

Jacobo González Cruz

Diseño balanceado de mezcla asfáltica en caliente
con material recuperado (RAP) y agregado virgen

2023



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

Diseño balanceado de mezcla asfáltica en caliente con material
recuperado (RAP) y agregado virgen

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Jacobo González Cruz

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Querétaro, Qro., México, noviembre 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Diseño balanceado de mezcla asfáltica en caliente con
material recuperado (RAP) y agregado virgen

por

Jacobo Gonzalez Cruz

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](#).

Clave RI: IGMAC-309225



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Diseño balanceado de mezcla asfáltica en caliente con material
recuperado (RAP) y agregado virgen

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Jacobo González Cruz

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

SINODALES

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

Firma

Dra. Genoveva Hernández Padrón
Secretario

Firma

M. I. Alejandro Castellanos Cordero
Vocal

Firma

Dr. Omar Chávez Alegría
Suplente

Firma

Dr. Eduardo Rojas González
Suplente

Firma

Dra. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

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

Centro Universitario
Querétaro, Qro., México
Noviembre 2023

RESUMEN

Actualmente, se están desarrollando técnicas y procedimientos para lograr diseños de mezclas asfálticas capaz de soportar altos niveles de tránsito mediante el mejoramiento del desempeño del pavimento, por lo que el objetivo de este estudio es lograr una mezcla que cumpla con las especificaciones de agrietamiento y deformación permanente utilizando una menor cantidad de cemento asfáltico, además de utilizar una mayor cantidad de pavimento asfáltico recuperado (RAP) mediante la implementación de una nueva metodología denominada Diseño Balanceado de Mezcla Asfáltica (BMD), el cual dentro de sus requerimientos evalúa el rendimiento de la mezcla en cuanto a la deformación permanente (Rueda cargada de Hamburgo) y agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL-CT), dando un parámetro del porcentaje máximo y mínimo de contenido asfáltico que podría utilizarse en la mezcla. Para ello se ensayaron tres mezclas con diferentes porcentajes de asfalto, la primera con el óptimo (5%) obtenido mediante el análisis volumétrico Superpave, la segunda con una menor cantidad de asfalto (4.5%) y la tercera con un porcentaje mayor (5.5%), dando como resultado un rango de asfalto aceptable entre 4.8 y 4.95% cumpliendo con los parámetros evaluados. Además, se ensayaron cuatro mezclas combinados con 30% de RAP y con diferentes porcentajes de asfalto, la primera con el óptimo (4.65%), las tres siguientes con porcentajes mayores (5.15, 5.65 y 6.15%) de los cuales se logró cumplir con el ensayo de deformación permanente, sin embargo, los resultados de la prueba de agrietamiento por tensión indirecta resultaron ligeramente por debajo del mínimo recomendado, cabe mencionar que a las mezclas combinadas con RAP no se le agregó ningún aditivo rejuvenecedor, únicamente se utilizó un asfalto PG 64-22-H. Es importante mencionar que, para el diseño virgen, se logró disminuir el porcentaje de asfalto aceptable con respecto al obtenido en el análisis volumétrico, contribuyendo en la optimización del costo y del uso de cementos asfálticos.

(Palabras clave: Diseño Balanceado, Superpave, RAP, IDEAL – CT, CT-Índex.

SUMMARY

Currently, techniques and procedures are being developed to achieve asphalt mix designs capable of withstanding high levels of traffic by improving pavement performance, so the objective of this study is to achieve a mix that meets the specifications of cracking and permanent deformation using a smaller amount of asphalt cement. The objective of this study is to achieve a mix that meets the specifications for cracking and permanent deformation using less asphalt cement, in addition to using a greater amount of reclaimed asphalt pavement (RAP) by implementing a new methodology called Balanced Asphalt Mix Design (BMD), which among its requirements evaluates the performance of the mix in terms of permanent deformation (Hamburg Loaded Wheel) and indirect stress cracking (IDEAL-CT), giving a parameter of the maximum and minimum percentage of asphalt content that could be used in the mix. For this purpose, three mixes were tested with different asphalt percentages, the first with the optimum (5%) obtained by Superpave volumetric analysis, the second with a lower amount of asphalt (4.5%) and the third with a higher percentage (5.5%), resulting in an acceptable asphalt range between 4.8 and 4.95%, complying with the evaluated parameters. In addition, four mixes were tested combined with 30% RAP and with different percentages of asphalt, the first with the optimum (4.65%), the next three with higher percentages (5.15, 5.65 and 6.15%). However, the results of the indirect stress cracking test were slightly below the recommended minimum. It is worth mentioning that no rejuvenating additive was added to the mixes combined with RAP; only PG 64-22-H asphalt was used. It is important to mention that, for the virgin design, it was possible to reduce the percentage of acceptable asphalt with respect to that obtained in the volumetric analysis, contributing to the optimization of the cost and the use of asphalt cements.

Key words: Balanced Design, Superpave, RAP, IDEAL – CT, CT-Index.

DEDICATORIA

A mi amada madre, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido la fuerza que me impulsó a alcanzar este logro.

A los directores de tesis, Dra. María de la Luz Pérez Rea, Dra. Genoveva Hernández Padrón, M.I. Alejandro Castellanos Cordero, Dr. Omar Chávez Alegría, Dr. Eduardo Rojas González, por su orientación experta, paciencia y dedicación a lo largo de este camino académico.

A mi familia, que siempre ha creído en mí y ha sido mi pilar en cada paso de esta travesía. A mi compañera de vida, Esbeydi, por su comprensión, aliento y por compartir este viaje a mi lado.

Este trabajo es el resultado de la colaboración, el apoyo y el amor de todos ustedes. Cada página lleva impresa la gratitud que siento por tenerlos en mi vida. ¡Gracias por ser mi inspiración y por hacer posible este logro!

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, agradecer a Dios por permitirme alcanzar mis metas, a la Universidad Autónoma de Querétaro por abrirme las puertas y formar parte de esta gran comunidad y hacerme sentir parte de ella, además de las facilidades y herramientas que nos brindó para poder seguir preparándonos profesionalmente, también al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo brindado para continuar con mi preparación académica.

Al laboratorio de la Facultad por proporcionarnos los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo la experimentación.

