19.7	5575	19.4
5	20	4720	21.9	4808	22.2
1	20	3278	23.0	3406	22.9
0.5	20	2800	24.7	2942	23.0
0.1	20	1995	25.1	2053	24.0
25	30	3538	21.8	3712	21.2
10	30	2906	23.6	2844	23.8
5	30	2454	25.2	2389	24.4
1	30	1610	25.4	1623	27.6
0.5	30	1359	28.0	1370	29.1
0.1	30	932	30.1	955	28.4
25	40	1307	25.9	1233	26.1
10	40	948	26.8	905	27.5
5	40	784	28.1	746	29.0
1	40	545	30.7	525	32.1
0.5	40	467	34.9	450	35.7
0.1	40	340	38.9	328	39.4

**Tabla 4-27. Resumen de resultados de los ensayos de Módulo Dinámico para la mezcla con 45% de RAP.**

Frecuencia Hz	Temperatura °C	Probeta 1		Probeta 2	
		$ E^* $ , (MPa)	$\delta$ , °	E, (MPa)	$\delta$ , °
25	4	13143	7.6	13159	7.7
10	4	11992	8.8	12683	11.0
5	4	11292	14.7	10905	14.9
1	4	9155	15.4	9371	15.0
0.5	4	8257	20.5	8478	17.4
0.1	4	5794	22.8	6339	18.2
25	20	6494	15.4	7031	14.1
10	20	5800	18.1	5771	20.7
5	20	4862	21.9	4929	21.4
1	20	3496	22.2	3502	21.9
0.5	20	2956	23.1	2997	22.0
0.1	20	2003	24.4	2075	23.2
25	30	3910	20.9	4091	21.0
10	30	2967	23.6	3215	23.6
5	30	2489	24.7	2705	24.4
1	30	1644	26.1	1791	25.7
0.5	30	1391	29.3	1497	28.1
0.1	30	968	32.5	1023	30.1
25	40	1713	25.5	1749	25.0
10	40	1284	27.4	1340	26.4
5	40	1058	29.9	1111	28.8
1	40	721	32.6	772	31.2
0.5	40	619	31.3	665	29.1
0.1	40	442	34.9	471	34.5

En la Figura 4-28 se muestran una de las principales representaciones para el comportamiento visco-elástico de las mezclas asfálticas, la cual corresponde a las curvas isotérmicas para Módulo Dinámico ( $|E^*|$ ) y Ángulo de fase ( $\delta$ ) en función de la frecuencia de ensayo para cada una de las temperaturas probadas.

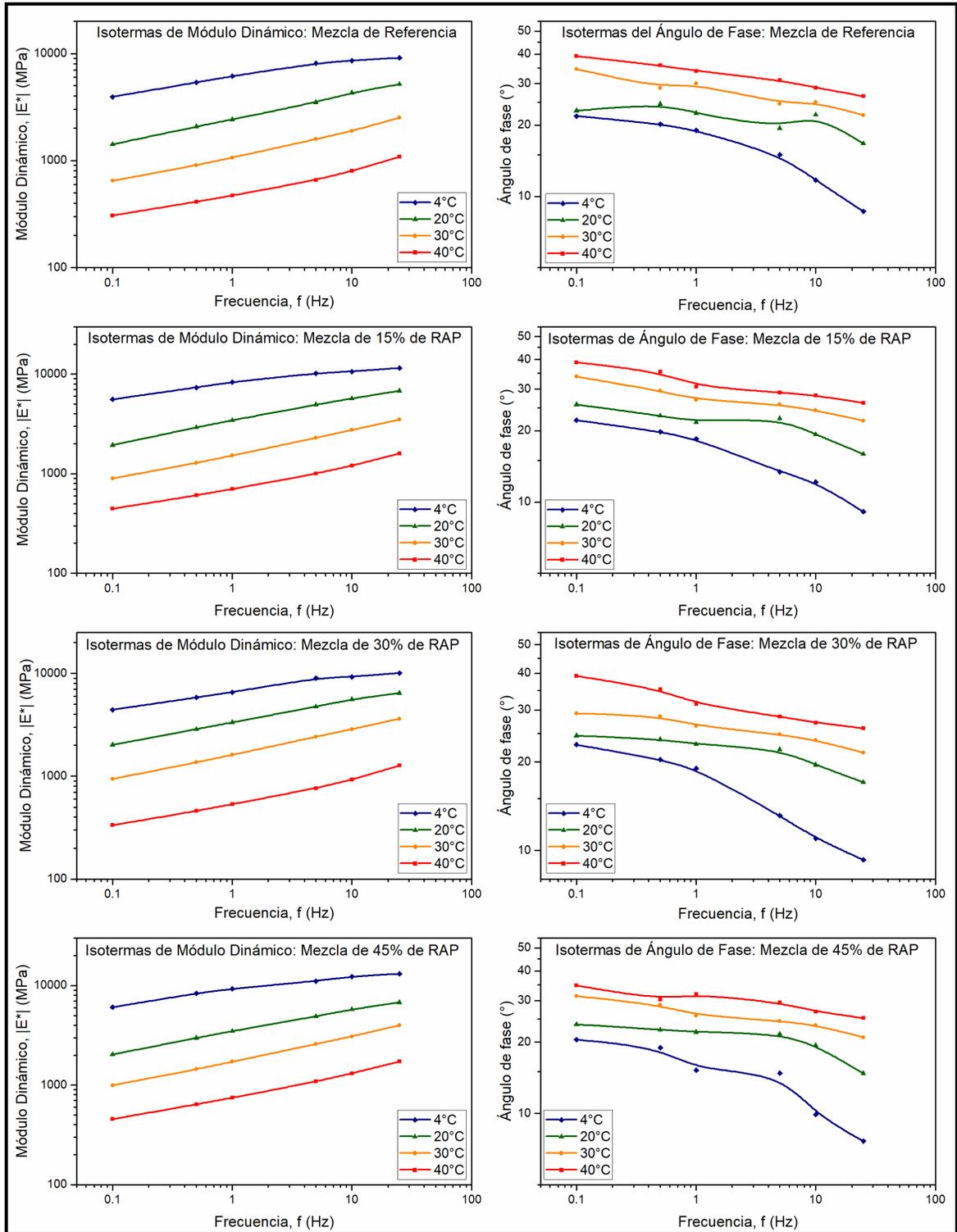


Figura 4-28. Curvas Isotérmicas de Módulo Dinámico ( $|E^*|$ ) y Ángulo de fase ( $\delta$ ) para cada una de las mezclas asfálticas diseñadas.

El tipo de gráfico ilustrado en la Figura 4-28 nos permite visualizar la variación del Módulo Dinámico o del Ángulo de fase con la velocidad de aplicación de carga, por lo que es posible apreciar los siguientes comportamientos:

- Conforme la frecuencia de ensayo se incrementó, el Módulo Dinámico también presentó valores mayores, mientras que el Ángulo de fase se redujo. Lo anterior es señal de que la mezcla asfáltica está comportándose de una manera más elástica comparado con otras velocidades de aplicación de carga.
- A medida que se incrementó la temperatura de ensayo, los Módulos Dinámicos se fueron reduciendo, caso contrario al del Ángulo de fase el cual fue aumentando proporcionalmente. El anterior suceso demostró que al incrementarse la temperatura de ensayo cambia el comportamiento de la mezcla asfáltica a uno más viscoso.
- Se puede apreciar que la frecuencia tiene un mayor efecto sobre el ángulo de fase a bajas temperaturas en cada una de las mezclas diseñadas, pues para 4 °C se distingue un cambio abrupto en la pendiente de las curvas a medida que se incrementa la frecuencia de ensayo.

Analizado lo anterior se procedió a construir las cuatro Curvas Maestras de Módulo Dinámico y Ángulo de fase para las mezclas asfálticas diseñadas. Estas se muestran de manera conjunta en la Figura 4-29 y Figura 4-30. Cabe aclarar que las gráficas que se presentan corresponden a una temperatura de referencia de 20 °C.

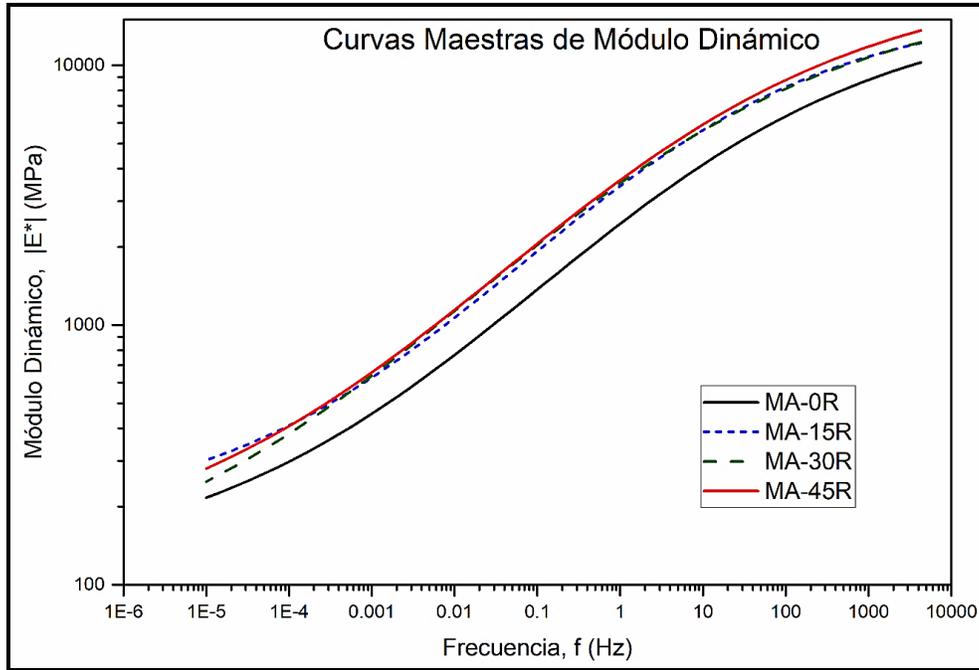


Figura 4-29. Curvas maestras de Módulo Dinámico para las cuatro mezclas asfálticas diseñadas, con una temperatura de referencia de 20°C.

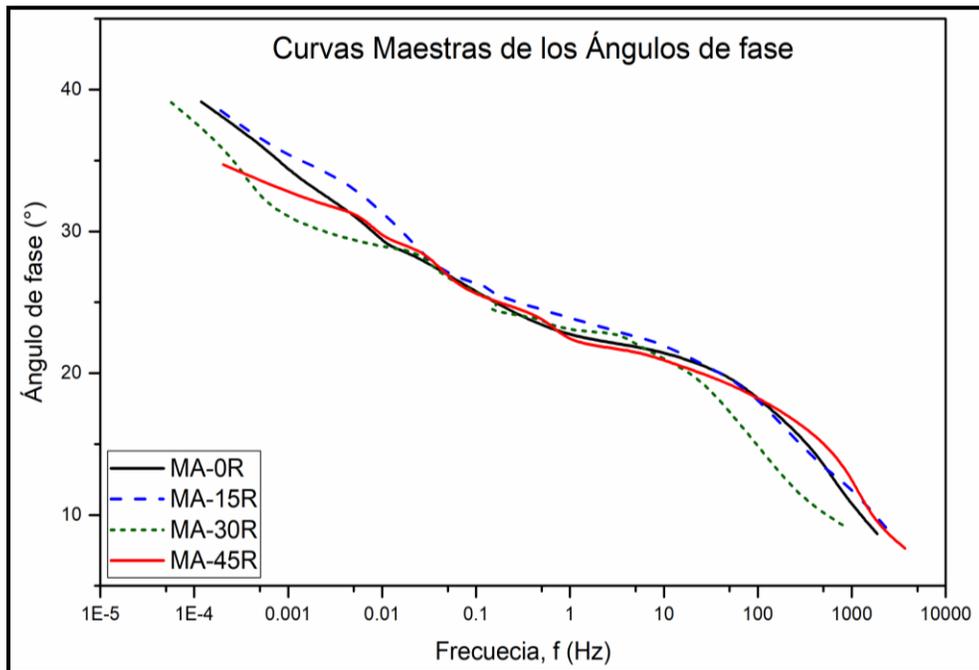


Figura 4-30. Curvas maestras del Ángulo de fase para las cuatro mezclas asfálticas diseñadas, con una temperatura de referencia de 20°C.

De la Figura 4-29 y Figura 4-30, se puede apreciar que para velocidades de aplicación de carga bajas (frecuencias bajas) el valor del Módulo Dinámico es reducido y los Ángulos de fase tienden a elevarse, dando a entender que en zonas donde el tránsito de vehículos se realiza a velocidades muy bajas, como en avenidas muy congestionadas, en zonas de estacionamientos o en zonas de casetas de peaje, se observará una reducción en la resistencia mecánica. Lo anterior es debido a que el asfalto es un material sensible a la temperatura y al tiempo de aplicación de carga. Por el contrario, las altas velocidades (tiempos cortos de aplicación de carga) no afectan la respuesta mecánica de la mezcla asfáltica. Además, es posible apreciar que cualquiera de las mezclas asfálticas que contienen RAP superan el comportamiento de la mezcla de referencia, al ofrecer valores mayores en cuanto a Módulo Dinámico (y Ángulos de fase reducidos). Esto puede deberse a que el RAP le aporta mayor rigidez a la mezcla asfáltica y que el aditivo rejuvenecedor ayudó a potencializar al asfalto envejecido del RAP ya que, éstas mezclas presentaron valores superiores de Módulo Dinámico para cualquier combinación de frecuencia de carga y temperatura de ensayo. También es posible observar que las tres mezclas recicladas poseen valores muy similares, aunque la forma de la curva tiende a variar ligeramente, en este contexto, es posible apreciar que para frecuencias muy bajas (menores a  $1 \text{ E-4 Hz}$ ) la mejor mezcla sería la de 15% de RAP; para frecuencias bajas a intermedias ( $1 \text{ E-4}$  a  $10.0 \text{ Hz}$ ) las mezclas con 30% y 45% de RAP se empalman y superan a la mezcla con 15% de RAP; y para frecuencias muy altas (más de  $10.0 \text{ Hz}$ ) la mezcla que exhibe mayores Módulos es la mezcla con 45% de RAP, mientras que las otras dos mezclas aparentemente se empalman, lo que quiere decir que muestran valores similares en cuanto a Módulo Dinámico se refiere.

En resumen, las tres mezclas recicladas tienen comportamientos mecánicos equiparables, con lo cual, podría pensarse que los aglutinantes asfálticos combinados (asfalto de aporte y asfalto de RAP) alcanzaron un Grado de Desempeño (PG) muy similar, aunque pareciera que son distintos al de la mezcla de referencia. De entre las mezclas asfálticas recicladas, la más sobresaliente fue la mezcla con 45% de RAP, al presentar mayor comportamiento del tipo elástico

tanto para temperaturas altas (frecuencias bajas), como para temperaturas bajas (frecuencias altas). No obstante, todas las mezclas con RAP exhibieron mejor comportamiento que la mezcla de referencia, posiblemente, como se explicó con anterioridad, a la rigidez que aporta el aglutinante envejecido que proviene del RAP. Esta idea nos hace pensar que en los asfaltos de aporte para las mezclas recicladas se presentó un mezclado parcial entre aglutinantes, en el cual se resaltaron las características del aglutinante envejecido. De todos modos, todas las mezclas aquí diseñadas, excepto la mezcla de referencia, presentan valores satisfactorios en estos ensayos dinámicos para ser consideradas “de Alto Desempeño”.

## 5. CONCLUSIONES

Durante la realización de la presente investigación, se ha recopilado información valiosa en torno al recuperado de pavimento asfáltico (RAP) y su uso en mezclas asfálticas que, junto con el trabajo experimental, ha servido para formular las siguientes conclusiones:

- El RAP es una alternativa de material de construcción de carreteras que, sin duda alguna, representa ventajas desde el punto de vista económico y ambiental. Por cuanto a lo económico, el manejo de RAP reduce los costos de extracción y refinamiento de agregados y aglutinantes asfálticos, asociados a las actividades de reconstrucción de pavimentos asfálticos. Desde el punto de vista ambiental, el reciclado a base de RAP reduce el consumo de energía y las emisiones de gases contaminantes emanadas de la producción de mezclas nuevas, asimismo, reduce los problemas de disposición de desechos. Cada día se le está dando más importancia a las prácticas que buscan resolver los problemas de sustentabilidad, sin embargo, esta investigación no solo se limitó a promover el uso del RAP en las mezclas asfálticas, sino que pretende potencializarlas al máximo, buscando siempre el concepto de alto desempeño, con la finalidad de lograr alto estándares de calidad y mayor vida útil.
- La Revisión de la Literatura aporta el conocimiento de partida para el manejo, el diseño, y el análisis de las mezclas asfálticas recicladas en caliente, recalcando que un completo entendimiento de estas actividades permitirá saber cómo y cuándo reciclar, ello con la finalidad de devolverle la vida a los pavimentos asfálticos deteriorados, y posibilitarlos así para ofrecer otro periodo de servicio. La literatura indica que, conforme se incrementa el contenido de RAP en una mezcla reciclada, ésta es menos susceptible al daño inducido por la humedad; presentando una mayor resistencia a la deformación permanente, al tiempo que tiene mejor respuesta mecánica ante esfuerzos repetidos (Módulo), lo cual se deriva de la relativamente alta rigidez del aglutinante asfáltico envejecido del RAP. Sin embargo, dichas mezclas tienen problemas ante el fenómeno de fatiga, pues la alta rigidez de los

aglutinantes se manifiesta como falta de flexibilidad, lo que disminuye los ciclos de carga que pueden resistir antes de fallar, aunque las investigaciones apuntan a que ese riesgo se mitiga con la inclusión de aditivos rejuvenecedores o asfaltos suaves.