Agradezco a los profesores que formaron parte de este proceso y que nos brindaron parte del gran conocimiento que poseen, especialmente a mis sinodales, la Dra. María de la Luz Pérez Rea, Dra. Genoveva Hernández Padrón, M.I. Alejandro Castellanos Cordero, Dr. Omar Chávez Alegría, Dr. Eduardo Rojas González, también agradecer al coordinador del programa Dr. Ricardo Montoya Zamora, por el apoyo y la orientación brindada.

Agradezco también a los directivos del Programa y de la Facultad por la oportunidad que nos brindan de poder formar parte de esta gran institución.

Un agradecimiento especial a mi madre, a mis hermanos y familia por haber estado presente en todo momento apoyando cada una de mis decisiones.

A mi compañera de vida, Esbeydi, por el apoyo incondicional brindado en este proceso y por estar presente en los momentos críticos.

Agradezco a la empresa CEVITER S.A de C.V. por permitirme realizar gran parte de la experimentación dentro de sus instalaciones, a los Directivos, al M.I Francisco Romero, M.I. Roberto Hernández, M.I Alejandro Castellanos y todos los colaboradores por la orientación brindada.

INDICE

	Página
RESUMEN.....	i
SUMMARY	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
INDICE.....	vi
INDICE DE CUADROS.....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	9
ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	11
1. INTRODUCCION	12
1.1 Justificación	14
1.2 Descripción del problema.....	15
1.3 Hipótesis.....	17
1.4 Objetivo	17
1.4.1 Objetivos específicos	17
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Generalidades	18
2.2 Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP).....	22
2.3 Método Superpave	27
2.4 Diseño de Mezcla Balanceado (BMD).....	31
3. METODOLOGÍA.....	33
3.1 Obtención del agregado pétreo.....	34
3.2 Obtención y clasificación del RAP	35
3.2.1 Extracción del asfalto en Rotarex	36
3.3 Selección inicial de la granulometría de ensayo.....	36
3.4 Realizar el diseño volumétrico.....	37
3.4.2 Preparación y compactación de especímenes.....	42
3.4.3 Selección del óptimo contenido de asfalto	42
3.5 Realizar los ensayos de ahuellamiento	42
3.6 Realizar los ensayos agrietamiento.....	43
3.7 Realizar ensayo de daños por humedad.....	44
3.8 Análisis de resultados	45

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
4.1	Característica de los agregados pétreos.....	46
4.2	Obtención y caracterización del pavimento asfáltico recuperado...47	
4.2.1	Calidad del material asfáltico	48
4.3	Diseño volumétrico.....	49
4.3.1	Diseño Base.....	49
4.3.2	Diseño con RAP.....	52
4.4	Ensayo de ahuellamiento mediante Rueda cargada de Hamburgo	54
4.4.1	Evaluación de la rodera para el diseño de referencia.....	55
4.4.2	Evaluación de la rodera para el diseño combinado con 20% de RAP	56
4.4.3	Evaluación de la rodera para el diseño combinado con 30% de RAP	57
4.4.4	Evaluación de la rodera para el diseño combinado con 40% de RAP	58
4.5	Ensayo del índice de agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL- CT)	59
4.5.1	Evaluación del índice de agrietamiento para el diseño de referencia.....	61
4.5.2	Evaluación del índice de agrietamiento para el diseño combinado con 20% de RAP	62
4.5.3	Evaluación del índice de agrietamiento para el diseño combinado con 30% de RAP	63
4.5.4	Evaluación del índice de agrietamiento para el diseño combinado con 40% de RAP	65
4.6	Evaluación de la susceptibilidad a la humedad (TSR)	71
5.	CONCLUSIONES.....	74
	BIBLIOGRAFÍA.....	75
	APENDICE	80

INDICE DE CUADROS

Tabla 3-1 Granulometría del diseño de la mezcla, Superpave Fundamentals	37
Tabla 3-2 Esfuerzo de compactación giratorio, Superpave Mix Desing	41
Tabla 4-1 Caracterización de los agregados pétreos	46
Tabla 4-2 Calidad del asfalto.....	48
Tabla 4-3 Análisis volumétrico de la mezcla.....	50
Tabla 4-4 Análisis volumétrico de la mezcla.....	53
Tabla 4-5 Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla de control (HWTT- AASHTO T 324).....	55
Tabla 4-6 Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla combinado con 20% de RAP (HWTT- AASHTO T 324).....	56
Tabla 4-7 Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla combinado con 30% de RAP (HWTT- AASHTO T 324).....	57
Tabla 4-8 Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla combinado con 40% de RAP (HWTT- AASHTO T 324).....	58
Tabla 4-9 Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla de control (IDEAL-CT).....	62
Tabla 4-10 Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla combinado con 20% de RAP (IDEAL-CT).....	63
Tabla 4-11 Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla combinado con 30% de RAP (IDEAL-CT).....	64
Tabla 4-12 Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla combinado con 40% de RAP (IDEAL-CT).....	65
Tabla 4-13 Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad (TSR) Diseño Base	72
Tabla 4-14 Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad (TSR) Diseño combinado con 20% de RAP.....	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Estimación de los costos en la producción de mezclas para pavimentos flexibles.	13
Figura 2-1 Inversión histórica en infraestructura	19
Figura 2-2 Fases del ciclo de vida del pavimento.....	20
Figura 2-3 Resistencia al agrietamiento por fatiga y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto	32
Figura 3-1 Metodología del diseño	33
Figura 3-2 Ubicación de banco de material “Cemex la Loma”.....	34
Figura 3-3 Equipo de extracción del asfalto en el RAP	36
Figura 3-4 Diagrama del análisis volumétrico.....	38
Figura 3-5 Esquema del equipo de compactación	40
Figura 3-6 Configuración del molde SGC.....	41
Figura 3-7 Equipo Rueda Cargada de Hamburgo.	43
Figura 3-8 Equipo Índice de agrietamiento (IDEAL - CT).....	44
Figura 3-9 Equipo para la evaluación de daños por humedad	45
Figura 4-1 Análisis granulométrico del agregado pétreo	47
Figura 4-2 Curva de mezclado y compactación	49
Figura 4-3 Distribución granulométrica de la mezcla de control T. ¾”.....	50
Figura 4-4 Distribución granulométrica de la mezcla de control T. ¾”.....	53
Figura 4-5 Distribución granulométrica de la mezcla de control T. ¾”.....	54
Figura 4-6 Ensayo de ahuellamiento mediante Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO-T-324).....	54
Figura 4-7 Determinación de la profundidad de rodera HWTT para el diseño Virgen. .	56
Figura 4-8 Determinación de la profundidad de rodera HWTT para el diseño combinado con 20% de RAP.....	57
Figura 4-9 Determinación de la profundidad de rodera HWTT para el diseño combinado con 30% de RAP.....	58
Figura 4-10 Determinación de la profundidad de rodera HWTT para el diseño combinado con 30% de RAP.....	59
Figura 4-11 Curva carga-desplazamiento típico del ensayo de agrietamiento IDEAL-CT	