- La metodología empleada en esta investigación comprobó ser adecuada para los objetivos inicialmente planteados, es decir, utilizar la guía de diseño: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 “Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño”, que originalmente se formuló para mezclas vírgenes (nuevas), la cual, resultó ser una buena pauta para el diseño de las mezclas asfálticas recicladas en caliente. La metodología denominada “Polígono de vacíos”, empleada para la selección del contenido de asfalto inicial en las mezclas con RAP, reveló ser un apoyo sustancial para reducir la cantidad requerida de ensayos y trabajo de laboratorio. El alcance de la metodología de esta investigación hace referencia exclusivamente a las mezclas asfálticas de granulometría densa recicladas en caliente; sin embargo, eso no quiere decir que no se pueda utilizar para mezclas de granulometría abierta, semi-abierta o SMA (Stone Mastic Asphalt), o para mezclas en tibio o frías, para lo cual sería necesario otro trabajo de investigación similar al presente, ya que existe evidencia que el material reciclado ha sido satisfactoriamente utilizado en otros tipos de mezcla asfáltica distinta de la graduación densa. Por otro lado, se debe tener claro que las mezclas aquí diseñadas, tienen su aplicabilidad como capas estructurales, donde provean soporte y resistencia ante los efectos del tráfico, y no como capas de rodadura.
- Los resultados de caracterización de los materiales nos indican que el RAP posee más concentración de asfalto en su fracción más fina (aquella que pasa la malla de 4.75 mm) reportándose un valor de 6.8%, mientras que la fracción gruesa (mayor a 4.75mm) de este mismo, reportó un contenido del 3.4%. En el análisis reológico del aglutinante del RAP, se encontró que su clasificación por Grados de Desempeño debe ser PG 106-10, lo cual, comparado contra un asfalto virgen convencional, que por lo general se

clasifica como PG 64-22, nos indica que el aglutinante de RAP está excesivamente envejecido. Esto puede deberse mayormente a que las condiciones climáticas y de tránsito, así como el periodo de servicio de ese concreto asfáltico, activaron los mecanismos de envejecimiento del asfalto, tales como la oxidación, la volatilización, polimerización, entre otros fenómenos de deterioro. Esta información fue útil para buscar las medidas de remediación para las mezclas recicladas. Los aglutinantes asfálticos de diseño fueron establecidos como PG 76-16 para la mezcla de referencia, PG 70-22 para la mezcla con 15% de RAP, PG 58-22 para la mezcla con 30% de RAP, y PG 46-22 para la mezcla con 45 % de RAP. Resulta evidente que una mayor participación de RAP en las mezclas exigió el uso de asfaltos de aporte cada vez más suaves (menor grado de desempeño en alta temperatura), ello con la intención de reducir la rigidez de los aglutinantes endurecidos provenientes del RAP, buscando el equilibrio entre ambos asfaltos.

- Conforme se incorporó más RAP en las mezclas, el contenido de asfalto óptimo necesario para cumplir con las propiedades volumétricas también disminuyó, siendo de 6.7% para la mezcla de referencia, 5.1% para la mezcla con 15% de RAP, 4.0% para la mezcla con 30% de RAP y 3.1% para la mezcla con 45% de RAP. Lo anterior se puede manifestar como ahorros del orden de 24%, 40%, y 57% respectivamente, en cuanto al consumo de asfalto. No obstante, esto debe balancearse con los costos del aditivo rejuvenecedor, el cual, conforme incrementó el contenido de RAP en la mezcla, también se requirieron mayores dosis de aditivo.
- La susceptibilidad al daño inducido por la humedad es ligeramente menor en las mezclas recicladas respecto al daño inducido en la mezcla de referencia. Por otro lado, durante la ejecución de los ensayos se observó que la falla en las probetas se debió al desprendimiento de la mezcla, y no a la rotura de los agregados. Por lo tanto, y a manera de deducción, se puede inferir que las mezclas recicladas pueden llegar a exhibir un alto desempeño (valor TSR > 80%), incluso con valores superiores a la mezcla de referencia. Al respecto,

vale la pena aclarar que el procedimiento completo contempla un acondicionamiento de los especímenes por congelamiento, sin embargo, dicho proceso puede ser descartado si las partes interesadas así lo acuerdan. Para el caso de esta investigación se descartó, debido a que las condiciones climáticas del tramo carretero propuesto como ejemplo, no reporta temperaturas extremas que pudieran causar congelamiento de agua en el interior de la carpeta asfáltica.

- En el comparativo de comportamiento ante la deformación permanente de las mezclas asfálticas analizadas, fue posible observar que siempre se cumple la especificación, es decir, la profundidad de rodera en la rueda cargada de Hamburgo es menor a los 10 mm. No obstante, se debe destacar que la mezcla con 45% de RAP, es la que presentó la menor profundidad de rodera. Se observó que la mezcla con 30% de RAP mostró un desarrollo en la profundidad de rodera similar al que presentó la mezcla de referencia. La mezcla que más ahuellamiento registró fue la mezcla con 15% de RAP, siendo esta la que aparentemente es más débil de todas. Al respecto, es posible señalar que la heterogeneidad del RAP es la causante de las diferencias de comportamiento entre una mezcla y otra, pero se puede concluir que una mayor proporción de RAP, tiende a disminuir la deformación permanente en las mezclas asfálticas, lo cual, a su vez, se puede atribuir a la mayor rigidez del aglutinante asfáltico de esta mezcla.
- En cuanto a los ensayos dinámicos para medir la respuesta esfuerzo-deformación, se reportó que sí existe una mejoría en las mezclas asfálticas cuando se incorpora RAP, pues las curvas maestras de módulo dinámico para las mezclas recicladas indican mayores valores, siendo la mezcla con 45% de RAP la que más sobresale. Por su parte las mezclas con 15% y 30% presentan tendencias muy parecidas, lo cual hace que las curvas se visualicen como si estuvieran empalmadas. Con base en los resultados se apreció que existe una mejora en módulos dinámicos del orden de 30 a 40% cuando se incorpora RAP. Los ángulos de fase encontrados, sugieren que las mezclas recicladas están presentando comportamientos elásticos

deseables. En un diseño de pavimentos, en el cual se establezca la frecuencia y la temperatura de diseño, por ejemplo, 10 Hz a 20°C, se tendría la mezcla de referencia exhibiendo un módulo elástico de 4300 MPa, las mezclas con 15% y 30% estarán presentando un módulo de 5500 MPa y, por último, la mezcla con 45% de RAP se desempeñará mejor al ofrecer un módulo de 6000 MPa. Con esta información, se podría reducir el espesor de la capa asfáltica al utilizar una mezcla más competente, que en este caso son las mezclas con RAP.

- Parte de la mejora de las características de desempeño de las mezclas recicladas se debe a la inclusión de aditivo rejuvenecedor, ya que éste le devolvió al asfalto envejecido de RAP, parte de sus características de flexibilidad como se observa en los resultados de ángulo de fase, sin comprometer la rigidez de la mezcla, como es posible apreciar con el módulo dinámico, deformación permanente y susceptibilidad a la humedad. Sin embargo, la razón por la que en la mayor parte de las pruebas las mezclas recicladas se comportan mejor que la mezcla de referencia, puede ser debido a la alta rigidez proporcionada por el RAP, con lo que se puede deducir, que el grado de mezclado entre el rejuvenecedor y el asfalto envejecido no se logró por completo, resaltando las propiedades de este último. Lo anterior hace necesario que posibles trabajos futuros trabajen este tipo de mezclas, incluyendo pruebas de energía de fractura y resistencia a la fatiga, los cuales pueden ampliar el panorama y darnos una mayor idea del desempeño de estos productos.
- En conclusión, las mezclas con RAP en este trabajo alcanzaron mejor comportamiento que la mezcla de referencia, es decir, son de alto desempeño, con lo cual se confirma la hipótesis planteada en este tema de investigación.

Posibles trabajos futuros:

- Establecer una metodología de diseño para mezclas asfálticas recicladas con las siguientes variantes:
  - Granulometría semi-abierta, SMA u otra con adecuado esqueleto mineral.
  - Mezclas en tibio (WMA).
  - Uso de otros subproductos reciclados como el RAS (Recycled Asphalt Shingles)
- Incluir como parámetros de desempeño a las pruebas de Resistencia a la Fatiga y ensayos de Energía de Fractura y propagación de grietas.
- Ampliar el rango de uso de RAP, y el uso de diferentes aditivos rejuvenecedores.

## 6. REFERENCIAS

Al-Qadi, Imad L., Mostafa Elseifi, and Samuel H. Carpenter  
2007 Reclaimed Asphalt Pavement—a Literature Review. FHWA-ICT-07-001.  
<https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/46007>, accessed October 1, 2016.

Asi, Ibrahim M.  
2007 Performance Evaluation of SUPERPAVE and Marshall Asphalt Mix Designs to Suite Jordan Climatic and Traffic Conditions. *Construction and Building Materials* 21(8): 1732–1740.

Aurangzeb, Qazi, Imad L. Al-Qadi, Hasan Ozer, and Rebekah Yang  
2014 Hybrid Life Cycle Assessment for Asphalt Mixtures with High RAP Content. *Resources, Conservation and Recycling* 83: 77–86.

Biedermann, Andreas  
2013 Asphalt Recycling Possibilities on the Asphalt Mixing Plant, Ammann-Group.

Boyacá, Patino, Neidy Betssey, Oscar Javier Reyes-Ortiz, and Javier Fernando Camacho-Taüta  
2015 Comportamiento a Fatiga de Mezclas Asfálticas Colombianas Con Adición de Pavimento Reciclado Al 100%. *Tecnura* 19(43): 74–83.

Celauro, Clara, Celauro Bernardo, and Boscaino Gabriele  
2010 Production of Innovative, Recycled and High-Performance Asphalt for Road Pavements. *Resources, Conservation and Recycling* 54(6): 337–347.