(ASTM D8225).	60
Figura 4-12 Ensayo de agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL-CT, ASTM D8225 – 19).....	61
Figura 4-13 Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño Base.	62
Figura 4-14 Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño combinado con 20% de RAP.....	63
Figura 4-15 Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño combinado con 30% de RAP.....	65
Figura 4-16 Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño combinado con 40% de RAP.....	66
Figura 4-17 Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (diseño Base).	67
Figura 4-18 Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (diseño combinado con 20% de RAP).....	69
Figura 4-19 Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (diseño combinado con 30% de RAP).....	69
Figura 4-20 Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (diseño combinado con 40% de RAP).....	70
Figura 4-21 Diagrama de interacción del desempeño de las mezclas	71
Figura 4-22 Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de daños por humedad (TSR) para el diseño base.....	73
Figura 4-23 Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de daños por humedad (TSR) para el diseño combinado con 20% de RAP.....	73

ABREVIATURAS Y SIGLAS

BMD	Balanced Mix Design
HMA	Hot Mix Asphalt
Superpave	Superior Performing Asphalt Pavements
TSR	Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta
IDEAL-CT	Indirect tensile asphalt cracking test
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
IMT	Instituto Mexicano del Transporte
SHRP	Strategic Highway Research Program
FHWA	Federal Highway Administration
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NCAT	National Center for Asphalt Technology
ARRA	Asphalt Recycling and Reclaiming Association

1. INTRODUCCION

La infraestructura carretera es una de las bases fundamentales para el desarrollo económico de una nación, además de generar una amplia gama de beneficios económicos y sociales, por lo que resulta indispensable conservar, rehabilitar y reconstruir la red carretera cuidando aplicar criterios de sustentabilidad adecuados, ya que la preservación de los recursos naturales se ha convertido en una preocupación general dentro del sector productivo, (PIARC, 2014)

De acuerdo con la Red Nacional de carreteras, hasta el año 2020 en México se registra un total de 780,511 km de infraestructura vial. De estos, 174,779 km se identificaron como carreteras pavimentadas, de los cuales aproximadamente el 85% son del tipo pavimento flexible.

Actualmente un número cada vez mayor de organismos, empresas y organizaciones han adoptado la reutilización de pavimentos asfálticos (RAP por sus siglas en inglés) como una alternativa en la reducción de costos de agregados vírgenes para el diseño de pavimentos nuevos, (Asphalt Institute, 1981; Hugener y Kawakami, 2017). El reciclaje del pavimento asfáltico crea un ciclo de reutilización de materiales que optimiza el uso de los recursos naturales, además, reduce los costos generados por los ligantes asfálticos que se requiere en la producción de mezclas de pavimentos asfáltico (FHWA-HRT-11-021).

Babagoli *et. al.* (2021) menciona que la utilización de RAP también proporciona ahorros energéticos, reduce los gastos de transporte necesarios para adquirir agregados vírgenes de calidad y conserva los recursos. Asimismo, el uso de RAP reduce la cantidad de residuos de construcción depositados en vertederos, evitando el agotamiento de recursos naturales no renovables, como los agregados vírgenes y el ligante asfáltico. En última instancia, el reciclaje del asfalto crea un ciclo que optimiza el uso de recursos naturales y sostiene la industria de los pavimentos asfálticos, (FHWA-HRT-11-021; Franke y Ksaibati, 2017).

Los pavimentos asfálticos recuperados se utilizan más comúnmente como agregado y sustituto de gran parte del ligante asfáltico virgen en las mezclas asfálticas para pavimentos flexibles, pero también se utiliza como base granular o subbase, agregado de base estabilizada y material de terraplén o relleno, entre

otros, (FHWA-HRT-11-021)

La FHWA, considera 4 categorías principales en los costos de producción de una mezcla asfáltica, las cuales son las siguientes:

- 1.- Materiales
- 2.- Producción en planta.
- 3.- Transporte
- 4.- Colocación en campo.

De los cuales, los materiales empleados son la categoría que mayor costo de producción genera, ya que prácticamente se emplean en todas las capas que constituyen un pavimento, además, el material más costoso es el ligante asfáltico y se utiliza normalmente en las capas intermedias y superficiales, por esta razón el uso más favorable del RAP es en las capas intermedias y superficiales, ya que logran sustituir gran parte del ligante asfáltico que resulta ser el elemento más costoso.

En la siguiente gráfica se presenta una comparativa de costos entre las 4 categorías principales en un pavimento.

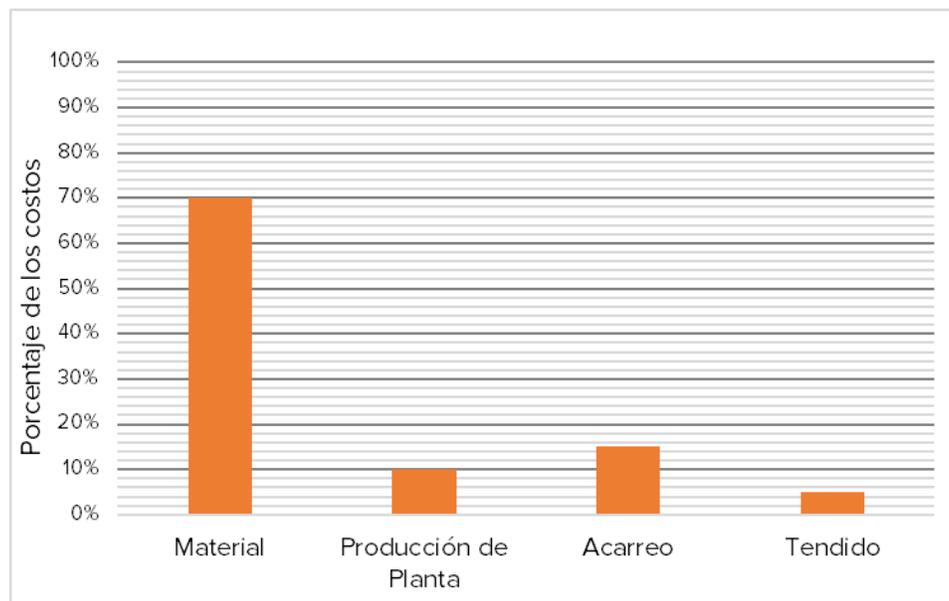


Figura 1-1 Estimación de los costos en la producción de mezclas para pavimentos flexibles.