Coffey, Sean, Eric DuBois, Yusuf Mehta, Aaron Nolan, and Caitlin Purdy  
2013 Determining the Impact of Degree of Blending and Quality of Reclaimed Asphalt Pavement on Predicted Pavement Performance Using Pavement ME Design. *Construction and Building Materials* 48: 473–478.

Cooper, Stephen J.  
2011 Asphalt Pavement Recycling with RAP. *In* P. 47. Portland, Oregon: Federal Highway Administration.

Copeland, Audrey  
2011 Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. FHWA-HRT-11-021. McLean Virginia: Federal Highway Administration.  
<https://trid.trb.org/view.aspx?id=1104401>, accessed October 1, 2016.

Elkashef, Mohamed, and R. Christopher Williams  
2017 Improving Fatigue and Low Temperature Performance of 100% RAP Mixtures Using a Soybean-Derived Rejuvenator. *Construction and Building Materials* 151: 345–352.

Garnica, Paul, Horacio Delgado, José Antonio Gómez, Sergio Alonso, and Humberto Alonso Alarcón  
2004 Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Publicación Técnica, 246. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.

Garnica, Paul, Horacio Delgado, and Carlos Daniel Sandoval  
2005 Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. Publicación Técnica, 271. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte. <https://ddd.uab.cat/record/5046>, accessed February 24, 2017.

Garnica, Paul, Mayra Flores, José Antonio Gómez, and Horacio Delgado  
2005 Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas. Publicación Técnica, 267. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.

Ghabchi, Rouzbeh, Manik Barman, Dharamveer Singh, Musharraf Zaman, and Muhammad Ali Mubarak  
2016 Comparison of Laboratory Performance of Asphalt Mixes Containing Different Proportions of RAS and RAP. *Construction and Building Materials* 124: 343–351.

Greg Schieber, P. E.  
2012 Evaluation of Superpave Mixtures with High RAP Content. <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412121.168>, accessed October 1, 2016.

Hajj, Elie Y., Peter E. Sebaaly, and Pratheepan Kandiah  
2009 Evaluation of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Airfield HMA Pavements. *Journal of Transportation Engineering* 136(3): 181–189.

Han, Jie, Subhash C. Thakur, Oswald Chong, and Robert L. Parsons  
2011 Laboratory Evaluation of Characteristics of Recycled Asphalt Pavement in Kansas. Final Report, K-TRAN:KU-09-2. Kansas Department of Transportation.

Heneash, Usama  
2013 Effect of the Repeated Recycling on Hot Mix Asphalt Properties. University of Nottingham. <http://eprints.nottingham.ac.uk/13283/>, accessed October 4, 2016.

Huang, Baoshan, Xiang Shu, and Dragon Vukosavljevic  
2011 Laboratory Investigation of Cracking Resistance of Hot-Mix Asphalt Field Mixtures Containing Screened Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(11): 1535–1543.

Huang, Yang H.  
2004 Pavement Analysis and Design. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall.

Izaks, R., V. Haritonovs, I. Klasa, and M. Zaumanis  
2015 Hot Mix Asphalt with High RAP Content. *Procedia Engineering* 114: 676–684.

Jitsangiam, Peerapong, Prinya Chindapasirt, and Hamid Nikraz  
2013 An Evaluation of the Suitability of SUPERPAVE and Marshall Asphalt Mix Designs as They Relate to Thailand's Climatic Conditions. *Construction and Building Materials* 40: 961–970.

Kaur, Karanjeet, Aravind Krishna Swamy, and Animesh Das  
2013 Constituent Proportioning in Recycled Asphalt Mix with Multiple RAP Sources. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104: 21–28.

Liphardt, Adam, Piotr Radziszewski, and Jan Król  
2015 Binder Blending Estimation Method in Hot Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt. *Procedia Engineering* 111: 502–509.

Marín, Carlos Rodolfo, and Guillermo Alfonso Thenoux  
2014 Validation of the Polygon-Of-Voids Tool for Asphalt Mixtures with RAP. *Revista de La Construcción - Pontificia Universidad Católica de Chile*, April: 56–63.

McGennis, R.B., R. Michael Anderson, T.W. Kennedy, and M. Solaimanian  
1994 Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis. Final Report, FHWA-SA-95-003. Lexington, Ky: Asphalt Institute.

Miró, Rodrigo, Gonzalo Valdés, Adriana Martínez, Pilar Segura, and Celestino Rodríguez  
2011 Evaluation of High Modulus Mixture Behaviour with High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Percentages for Sustainable Road Construction. *Construction and Building Materials* 25(10): 3854–3862.

Newcomb, David E., E. Ray Brown, and Jon A. Epps  
2007 Designing HMA Mixtures with High RAP Content. Final Report, QIP 124. Quality Improvement Series. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association.

Noferini, Luca, Andrea Simone, Cesare Sangiorgi, and Francesco Mazzotta  
2017 Investigation on Performances of Asphalt Mixtures Made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of Interaction between Virgin and RAP Bitumen. *International Journal of Pavement Research and Technology* 10(4): 322–332.

Pradyumna, T.Anil, Abhishek Mittal, and P.K. Jain  
2013 Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104: 1149–1157.

Rad,

Farhad

Yousefi

2013 Estimating Blending Level of Fresh and RAP Binders in Recycled Hot Mix Asphalt. University of Wisconsin Madison. [http://www.minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/66319/MS\\_Thesis\\_YousefiRadFarhad.pdf?sequence=3](http://www.minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/66319/MS_Thesis_YousefiRadFarhad.pdf?sequence=3), accessed October 5, 2016.

Reyes-Ortiz, O., E. Berardinelli, A.E. Alvarez, J.S. Carvajal-Muñoz, and L.G. Fuentes  
2012 Evaluation of Hot Mix Asphalt Mixtures with Replacement of Aggregates by Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53: 379–388.

Riccardi, C., Ana Jiménez del Barco Carrión, Davide Lo Presti, et al.  
2017 A New Procedure to Determine the Rheological Properties of RAP Binder and Corresponding Bituminous Blends. *Construction and Building Materials* 154: 361–372.

Rico, A., and H. Del Castillo  
2005 *La Ingeniería de suelos en las vías terrestres Vol. 2 Carreteras, ferrocarriles y aeropuertos*, vol.2. D.F., México: LIMUSA. Noriega Editores.

Romera, Ramón, Anton Santamaría, Juan José Peña, et al.  
2006 Rheological Aspects of the Rejuvenation of Aged Bitumen. *Rheologica Acta* 45(4): 474–478.

Serratos, Rubén  
2014 *Influencia del Polvo Rellenador en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas superpave*. Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro.

Shen, Junan, Serji Amirkhanian, and Jennifer Aune Miller  
2007 Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(5): 376–384.

Shirodkar, Prashant, Yusuf Mehta, Aaron Nolan, et al.  
2011 A Study to Determine the Degree of Partial Blending of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Binder for High RAP Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials* 25(1): 150–155.

Silva, Hugo M.R.D., Joel R.M. Oliveira, and Carlos M.G. Jesus  
2012 Are Totally Recycled Hot Mix Asphalts a Sustainable Alternative for Road Paving? *Resources, Conservation and Recycling* 60: 38–48.

Valdés, Gonzalo, Félix Pérez-Jiménez, Rodrigo Miró, Adriana Martínez, and Ramón Botella  
2011 Experimental Study of Recycled Asphalt Mixtures with High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Construction and Building Materials* 25(3): 1289–1297.

Valdés-Vidal, G., A. Calabi-Floody, R. Miró-Recasens, and J. Norambuena-Contreras  
2015 Mechanical Behavior of Asphalt Mixtures with Different Aggregate Type. *Construction and Building Materials* 101: 474–481.

Wang, Hainian, Peiwen Hao, and Liang Xue  
2011 Laboratory Evaluation of Microwave Heating Method for Hot in-Place Recycling. *Journal of Testing and Evaluation* 39(6): 1–8.

West, Randy C.  
2015 Best Practices for RAP and RAS Management. Final Report, QIP 129. Quality Improvement Series. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association.

Yang, Rebekah, Seunggu Kang, Hasan Ozer, and Imad L. Al-Qadi  
2015 Environmental and Economic Analyses of Recycled Asphalt Concrete Mixtures Based on Material Production and Potential Performance. *Resources, Conservation and Recycling* 104: 141–151.

Young, Tarry  
1996 Recycling Hot-Mix Asphalt Pavements. Final Report, IS 123s. Information Series. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association.

Yu, Xiaokong, Martins Zaumanis, Salomé dos Santos, and Lily D. Poulikakos  
2014 Rheological, Microscopic, and Chemical Characterization of the Rejuvenating Effect on Asphalt Binders. *Fuel* 135: 162–171.

Zárate Aquino, M.  
2011 Diseño de pavimentos flexibles, primera parte, vol.1. Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.

Zaumanis, Martins, Rajib B. Mallick, and Robert Frank  
2014a Determining Optimum Rejuvenator Dose for Asphalt Recycling Based on Superpave Performance Grade Specifications. *Construction and Building Materials* 69: 159–166.

2014b 100% Recycled Hot Mix Asphalt: A Review and Analysis. *Resources, Conservation and Recycling* 92: 230–245.

2015 Evaluation of Different Recycling Agents for Restoring Aged Asphalt Binder and Performance of 100 % Recycled Asphalt. *Materials and Structures* 48(8): 2475–2488.

Zaumanis, Martins, Rajib Mallick, and Robert Frank  
2013 Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2370: 17–25.