Fuente: Elaboración propia con información de la FHWA-HRT-11-021

Sin embargo, el uso de altos porcentajes de RAP en los diseños de mezclas

asfálticas está restringido debido de los problemas de rigidez y trabajabilidad a consecuencia de la oxidación del asfalto en el pavimento, (Mohammad *et. al.*, 2016).

En consecuencia, muchos organismos estatales de todo el mundo no permiten el uso de más del 40% de RAP en las nuevas mezclas en caliente (Moghaddam y Baaj, 2016; Zaumanis *et al.*, 2013). Por lo tanto, deben promoverse más estudios centrados en el rendimiento efectivo a largo plazo de los betunes reciclados, en particular cuando se adoptan altas tasas de reciclado.

De acuerdo con Oliveira *et. al.* (2022), en los últimos años se ha intentado desarrollar nuevas técnicas y procedimientos para lograr un diseño de una mezcla asfáltica capaz de soportar los altos niveles de tránsito, mediante el mejoramiento del nivel de desempeño de la estructura del pavimento, dentro de las cuales se encuentran la utilización de asfaltos modificados con polímeros, la utilización de mezclas tibias, el rehúso de materiales como el pavimento asfáltico reciclado, entre otros.

Derivado de la creciente preocupación por los problemas de durabilidad y el agrietamiento de los pavimentos asfálticos, junto con las deficiencias de los sistemas de diseño de mezclas volumétricas, han llevado a muchas Agencias Estatales de Carreteras y a la industria del pavimento asfáltico a explorar el uso del método de diseño de mezcla balanceada (BMD por sus siglas en inglés) como un nuevo enfoque para el diseño de mezclas asfálticas. (NCAT 2021). Por otra parte, las grandes cantidades de residuos generados en la industria de la construcción de pavimentos en los diferentes sectores han provocado problemas medioambientales de gran envergadura, por lo que la sustitución de materiales vírgenes por otros reciclados son una posible solución para la disminución de residuos que se generan (Salehi *et al.*, 2021).

1.1 Justificación

Las mezclas de asfalto son cada vez más complejas. En los últimos diez años, el uso de pavimentos asfálticos recuperados (RAP), tejas asfálticas recicladas (RAS), fibras y rejuvenecedores en algunos casos, se ha convertido en una nueva norma (Zhou et al., 2021).

Dado a los constantes cambios en los componentes de las mezclas asfálticas, muchos departamentos estatales de transporte (DOT) están desarrollando o implementando preliminarmente algún tipo de especificación de rendimiento para las mezclas asfálticas con el fin de garantizar la durabilidad de la mezcla Zhou et al (2021), por lo que la FHWA (2016) recomienda el uso del diseño balanceado de mezcla asfáltica, en el que dentro de sus requerimientos, incluye el aplicar pruebas de desempeño a especímenes debidamente acondicionados que simulen el agrietamiento y contemple el envejecimiento de la mezcla y demás condiciones de servicio del pavimento, además estudios realizados por Im et al. (2016) determinaron que la implementación de rejuvenecedores en mezclas asfálticas combinadas con RAP empleados en el método de diseño balanceado, mostraron una resistencia al agrietamiento mucho mayor que los ligantes y mezclas de control, es decir, la mezcla virgen. Sin embargo, el rendimiento al ahuellamiento de todas las muestras con ligantes rejuvenecidos disminuyó.

Basándose en lo mencionado previamente se determinó utilizar el método de diseño de mezcla balanceado con el fin de obtener el contenido óptimo de asfalto y agregado virgen así como de RAP, para lograr mejorar el desempeño del pavimento en cuanto al agrietamiento y deformación permanente, cabe mencionar que para este estudio no se utilizará algún tipo de rejuvenecedor, ya que se pretende optimizar los costos y recursos no renovables, por lo que se optará utilizar un asfalto más blando, por ejemplo PG (Performance Grade) 58-22 a fin de equilibrar el diseño.

1.2 Descripción del problema

Ghuzlan et al. (2020) mencionan que el agrietamiento de los pavimentos flexibles ha sido señalado como uno de los principales causantes de los daños en los pavimentos y una consideración importante se le atribuye al diseño, por otra parte, el ahuellamiento es otro de los daños importantes que sufre un pavimento, producido principalmente por una acumulación de tensiones irrecuperables debido a ciclo de cargas repetidas, derivado también de una mala compactación y diseño de la mezcla.

En ese sentido, Pasetto et al. (2016) y Devulapalli et al. (2020) reafirman que el uso de altos contenidos de RAP a menudo hace que las mezclas de asfalto sean demasiado rígidas y, en consecuencia, menos manejables y difíciles de compactar en el campo, lo que en última instancia puede conducir a un fallo prematuro. Además, investigadores como Shen et al. (2016) y Im et al. (2016), coinciden que es necesario la incorporación de una dosis de rejuvenecimiento para un rendimiento equilibrado de agrietamiento y ahuellamiento de las mezclas asfálticas que contengan RAP, por lo que en ocasiones encarece el diseño.

Derivado de la creciente preocupación por los problemas de durabilidad y el agrietamiento de los pavimentos asfálticos, junto con las deficiencias de los sistemas de diseño de mezclas volumétricas, han llevado a muchas Agencias Estatales de Carreteras y a la industria del pavimento asfáltico a explorar el uso del BMD como un nuevo enfoque para el diseño de mezclas asfálticas. (NCAT 2021).

Por otra parte, las grandes cantidades de residuos generados en la industria de la construcción de pavimentos en los diferentes sectores han provocado problemas medioambientales de gran envergadura, por lo que la sustitución de materiales vírgenes por otros reciclados son una posible solución para la disminución de residuos que se generan Salehi et al. (2021), además el uso de material reciclado ayuda a disminuir el consumo de energía y las emisiones generadas a través de la adquisición, el procesamiento y el transporte de los

materiales vírgenes utilizados en la construcción, el mantenimiento y la rehabilitación de los pavimentos, el cual afectan directamente al medio ambiente.