## 7. APÉNDICE

En esta sección se presenta parte de la información que se obtuvo a través del trabajo experimental que no fue presentada en el capítulo de metodología o en el de resultados, con la finalidad de que puedan ayudar a otros investigadores a realizar otro tipo de análisis o para aclarar dudas en cuanto a la realización de alguna parte del trabajo. Otra función más de esta sección es aclarar cómo realizaron algunos cálculos que se mencionan en el capítulo de resultados.

### 7.1 Características de los materiales.

A continuación, se presentan los registros de las pruebas ejecutadas en los agregados, así como su correspondiente tratamiento estadístico.

**Tabla 7-1. Registro de prueba: Granulometría de agregado grueso.**

Malla	Prueba No.1		Prueba No.2		Media de las Pruebas	Desviación Estándar
	Retenido parcial (g)	%Que pasa	Retenido parcial (g)	%Que pasa		
3/4"	0	100.0%	0	100.0%	100.0%	<b>0.00</b>
1/2"	198	96.1%	209	96.1%	96.1%	<b>0.06</b>
3/8"	2007	57.4%	2064	57.2%	57.3%	<b>0.15</b>
No. 4	2267	13.6%	2335	13.2%	13.4%	<b>0.28</b>
Pasa No. 4	701		698			
SUMA	5182		5313			
ERROR:	<b>9</b>		<b>7</b>			
Error permisible:	<b>15.5</b>		<b>15.9</b>			
No. 8	667.9	0.7%	632.8	0.6%	0.6%	<b>0.03</b>
No. 16	16.1	0.3%	15.6	0.3%	0.3%	<b>0.03</b>
No. 30	1.8	0.3%	1.1	0.3%	0.3%	<b>0.01</b>
No. 50	0.9	0.3%	1.3	0.3%	0.3%	<b>0.01</b>
No.100	0.9	0.3%	1.1	0.2%	0.2%	<b>0.01</b>
No. 200	0	0.2%	0	0.2%	0.2%	<b>0.00</b>
Pasa No.200	12.5		11.9			
SUMA:	701		665.5			
ERROR:	<b>0.9</b>		<b>1.7</b>			
Error permisible:	<b>2.1</b>		<b>2.0</b>			

**Tabla 7-2. Registro de prueba: Granulometría de agregado fino.**

Malla	Prueba No.1		Prueba No.2		Media de las Pruebas	Desviación Estándar
	Retenido parcial (g)	%Que pasa	Retenido parcial (g)	%Que pasa		
No. 4	0	100.0%	0	100.0%	100.0%	<b>0.00</b>
No. 8	80.1	84.7%	92.4	84.9%	84.8%	<b>0.14</b>
No. 16	222	42.5%	258.1	42.6%	42.5%	<b>0.13</b>
No. 30	66.4	29.8%	77.7	29.9%	29.9%	<b>0.06</b>
No. 50	36.9	22.8%	42.5	23.0%	22.9%	<b>0.10</b>
No.100	28.3	17.4%	33.6	17.5%	17.4%	<b>0.03</b>
No. 200	23.6	12.9%	27.5	13.0%	12.9%	<b>0.05</b>
Pasa No.200	67.8		79.2			
SUMA	526.2		612.7			
ERROR	<b>1.1</b>		<b>1.7</b>			
Error permisible	<b>1.6</b>		<b>1.8</b>			

**Tabla 7-3. Registro de prueba: Desgaste de Los Ángeles de agregado grueso.**

Prueba No.	1	2
Granulometría Tipo	C	C
Carga Abrasiva	3329	3329
No. Esferas	8	8
Masa inicial de la muestra, g [1]	4990	5004
Masa final de la muestra, g [2]	4286	4334
%Desgaste= $\left(\frac{[1]-[2]}{1}\right) * 100$	14	13
Media	14	
Desviación Estándar	<b>0.5</b>	
Coefficiente de Variación	4%	

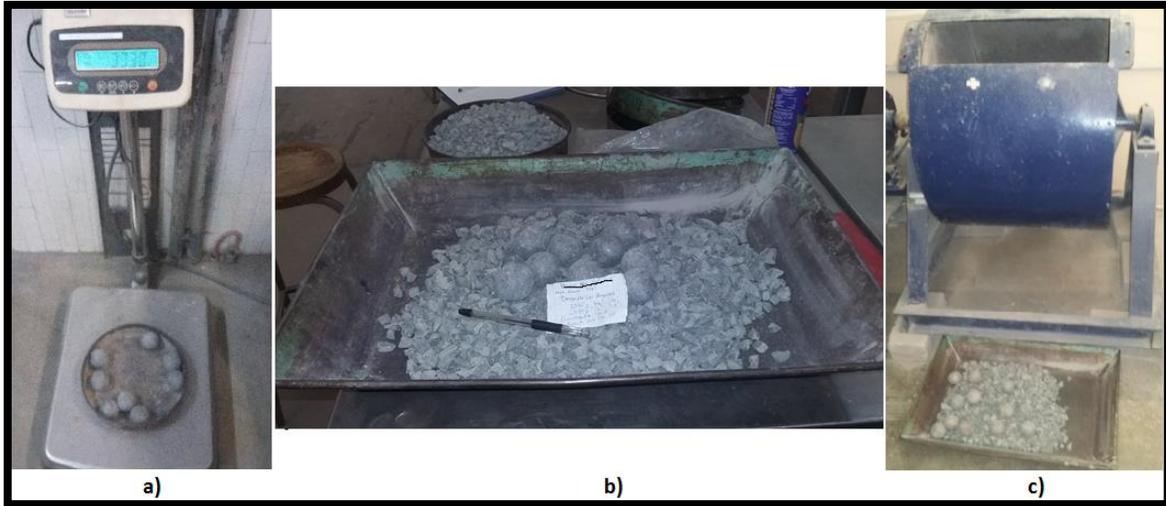


Figura 7-1. Realización del ensayo Desgaste de Los Ángeles.

Tabla 7-4. Registro de prueba: Desgaste Micro-Deval de agregado grueso.

Prueba No.	1	2
Tamaño máx. nominal del agregado	12.5 mm (½")	
Graduación utilizada	½" - ¾", ¾" - 1", 1" - No.4	
Masa inicial de la muestra, g [1]	1501.0	1507.0
Masa final de la muestra, g [2]	1297.5	1306.0
%Desgaste= $\left(\frac{[1]-[2]}{1}\right) * 100$	13.6	13.3
Media	13.4	
Desviación Estándar	0.2	
Coefficiente de Variación	1%	

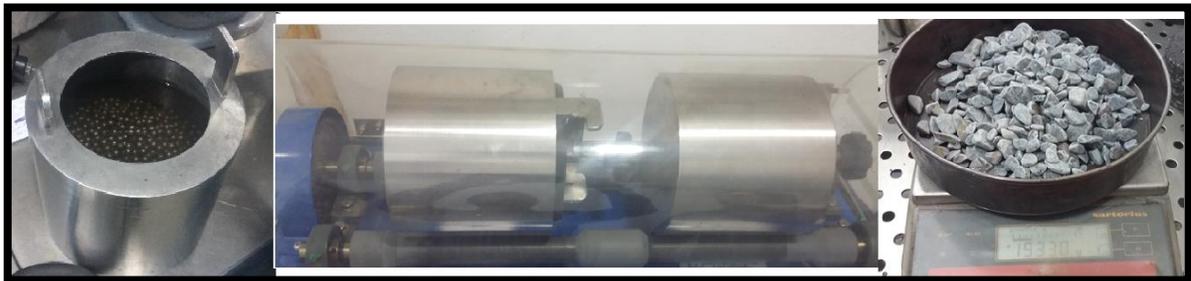


Figura 7-2. Realización del ensayo Desgaste Micro-Deval.

**Tabla 7-5. Registro de prueba: Forma de partículas de agregado grueso.**

Rango de Tamaños	Cantidad de Partículas	Masa de las Partículas (g)	Partículas planas y alargadas		Partículas NO planas ni alargadas		% Partículas planas y alargadas
			Partículas	Masa (g)	Partículas	Masa (g)	
¾" - ½"	55	247.4	0	0	55	274.4	0.0%
½" - ⅜"	100	244.6	1	1.4	99	243.2	0.6%
⅜" - ¼"	139	99.3	6	3.5	133	95.8	3.5%
¼" - No.4	153	44.9	13	3.4	140	41.5	7.6%
<b>SUMA</b>	<b>447</b>	<b>636.2</b>	<b>20</b>	<b>8.3</b>	<b>427</b>	<b>654.9</b>	

Relación utilizada: 5:1      Part. planas y alargadas =  $(8.3/636.2) * 100$       1.3%



**Figura 7-3. Realización del ensayo Forma de Partícula.**

**Tabla 7-6. Registro de prueba: Caras Fracturadas de agregado grueso.**

Prueba No.	1	2
Masa de muestra de grava de 12.5 mm a No.4	1664.7	1465.2
Masa de partículas con 1 o más caras fracturadas, F1	1664.7	1465.2
Masa de partículas sin caras fracturadas, N1	0	0
Masa de partículas con 2 o más caras fracturadas, F2	1588.3	1401.8
Masa de partículas con menos de 2 caras fracturadas, N2	86.4	63.4
% Partículas con 1 cara Fracturada = $F1/(F1+N1)$	100%	100%
% Partículas con 2 caras Fracturadas = $F2/(F2+N2)$	94.8%	95.7%
Media	95.3%	
Desviación Estándar	0.6%	



Figura 7-4. Realización del ensayo Caras Fracturadas.

Tabla 7-7. Registro de prueba: Gravedad Específica y Absorción de agregado grueso.

Espécimen No.	1	2		
[1] Identificación del contenedor	x	y		
[2] Masa del contenedor	428	443.5		
[3] Masa al aire del contenedor + material en SSS	5543.5	5571.5		
[4] Masa aparente sumergida del material	3287.5	3257		
[5] Masa al aire del contenedor + material seco	5497.5	5528.5	Promedio	Desviación Estándar <sup>1</sup>
[6] Densidad secada al horno = $([5]-[2])/([3]-[2]-[4])$	2.773	2.718	2.746	<b>0.039</b>
[7] Densidad sat. Sup. seca = $([3]-[2])/([3]-[2]-[4])$	2.798	2.741	2.770	<b>0.041</b>
[8] Densidad aparente = $([5]-[2])/([5]-[2]-[4])$	2.845	2.782	2.813	<b>0.045</b>
[9] Absorción = $([3] - [5]) / ([5] - [2]) * 100$	0.9	0.8	0.9	<b>0.044</b>

<sup>1</sup> Estos valores exceden a los recomendados en el método de prueba.



Figura 7-5. Realización de prueba: Gravedad Específica y Absorción de agregado grueso.

**Tabla 7-8.Registro de prueba: Equivalente de Arena de agregado fino.**

Prueba No.	1	2	3
Hora inicial de reposo 1	14:46	14:49	14:54
Hora final de reposo 1	14:56	14:59	15:04
Agitado mecánico 45 segundos			
Hora inicial de reposo 2	14:57	15:00	15:06
Hora final de reposo 2	15:17	15:20	15:26
Lectura de arcilla [1]	4.9	5.1	5.3
Lectura de arcilla [2]	3.3	3.2	3.3
Eq. de Arena = $([2] / [1]) * 100$	67.3	62.7	62.3
Media		64	
Desviación Estándar		2.8	



**Figura 7-6. Realización de prueba: Equivalente de Arena de agregado fino.**

**Tabla 7-9. Registro de prueba: Gravedad Específica y Absorción de agregado fino.**

Espécimen No.	1	2		
[S] Masa del espécimen en SSS (g)	500.8	501.2		
[C] Masa del espécimen + picnómetro + agua (g)	945.6	946.2		
[B] Masa del picnómetro + agua (g)	630.2	630.2		
[A] Masa del espécimen seco (g)	490.9	491.4		
Temperatura de prueba (°C)	23	23	Promedio	Desviación Estándar
Absorción = $(([S] - [A]) / [A]) * 100$	2.02%	1.99%	2%	<b>0.016</b>
Densidad aparente = $[A] / ([B] + [A] - [C])$	2.797	2.802	2.799	<b>0.003</b>
Densidad seca al horno = $[A] / ([B] + [S] - [C])$	2.648	2.653	2.651	<b>0.004</b>
Densidad Sat. Sup. Seca = $[S] / ([B] + [S] - [C])$	2.701	2.706	2.704	<b>0.004</b>



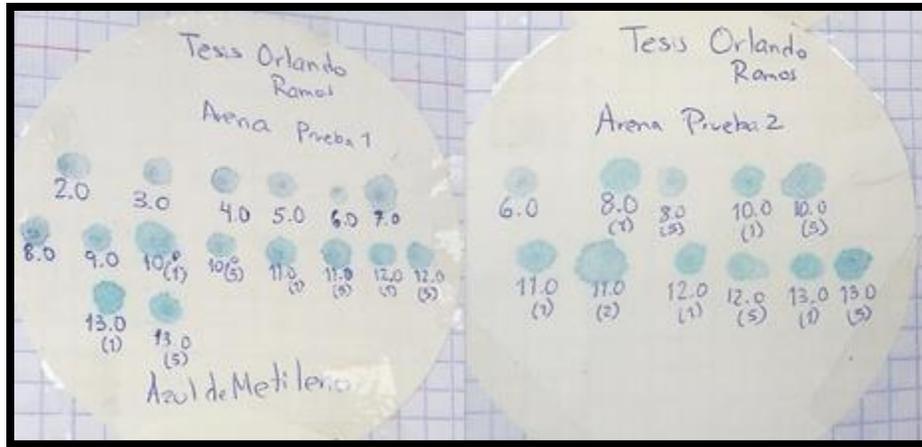
Figura 7-7. Realización de prueba: Gravedad Específica y Absorción de agregado fino.

Tabla 7-10. Registro de prueba: Angularidad de agregado fino.

Prueba No.	1	2	3
[1] Volumen del cilindro (cm <sup>3</sup> )	100	100	100
[2] Masa del cilindro (g)	252.4	252.4	252.4
[3] Masa del cilindro + material (g)	419.6	419.1	418.5
[4] Masa del material (g) = [3] - [2]	167.2	166.7	166.1
[5] Gravedad Bruta del material	2.651	2.651	2.651
[6] Contenido de vacíos = $\left(\frac{[1] - ([4]/[5])}{[1]}\right) * 100$	36.9	37.1	37.3
Media		37.1	
Desviación Estándar		0.208	



Figura 7-8. Realización de prueba: Angularidad de agregado fino.



**Figura 7-9. Realización de prueba: Azul de metileno.**

En las tablas anteriores aparecen los valores registrados durante la ejecución de las pruebas, además se muestran los promedios y desviaciones estándar, estos últimos para indicar si existe dispersión entre los resultados. Los valores de desviación estándar de las Tablas, pueden compararse contra lo establecido en la sección de Precisión y Sesgo de los Métodos Estándar de Prueba ASTM. Los valores aquí reportados son mostrados en rojo si no se cumple lo que estipula el Método de prueba, indicando que requiere corregirse el proceso de prueba, en cambio, cuando son marcados en azul, será indicio que los procesos se hicieron de una manera controlada y los resultados son confiables.

A continuación, se presentan los registros de las pruebas ejecutadas, así como figuras que ilustran el proceso de prueba, sobre el aglutinante asfáltico.

**Tabla 7-11. Registro de prueba: Pérdida en masa después de envejecimiento en RTFO.**

Prueba No.	1	2	3
[1] Masa del vaso (g)	221.988	214.557	219.419
[2] Masa del vaso + asfalto (g)	257.315	249.786	254.879
[3] Masa del asfalto = [2] - [1] (g)	35.327	35.229	35.46
[4] Masa del vaso + asfalto envejecido (g)	257.193	249.659	254.756
[5] Pérdida en Masa = [2] - [4] (g)	0.122	0.127	0.123
[6] % de Pérdida = $([5]/[3]) \cdot 100$	0.35%	0.36%	0.35%
Media		0.35%	
Desviación Estándar		<b>0.008</b>	



Figura 7-10. Realización de prueba: Pérdida en masa después de envejecimiento en RTFO.

Tabla 7-12. Registro de prueba: Densidad del asfalto.

Prueba No.	1	2
[1] Masa del picnómetro seco (g)	31.761	31.761
[2] Masa del picnómetro + agua (g)	54.395	54.376
[3] Masa del picnómetro + asfalto (g)	50.474	50.641
[4] Masa del picnómetro +asfalto + agua (g)	54.909	54.918
[5] $Densidad = \frac{[3] - [1]}{([2] - [1]) - ([4] - [3])}$	1.0282	1.0296
Media	1.029	
Desviación Estándar	0.0009	

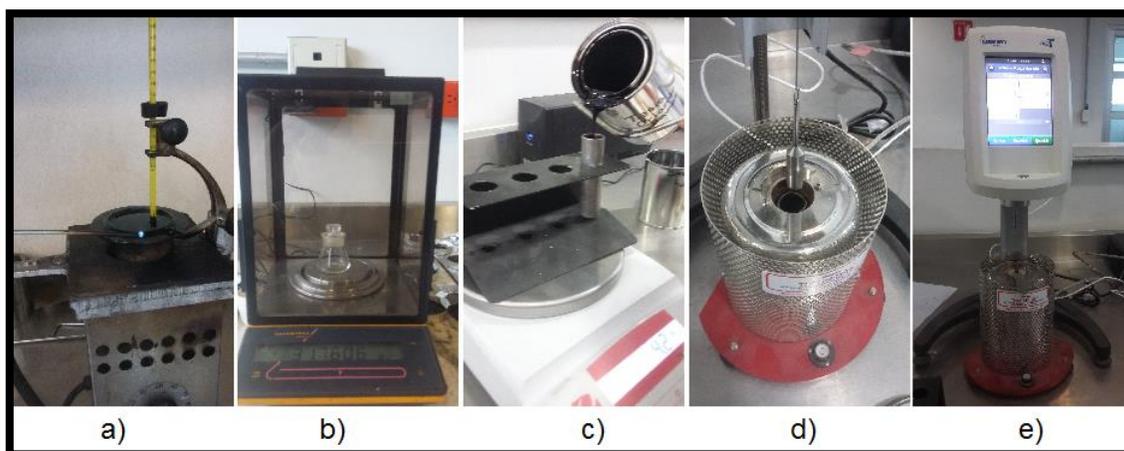


Figura 7-11. Realización de varias pruebas en el asfalto. a) Punto de Inflamación, b) Densidad del asfalto, c) Viscosidad Rotacional, llenado de cápsula, d) Viscosidad Rotacional, colocación de muestra en equipo, e) Viscosidad Rotacional, equipo en funcionamiento.