1.3 Hipótesis

La resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente de una mezcla asfáltica en caliente más RAP determinado mediante el Diseño de Mezcla Balanceado, aumentará con respecto a una mezcla asfáltica en caliente más RAP diseñado por el método Superpave, el cual se representará mediante nomogramas y diagramas.

1.4 Objetivo

Lograr la proporción óptima de asfalto, agregado y demás elementos para garantizar una mezcla que demuestre resultados positivos en las pruebas de resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente mediante la aplicación del Diseño de Mezcla Balanceado en Caliente en conjunto con el pavimento recuperado (RAP).

1.4.1 Objetivos específicos

1. Encontrar el contenido más adecuado de asfalto para una mezcla balanceada, aprovechando la mayor cantidad de pavimento recuperado, cumpliendo con los valores de agrietamiento y ahuellamiento requeridos en la normativa.
2. Disminuir los deterioros prematuros como son (el agrietamiento y ahuellamiento) que se presentan en los pavimentos con la implementación del diseño de mezcla balanceada.

2. MARCO TEÓRICO

En los últimos años ha aumentado la concientización sobre el impacto medioambiental, en particular sobre las emisiones. La normativa medioambiental y la necesidad de una tecnología de construcción ecológica han fomentado las innovaciones y han renovado el interés por la antigua tecnología en la construcción de pavimentos. La construcción ecológica, como el reciclaje y los materiales de bajo consumo energético, puede contribuir a alcanzar el objetivo medioambiental global (Gungat et al., 2019; Sabahfer et al., 2015; Wang et al., 2020).

2.1 Generalidades

Los pavimentos son activos importantes en la infraestructura de transporte, además contribuyen de manera directa en el desarrollo de la economía de una nación; con información de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), en la inversión pública en infraestructura, el sector de comunicaciones y transportes es una de las prioridades más importantes, sólo por debajo del desarrollo energético;

Además, la mayoría de las inversiones en carreteras están relacionadas con los materiales del pavimento (de Lima *et al.*, 2013)

En la siguiente gráfica se representa la distribución en la asignación de los recursos económicos en los rubros más importantes considerados en el plan de desarrollo nacional de los últimos años.

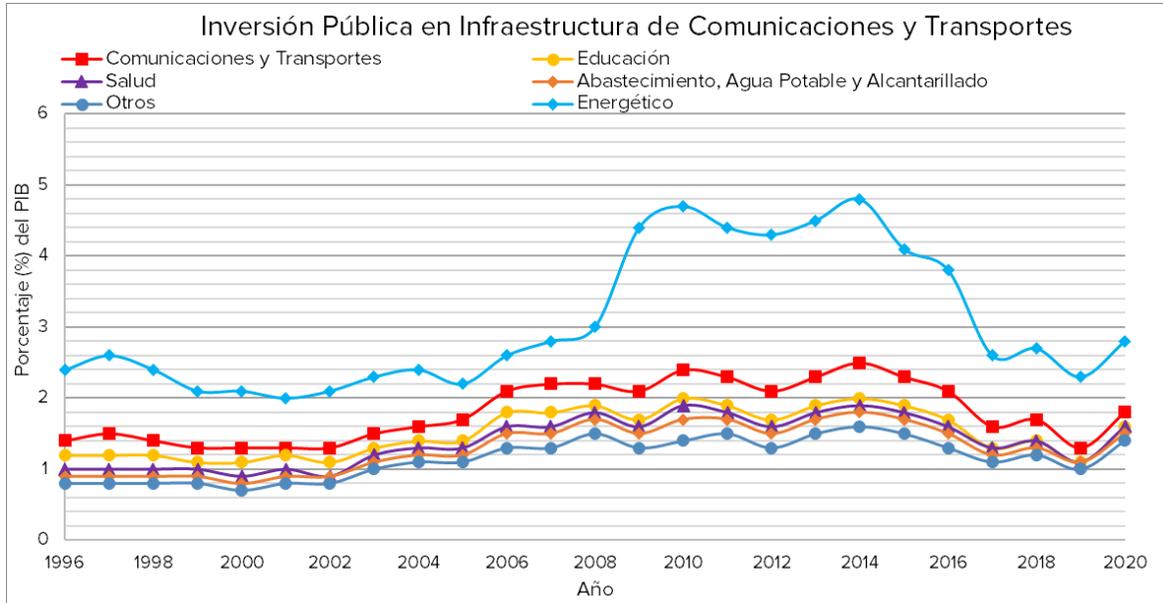


Figura 2-1 Inversión histórica en infraestructura

Fuente: Elaboración propia con información de la SHCP

Por otra parte, la construcción de pavimentos también requiere procesos y materiales de alto consumo energético con impactos adversos en el medio ambiente (Santos *et al.*, 2015). Los impactos ambientales de los pavimentos se extienden mucho más allá de la producción y construcción de materiales y también implican interacciones del pavimento y los vehículos (Santero *et al.*, 2011).

Las autoridades viales fomentan las prácticas sostenibles para aliviar los impactos ambientales negativos de los pavimentos y la toma de decisiones de inversión más económicas (Wei *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2021; Haddadi *et al.*, 2021). Los pavimentos sostenibles dependen en gran medida de la selección de materiales adecuados.

Un pavimento sostenible es aquel que alcanza sus objetivos específicos de ingeniería y, en una escala más amplia, satisface las necesidades humanas básicas, utiliza los recursos de forma eficaz y preserva/restaura los ecosistemas circundantes. La sostenibilidad es sensible al contexto y, por lo tanto, el enfoque adoptado no es universal, sino único para cada aplicación de pavimento. Además,

un "pavimento 100 % sostenible", todavía no es totalmente alcanzable. En la actualidad, se trata de una meta a la que hay que aspirar y que, en última instancia, se alcanzará en algún momento del futuro a medida que las mejores prácticas de sostenibilidad sigan evolucionando, FHWA-HIF-14-012 (2014).

Se consideran seis fases clave del ciclo de vida del pavimento para las mejores prácticas de sostenibilidad, como se ilustra en la figura 2.2 y se describe a continuación (Santero 2009; UCPRC 2010):

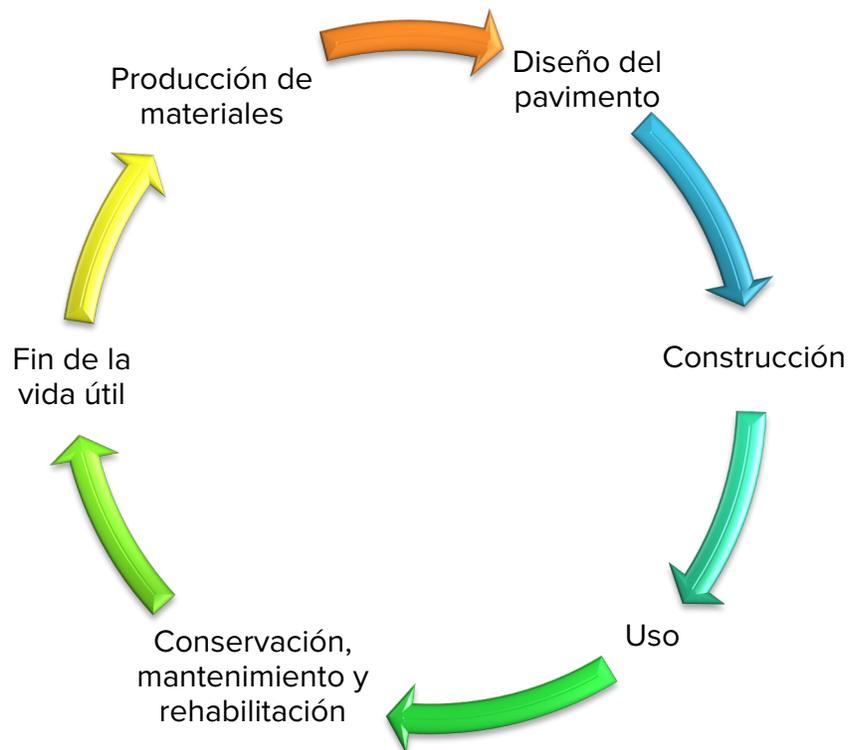


Figura 2-2 Fases del ciclo de vida del pavimento

Fuente: FHWA-HIF-14-012 (2014)

- Producción de materiales. Actividades relacionadas con la adquisición de materiales para pavimentos (por ejemplo, minería, extracción de petróleo crudo) y su procesamiento (por ejemplo, refinado, fabricación, mezcla), incluidos los procesos de la planta y el transporte.

- Diseño del pavimento. El proceso de identificación de los requisitos funcionales de un pavimento, la recopilación de la información pertinente (por ejemplo, la subrasante, el tráfico, el clima) y, a continuación, la selección y especificación de los materiales y la composición estructural del pavimento.

- Construcción. Procesos y equipos asociados a la construcción de sistemas de pavimento, incluyendo tanto las nuevas construcciones como los esfuerzos de reconstrucción.

- Uso. Características del pavimento (por ejemplo, rugosidad, rigidez y macrotextura) que afectan al consumo de energía de los vehículos y a las emisiones correspondientes, así como al medio ambiente circundante (por ejemplo, retención/detención del flujo hidráulico y contaminación, emisiones atmosféricas, ruido, capacidad térmica/conductividad, absorción solar, absorción acústica).

- Conservación, mantenimiento y rehabilitación. La aplicación de tratamientos a un pavimento existente que ralentiza el ritmo de deterioro o que soluciona las deficiencias funcionales o estructurales.

- Fin de la vida útil. La disposición final y posterior reutilización, procesamiento o reciclaje de cualquier parte de un sistema de pavimento que haya llegado al final de su vida útil.

La utilización de materiales de desecho es una de las estrategias sostenibles con respecto a los materiales de los pavimentos (Plati, 2018). Los materiales de desecho pueden utilizarse como agregado o reemplazo de asfalto en diferentes capas de estructuras de pavimento (Zhao *et al.*, 2020) e incluyen, pavimento asfáltico recuperado (RAP), cenizas volantes (FA), cenizas de origen (BA) tejas de asfalto recicladas, residuos de plástico, ladrillo triturado, entre otros, (Norgbey *et al.*, 2020; Plati, 2019).

2.2 Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)

El reciclaje de pavimentos usados se inició a mediados de la década de 1970 debido al importante aumento de los precios del asfalto como consecuencia del embargo petrolero árabe (L. Gungat et al., 2019). Aunque muchos productores de HMA continuaron utilizando RAP, la cantidad era normalmente inferior al 15% porque no había cambios en el grado de ligante o pruebas adicionales requeridas para estos porcentajes más bajos. Además, no había ningún incentivo económico significativo para utilizar mayores porcentajes de RAP. Sin embargo, en 2006 y de nuevo en 2008, se produjeron fuertes aumentos en los costos del ligante asfáltico, así como una disminución de los suministros de agregados de calidad. Como resultado, la utilización de mayores cantidades de RAP volvió a ser una prioridad en la industria del HMA (FHWA, 2011). Como consecuencia de esto, los departamentos de transporte estatales expresaron su inquietud por la carencia de directrices claras acerca de la utilización de altos porcentajes de RAP en las mezclas, así como la falta de información sobre su desempeño.

En 2007, la FHWA creó un Grupo de trabajo compuesto de expertos en RAP de la AASHTO, Asociación Nacional de Pavimentos de Asfalto (NAPA) y del Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT), así como personas de la industria y el mundo académico, el cual fue nombrado como RAP ETG, para debatir sobre el uso del pavimento reciclado en la construcción y rehabilitación de pavimentos flexibles, en el cual se determinaron las mejores prácticas para la obtención, el procesamiento, el acopio, las pruebas, el diseño, la evaluación, la producción y la colocación de mezclas con alto contenido de RAP, así como las prácticas para lograr el mejor rendimiento de las mezclas con alto contenido de RAP.

La Federal Highway Administration (FHWA-HRT-11-057), menciona que los materiales de asfalto existentes suelen retirarse durante las operaciones de repavimentación, rehabilitación y reconstrucción. Una vez retirados y procesados,

los materiales del pavimento se convierten en pavimento asfáltico recuperado (RAP), que contiene valiosos ligantes asfálticos y agregados, los cuales pueden sustituir a los agregados y ligantes vírgenes más caros.

Según la Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), anualmente se generan más de 50 millones de toneladas de Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP, por sus siglas en inglés) por parte de las Agencias de Carreteras Estatales. De esta cantidad, aproximadamente el 33% se emplea en procesos de reciclaje en caliente, el 47% se destina a otras aplicaciones de reciclaje o reutilización de asfalto, y menos del 20% se descarta o desecha, la FHWA y la Agencia de Protección Medioambiental de EE.UU (2011) indican que el RAP también se utiliza como base granular o subbase, agregado de base estabilizada y material de terraplén o de relleno.