**Tabla 7-13. Resultados del análisis reológico en el Reómetro de Corte Dinámico del asfalto proveniente del RAP, para estado original y envejecido en RTFO.**

Condición del asfalto de RAP	Prueba No.	Temp. de prueba, °C	F.A. <sup>1</sup> (G*/sen δ), KPa	Temp. de Falla, °C	Temp. prom., °C	F.A. <sup>2</sup> mín. especificado, Kpa
Original	1	88	4.056	102.9	<b>107.5</b>	1.0
		94	2.289			
	2	88	11.28	112.0		
		94	6.148			
Envejecido en RTFO	1	88	58.15	125.0	124.9	2.2
		94	34.18			
	2	88	58.14	124.8		
		94	34.11			

<sup>1</sup> F.A. = Factor de Ahuellamiento.

<sup>2</sup> Según ASTM D6373.

**Tabla 7-14. Resultados del análisis reológico en el Reómetro de Corte Dinámico del asfalto proveniente del RAP, para estado envejecido en RTFO y PAV.**

Condición del asfalto de RAP	Prueba No.	Temp. de prueba, °C	(G*) (sen δ), KPa	Temp. de Falla, °C	Temp. prom., °C	Valor máx. especificado <sup>1</sup> , Kpa
Envejecido en RTFO + PAV	1	40	5044	40.1	39.7	5000.0
		43	3823			
	2	40	5021	39.2		
		43	3363			

<sup>1</sup> Según ASTM D6373.

**Tabla 7-15. Resultados del análisis reológico en el Reómetro de Viga a Flexión (BBR) del asfalto proveniente del RAP.**

Temp. de prueba, °C	PG correspondiente	Módulo de Rigidez "S", MPa	Valor "m"	Especificación para "S", <sup>1</sup> MPa	Especificación para "m" <sup>1</sup>
-12	PG XX-22	278.2	0.27367		
-6	PG XX-16	221.6	0.28399	< 300	> 0.3
<b>0</b>	<b>PG XX-10</b>	<b>75.5</b>	<b>0.34971</b>		

<sup>1</sup> Según ASTM D6373

## 7.2 Selección de granulometrías de diseño.

En esta etapa se muestra cómo se realizó el diseño de la estructura de agregado para cada mezcla asfáltica diseñada, lo cual se hizo tomando en cuenta la siguiente expresión:

$$P = Aa + Bb + Cc + \dots$$

### **Ecuación 7-1. Determinación de mezcla de agregados.**

Dónde:

- P = Porcentaje de material que pasa una cierta malla para la mezcla de A, B, C, ...
- A, B, C, ... = Porcentaje que pasa una cierta malla para cada fuente de agregado.
- a, b, c, ... = Proporciones de los materiales A, B, C, ... a mezclarse

Teniendo en cuenta la Ecuación 7-1, se determinaron los porcentajes de cada fuente de material de una forma empírica (prueba y error) haciendo uso de una hoja de cálculo, como el que se ejemplifica en la Tabla 7-13.

**Tabla 7-16. Cálculos de combinación de agregados para Mezcla de Referencia.**

Material --->		Agregado Grueso		Agregado Fino		RAP Grueso		RAP Fino		Mezcla	Puntos de control <sup>1</sup>	
Dosificación --->		60		40		0		0		100	Tam. Nom. 1/2"	
Malla	Abertura (mm)	% Pasa	% Dosificación	% Pasa	% Dosificación	% Pasa	% Dosificación	% Pasa	% Dosificación	% Pasa	Inf.	Sup.
1 "	25.00	100.0	60.0	100.0	40.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	100	100
3/4"	19.00	100.0	60.0	100.0	40.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	100	100
1/2 "	12.50	96.1	57.7	100.0	40.0	99.3	0.0	100.0	0.0	97.7	90	100
3/8 "	9.50	57.4	34.4	100.0	40.0	77.4	0.0	100.0	0.0	74.4		90
No. 4	4.75	13.6	8.1	100.0	40.0	31.3	0.0	100.0	0.0	48.1		
No. 8	2.36	0.7	0.4	84.7	33.9	23.3	0.0	82.0	0.0	34.3	28	58
No. 16	1.18	0.3	0.2	42.5	17.0	15.5	0.0	50.2	0.0	17.2		
No. 30	0.60	0.3	0.2	29.8	11.9	9.1	0.0	33.6	0.0	12.1		
No. 50	0.30	0.3	0.2	22.8	9.1	6.7	0.0	26.2	0.0	9.3		
No. 100	0.15	0.3	0.2	17.4	7.0	3.9	0.0	17.6	0.0	7.1		
No. 200	0.075	0.2	0.1	12.9	5.2	2.2	0.0	8.2	0.0	5.3	2	10

<sup>1</sup> Según AMAAC (2013).

### 7.3 Diseño volumétrico de mezclas.

El diseño de la mezcla de referencia inició con una propuesta de contenido de asfalto, tomando el procedimiento indicado en AASHTO R35. Tal y como indica el método, se supusieron los siguientes valores:

- Contenido de asfalto en la mezcla ( $P_b$ ) = 5%
- Contenido de agregado en la mezcla ( $P_s$ ) = 95%
- Gravedad específica del asfalto ( $G_b$ ) = 1.029
- Vacíos de aire en la mezcla ( $V_a$ ) = 4%

Tomando en cuenta las Gravedades Específicas combinadas de los agregados, se utilizaron las siguientes ecuaciones para calcular el contenido de asfalto inicial:

$$G_{se_{inicial}} = G_{sb} + 0.8(G_{sa} - G_{sb})$$

**Ecuación 7-2. Gravedad Específica Efectiva de los agregados.**

$$W_{s_{inicial}} = \frac{P_s * (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b}\right) + \left(\frac{P_s}{G_{se_{inicial}}}\right)}$$

**Ecuación 7-3. Peso de los agregados por centímetro cúbico de mezcla.**

$$V_{be_{inicial}} = 0.176 - (0.0675 * \log(T_n))$$

**Ecuación 7-4. Volumen de asfalto efectivo en agregados.  $T_n$ , es el tamaño nominal del agregado (12.5 mm).**

$$V_{ba_{inicial}} = W_{s_{inicial}} * \left( \left( \frac{1}{G_{sb}} \right) - \left( \frac{1}{G_{se_{inicial}}} \right) \right)$$

**Ecuación 7-5. Volumen de asfalto absorbido en agregados.**

$$P_{b_{inicial}} = \frac{G_b * (V_{be_{inicial}} + V_{ba_{inicial}})}{[G_b * (V_{be_{inicial}} + V_{ba_{inicial}})] + W_{s_{inicial}}}$$

**Ecuación 7-6. Contenido de asfalto inicial.**

La Tabla 7-14, muestra los resultados de los parámetros antes mencionados.

**Tabla 7-17. Cálculo del contenido de asfalto inicial.**

Gsb medido	Gsa medido	Gse inicial	Ws inicial	Vbe inicial	Vba inicial	Pb inicial
2.707	2.807	2.787	2.341	0.10195	0.02483	5.3%

Se produjeron 4 especímenes de mezcla asfáltica con este contenido de asfalto: 2 para determinar la Gravedad Teórica Máxima (Gmm) y 2 para obtener la Gravedad Bruta compacta (Gmb), tal y como se ejemplifica en las Tablas 7-15 y 7-16, con lo cual se calcularon algunas propiedades volumétricas mostradas en la Tabla 4-20 del capítulo de Resultados.

**Tabla 7-18. Registro de prueba: Determinación de la Gravedad Teórica Máxima de una mezcla suelta. Ejemplo de cálculo.**

Especimen / Prueba No.	1	2
[1] Masa al aire del contenedor (g)	638.5	638.5
[2] Masa al aire del espécimen (g)	1560.5	1540.5
[3] Masa sumergida del contenedor (g)	39.5	39.5
[4] Masa sumergida del espécimen (g)	984.0	971.0
[5] Gravedad Especifica Teórica Máx. "Gmm" = [2] / ([2] - ([4] - [3]))	2.533	2.530
Media	2.531	
Desviación Estándar	<b>0.0026</b>	

**Tabla 7-19. Registro de prueba: Determinación de la Gravedad Bruta compacta de un espécimen proveniente del Compactador Giratorio. Ejemplo de cálculo.**

Especimen / Prueba No.	1	2
[1] Masa al aire del espécimen (g)	1037.5	1042.5
[2] Masa sumergida del espécimen (g)	609.0	611.5
[3] Masa sat. sup. seca espécimen (g)	1046.5	1052.5
[4] Gravedad Bruta compacta "Gmb" = [1] / ([3] - [2])	2.371	2.364
Media	2.368	
Desviación Estándar	<b>0.0053</b>	

La estimación del contenido de asfalto para cumplir con el parámetro de Vacíos de aire ( $V_a$ ) igual a cuatro por ciento es la siguiente:

**Tabla 7-20. Cálculo de propiedades estimadas.**

Propiedad	Fórmula	Resultado
$Pb_{estimado}$	$Pb_{est} = Pb_{inicial} - (0.4 * (4 - Va))$	6.4%
$VMA_{estimado}$	$VMA_{est} = VAM + (0.2 * (4 - Va))$	16.9%
$VFA_{estimado}$	$VFA_{est} = 100 * \left[ \frac{VMA_{est} - 4}{VMA_{est}} \right]$	76.3%
%Gmm@Nini para $Pb_{estimado}$	$\%Gmm_{est}@Nini = \%Gmm - (4 - Va)$	89.1%
$Pbe_{estimado}$	$Pbe_{est} = Pb_{est} - \left[ (Ps * Gb) * \left( \frac{Gse - Gsb}{Gse * Gsb} \right) \right]$	5.8%
$DP_{estimado}$	$DP_{est} = \frac{P_{200}}{Pbe_{est}}$	0.9

#### 7.4 Pruebas de desempeño de las mezclas.

A continuación, se presentan a manera de ejemplo las hojas de cálculo para los resultados en las pruebas de desempeño:

- Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)
- Módulo Dinámico para construcción de curvas maestras.