Hong et al. (2014) y L Gungat et al. (2019) coinciden que el pavimento asfáltico reciclado o recuperado (RAP) ha ido ganando impulso en los últimos años debido a sus ventajas en la construcción de infraestructuras de pavimentos de carreteras sostenibles, principalmente beneficios económicos al reducir el costo de construcción y el costo de la eliminación del RAP y la sostenibilidad medioambiental al reducir la demanda de nuevos materiales, por lo que se contribuye significativamente a la conservación de la energía mediante el uso del asfalto reciclado, y por lo tanto, la reducción del uso del asfalto virgen y de los agregados pétreos reduciendo considerablemente la explotación de recursos naturales no renovables.

Además, L Gungat et al. (2019) mencionan que las mezclas asfálticas que incorporan RAP producen un rendimiento comparable al de las mezclas asfálticas en caliente convencionales (HMA) cuando se tratan adecuadamente, sin embargo, la creciente cantidad de contenido de RAP requiere altas temperaturas de producción durante la producción y la construcción de la carretera y, por lo tanto, provoca una amenaza para la salud de los trabajadores de la pavimentación de

asfalto, por lo que el alto uso de contenido de pavimento reciclado resulta poco favorable.

La Asociación de Reciclado y Recuperación de Asfalto (ARRA) reconoce cuatro tipos diferentes de métodos de reciclaje: reciclaje en caliente; reciclaje en caliente en el lugar; reciclaje en frío en el lugar; y recuperación de profundidad total.

- El reciclaje de mezcla asfáltica en caliente es el proceso en el que los materiales de pavimento asfáltico recuperado (RAP) se combinan con nuevos materiales, a veces junto con un agente de reciclaje, para producir mezclas de mezcla asfáltica en caliente (HMA). Tanto las plantas de mezcla en caliente de tipo lote como las de tambor se utilizan para producir mezcla reciclada. El material RAP se puede obtener mediante operaciones de molienda o desgarrado y triturado. El equipo y los procedimientos de colocación y compactación de la mezcla son los mismos que para el HMA normal.

Por lo general, se usa del 10 al 30% de RAP en mezclas calientes recicladas.

- El reciclaje en caliente en el lugar (HIR, por sus siglas en inglés) consiste en un método en el que el pavimento existente se calienta y suaviza, y luego se escarifica o muele hasta una profundidad específica. Se puede agregar nuevo HMA (con/sin RAP) y/o agente de reciclaje al material RAP escarificado durante el proceso de reciclaje. El HIR se puede realizar como una sola pasada o como una operación de varias pasadas. En la operación de un solo paso, el material escarificado en el lugar se puede combinar con material nuevo si es necesario o se desea. En la operación de pasadas múltiples, el material RAP restaurado se vuelve a compactar primero y luego se aplica una nueva superficie de desgaste. La profundidad del tratamiento varía entre 20 y 50 mm ($\frac{3}{4}$ in a 2 in).
- El reciclaje en frío en el lugar (CIR) implica la reutilización del material de

pavimento existente sin la aplicación de calor. A excepción de cualquier agente de reciclaje, generalmente no se requiere transporte de materiales, por lo que el costo de transporte es muy bajo. Normalmente, se agrega una emulsión asfáltica como agente de reciclaje o aglomerante. La emulsión se dosifica como porcentaje en peso del RAP. La profundidad del tratamiento es típicamente de 75 a 100 mm (3 a 4 pulgadas). Las ventajas del reciclaje en frío en el lugar incluyen un tratamiento estructural significativo de la mayoría de las averías del pavimento, mejora de la calidad de conducción, problemas mínimos de transporte y calidad del aire, y capacidad de ensanchamiento del pavimento.

- La recuperación de profundidad total (FDR) se ha definido como un método de reciclaje en el que se trata toda la sección de pavimento asfáltico y una cantidad predeterminada de material base subyacente para producir una capa base estabilizada. Es esencialmente un proceso de reciclaje de mezcla en frío en el cual se incorporan diversos aditivos, como emulsiones asfálticas y agentes químicos como cloruro de calcio, cemento portland, cenizas volantes y cal, con el objetivo de obtener una base mejorada. Las ventajas de la recuperación de profundidad total incluyen el tratamiento de la mayoría de las fallas del pavimento, la reducción de los costos de transporte, la posibilidad de realizar mejoras estructurales significativas (especialmente en la base), la eliminación de problemas asociados con el deshecho de materiales y la mejora de la calidad de construcción.

En la actualidad, el reciclaje en caliente de RAP es el método más ampliamente empleado a nivel mundial para reciclar asfalto (FHWA-RD-97-148), además, L Gungat et al. (2019) reafirman que la implementación de este método de reciclado es el más favorable debido a su probada rentabilidad y a su respeto por el medio ambiente en comparación con otras técnicas.

Por otra parte, la Asociación Mundial de Carreteras, afirma que, el reciclado en caliente in situ es el único proceso que permite reutilizar completamente la

mezcla envejecida en su nivel actual de aplicación.

Con base en la investigación realizada por Copeland et al. (2011) para el reciclado de la mezcla en caliente, la adición de una tasa baja (menos del 20%) de RAP tiene un efecto mínimo sobre el rendimiento mecánico de la mezcla asfáltica final. Sin embargo, cuando se incorpora una cantidad significativa de pavimento reciclado (más del 30%), la mezcla asfáltica producida tiene una susceptibilidad potencialmente mayor al desprendimiento y al agrietamiento.

Gungat et al. (2019) también menciona que el reciclado de HMA puede clasificarse en reciclado en frío, reciclado en caliente, reciclado en frío y recuperación en profundidad. El método de reciclado más comúnmente implementado es el reciclado en caliente debido a su probada rentabilidad y a su respeto por el medio ambiente en comparación con otras técnicas. En el proceso de reciclado en caliente, el antiguo revestimiento de la carretera se fresa, se procesa y se combina con un ligante nuevo/virgen, un agregado y/o un agente de reciclado en la planta de asfalto. El fresado elimina una o más capas de la superficie del pavimento existente.