**Tabla 7-21. Determinación de la Relación de Resistencias a Tensión TSR**

			<b>Resistencia al daño inducido por Humedad - MEZCLA DE REFERENCIA</b>					
Condición			Acondicionados			No acondicionados / de control		
Identificación del espécimen			TSR1	TSR3	TSR5	TSR2	TSR4	TSR6
Diámetro	D	cm	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16
Espesor	t	cm	6.4	6.1	6.3	6.1	6.3	6.3
Peso en aire	A	g	1094.0	1099.0	1094.0	1086.5	1098.5	1100.0
Peso Sat. Sup. Seco	B	g	1105.5	1104.5	1106.0	1095.0	1109.0	1111.0
Peso sumergido	C	g	631.5	631.5	633.5	627.5	635.5	633.5
Volumen (B-C)	E	cm <sup>3</sup>	474.0	473.0	472.5	467.5	473.5	477.5
Gravedad Específica Bruta (A/E)	Gmb	g/cm <sup>3</sup>	2.308	2.323	2.315	2.324	2.320	2.304
Gravedad Específica teórica máxima	Gmm	g/cm <sup>3</sup>	2.490	2.490	2.490	2.490	2.490	2.490
Vacíos (100*(Gmm-Gmb)/Gmm)	Pa	%	7.3	6.7	7.0	6.7	6.8	7.5
% de Vacíos promedio del subgrupo				7.0			7.0	
Volumen de vacíos (Pa*E/100)	Va	cm <sup>3</sup>	34.6	31.6	33.1	31.2	32.3	35.7
Peso Sat. Sup. Seco, vacío	B''	g	1121.5	1121.5	1117.5	---	---	---
Volumen de agua absorbida (B''-A)	J''	cm <sup>3</sup>	27.5	22.5	23.5	---	---	---
%Saturación (100*J''/Va)	S''	%	79.4	71.1	70.9			
Carga	P	Kg	580	616	576	701	598	590
Resistencia especímenes de control	S <sub>1</sub>	Kg/cm <sup>2</sup>	---	---	---	7.20	5.95	5.87
Resistencia especímenes acondicionados	S <sub>2</sub>	Kg/cm <sup>2</sup>	5.68	6.33	5.73	---	---	---
Promedio de S1		Kg/cm <sup>2</sup>		---			6.34	
Promedio de S2		Kg/cm <sup>2</sup>		5.91			----	
<b>TSR</b>		%					93%	

**Tabla 7-22. Determinación de los parámetros para la construcción de curva maestra de Módulo Dinámico.**

Frec.	Temp.	Prob 1		Prob 2		Prom		log E	logaritmo	Frecuencia	log  E*	E, (MPa)	Error
Hz	°C	E, (MPa)	φ, °	E, (MPa)	φ, °	E, (MPa)	φ, °	(experimental)	de "aT"	ajustada a Temp. ref.	(Witczak)	(Witczak)	
25	4	9181	8.5	9098	8.8	9139.5	8.65	3.96092	1.87513	1875.28	3.97784	9502.58	0.00029
10	4	8525	12.2	8658	11.2	8591.5	11.7	3.93407	1.87513	750.113	3.93199	8550.43	4.3E-06
5	4	8208	14.6	8032	15.4	8120	15	3.90956	1.87513	375.057	3.89293	7815	0.00028
1	4	6340	18.9	5903	19.1	6121.5	19	3.78686	1.87513	75.0113	3.78666	6118.74	3.8E-08
0.5	4	5517	20.2	5250	20.2	5383.5	20.2	3.73106	1.87513	37.5057	3.73395	5419.36	8.3E-06
0.1	4	3947	22.1	3917	21.6	3932	21.85	3.59461	1.87513	7.50113	3.59562	3941.11	1E-06
25	20	5136	17.1	5192	16.4	5164	16.75	3.71299	0	25	3.70115	5025.21	0.00014
10	20	4106	24	4464	20.3	4285	22.15	3.63195	0	10	3.62191	4187.05	0.0001
5	20	3418	18.2	3573	20.6	3495.5	19.4	3.54351	0	5	3.55744	3609.41	0.00019
1	20	2398	23.8	2442	21.1	2420	22.45	3.38382	0	1	3.3948	2481.96	0.00012
0.5	20	2056	25.4	2092	23.7	2074	24.55	3.31681	0	0.5	3.32037	2091.1	1.3E-05
0.1	20	1398	22.8	1434	23.2	1416	23	3.15106	0	0.1	3.14213	1387.18	8E-05
25	30	2541	21.2	2490	22.8	2515.5	22	3.40062	-1.4266	0.93615	3.3878	2442.33	0.00016
10	30	1894	24.5	1863	25.5	1878.5	25	3.27381	-1.4266	0.37446	3.28878	1944.38	0.00022
5	30	1586	24.3	1589	24.9	1587.5	24.6	3.20071	-1.4266	0.18723	3.21212	1629.74	0.00013
1	30	1065	30.2	1060	29.9	1062.5	30.05	3.02633	-1.4266	0.03745	3.03275	1078.31	4.1E-05
0.5	30	910	28.1	899	29.3	904.5	28.7	2.95641	-1.4266	0.01872	2.95674	905.183	1.1E-07
0.1	30	655	33.6	640	35.5	647.5	34.55	2.81124	-1.4266	0.00374	2.78828	614.161	0.00053
25	40	1106	26.7	1056	26.3	1081	26.5	3.03383	-2.9283	0.02948	3.00637	1014.79	0.00075
10	40	819	29.1	774	28.5	796.5	28.8	2.90119	-2.9283	0.01179	2.90701	807.262	3.4E-05
5	40	674	31.6	640	30.3	657	30.95	2.81757	-2.9283	0.0059	2.83437	682.923	0.00028
1	40	488	33.8	454	33.9	471	33.85	2.67302	-2.9283	0.00118	2.67745	475.823	2E-05
0.5	40	426	36.1	398	35.6	412	35.85	2.6149	-2.9283	0.00059	2.61592	412.975	1.1E-06
0.1	40	318	38.1	295	40.2	306.5	39.15	2.48643	-2.9283	0.00012	2.48888	308.236	6E-06
												Suma de errores	0.00341

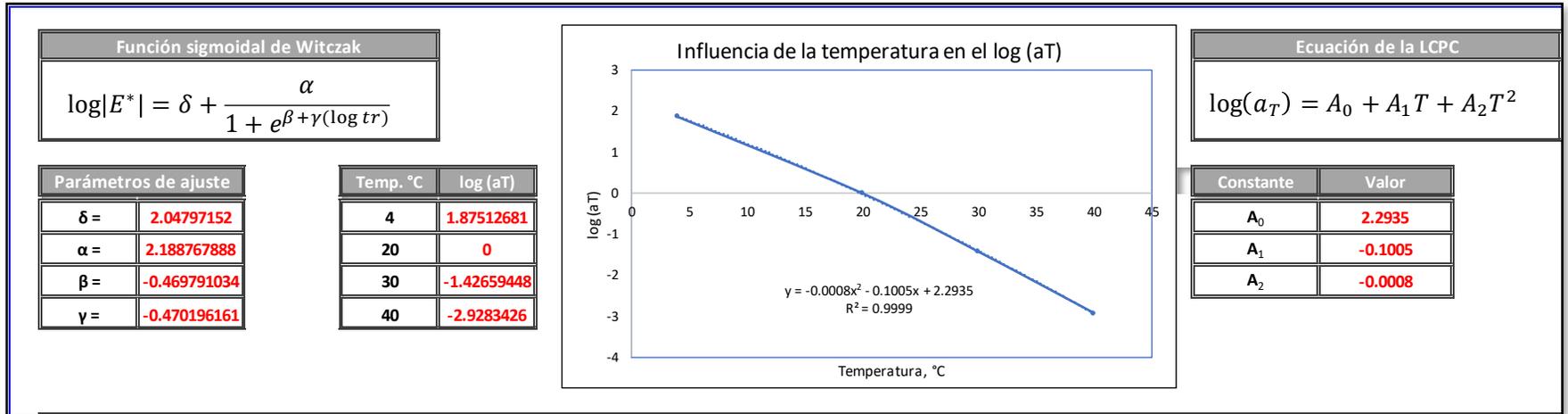


Figura 7-12. Parámetros de ajuste para la función sigmoideal de Witczak y aplicación del principio tiempo-temperatura para la construcción de la curva maestra de Módulo Dinámico.