De acuerdo con Zaumanis et al. (2013), el pavimento recuperado necesita ser procesado y tamizado en múltiples tamaños antes de ser mezclado con un ligante virgen. Hay varios métodos disponibles para procesar los agregados de RAP. Para un alto contenido, el método de fraccionamiento es el más adecuado para un mejor control de calidad de la mezcla. Cuando el material reciclado se mezcla con materiales vírgenes, la adición de estos agregados cambia las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas resultantes y, por lo tanto, afecta al contenido óptimo de ligante.

Con el aumento en el uso de contenido de pavimentos recuperados en las mezclas vírgenes el ETG de RAP en colaboración con el AASHTO, realizan una encuesta cada 2 años para analizar la evolución del contenido de pavimento

recuperado en las mezclas nuevas, con base en esta información se obtuvieron los resultados de los años 2007, 2009 y 2011, en el cual para el año 2007 se utilizaban un 12% aproximadamente de este material en la mayoría de los estados de Estados Unidos; los resultados obtenidos en el año 2011 arrojan un incremento del uso de contenido de RAP de más de 30% permitidos por la mayoría de las agencias de carreteras estatales, sin embargo 11 agencias informan que realmente utilizan el 25% de este material reciclado.

Una de las preocupaciones principales en el uso de altos contenidos de RAP, es que a diferencia de la Mezcla Asfáltica en caliente nueva, el ligante del material reciclado está muy envejecido debido a su larga exposición en la interperie, por lo que Asli et al. (2012), mencionan que el principal mecanismo de envejecimiento del asfalto es el efecto combinado de la condensación oxidativa y la evaporación de los componentes ligeros, lo que da lugar a cambios notables en la composición del ligante (resinas y asfaltenos) y en las propiedades mecánicas (aumento de la viscosidad y rigidez) dando origen a fallas por agrietamiento.

Por lo que, se buscaba un enfoque que pudiera considerar factores tales como el desempeño de la mezcla durante el proceso de diseño para prevenir posibles problemas de agrietamiento. En este contexto, uno de los métodos más frecuentemente empleado es el Superpave.

2.3 Método Superpave

El análisis, evaluación y experimentación de la mezcla asfáltica ideal ha sido objeto de estudio desde la década de 1860. En consecuencia, las pruebas para medir el rendimiento de las mezclas asfálticas también han experimentado cambios. Desde la década de 1990, la investigación en el ámbito del asfalto se ha centrado en aspectos como los ligantes, las distribuciones y formas de los agregados, las condiciones de compactación en laboratorio y el desempeño de las mezclas en condiciones reales. Durante este periodo, el uso de pruebas de rendimiento

disminuyó considerablemente en favor de pruebas volumétricas, las cuales son utilizadas para determinar la proporción óptima de las mezclas asfálticas, (Newcomb and Zhou, Texas A&M Transportation Institute 2018)

“En 1987, el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de estas” PT No 271 (IMT, 2005).

Una fracción del presupuesto se asignó al desarrollo de especificaciones de rendimiento relacionadas con el asfalto, las cuales estaban estrechamente ligadas a análisis de laboratorio y aplicaciones prácticas. Este esfuerzo marcó el inicio de la creación de un nuevo sistema diseñado para especificación de materiales asfálticos, dando como resultado un innovador sistema conocido como Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement). Este sistema tiene la capacidad de detallar tanto el cemento asfáltico como el agregado pétreo, facilitando así la formulación de diseños para mezclas asfálticas y permitiendo el análisis y la predicción del rendimiento del pavimento. En este enfoque, se examinan de manera individual los componentes de la mezcla asfáltica, es decir, el agregado mineral y el asfalto, así como la interacción entre ambos cuando se combinan, PT No 271 (IMT, 2005).

Sirin *et al.* (2008) menciona que las mezclas asfálticas Superpave se han utilizado en los pavimentos de las carreteras de EE.UU. desde finales de la década de 1990. También se han utilizado ligantes modificados en algunas de las mezclas Superpave en un esfuerzo por aumentar la resistencia al agrietamiento y a las roderas de estas mezclas.

De acuerdo con Yin *et al.* (NCAT, 2021) la visión original del sistema de diseño de mezclas Superpave era incluir tres niveles, el nivel 1 se preveía para su uso en pavimentos de bajo tráfico y los requisitos de diseño de la mezcla se basarían

principalmente en las propiedades volumétricas tradicionales, el nivel 2 se utilizaría para la mayoría de los proyectos de tráfico moderado e incluiría requisitos volumétricos más un conjunto limitado de pruebas de rendimiento de la mezcla, y el nivel 3 sería para pavimentos de alto tráfico y comenzaría con un diseño de mezcla basado en la volumetría, seguido de un conjunto amplio de pruebas de rendimiento avanzadas.

Sin embargo, las pruebas de rendimiento de la mezcla propuestas en el Programa de Investigación Estratégica de Carreteras (SHRP) nunca se implementaron, excepto en unos pocos proyectos especiales, (NCHRP 20-07 2018)

En los primeros años de la implementación de Superpave, el enfoque principal era la resistencia al ahuellamiento. Los diseños de mezclas para pavimentos de tráfico moderado y alto se diseñaron para mejorar la resistencia a las roderas mediante el uso de agregados angulares, ajustes del grado del ligante y esfuerzos de compactación elevados, entre otros. Como el sistema Superpave ha avanzado en las últimas décadas, la mayoría de las agencias estatales de carreteras han reconocido que los problemas de ahuellamiento han sido virtualmente eliminados, pero también indican que la principal forma de falla para los pavimentos de asfalto es ahora el agrietamiento de una forma u otra. Hay una serie de factores que contribuyen al aumento de los problemas de agrietamiento del pavimento, entre los que se incluyen la falta de tratamiento adecuado de los problemas subyacentes del pavimento, problemas con la calidad de la construcción y problemas con el diseño de las mezclas (NCAT 2021).

Las dos propiedades clave en el sistema de diseño de mezclas Superpave son los vacíos de aire de diseño (V_a) y el volumen de ligante efectivo (V_{be}), donde V_a representa el volumen de espacio de vacíos dentro de la mezcla y se ha utilizado ampliamente como un indicador indirecto de la calidad de la mezcla, por otra parte, V_{be} representa el volumen de ligante efectivo en la mezcla, que se define como el volumen total de ligante asfáltico menos el volumen de ligante asfáltico absorbido

por el agregado, en ese sentido, V_{be} es un importante parámetro de diseño de la mezcla que afecta a la durabilidad de las mezclas asfálticas, donde se desea un V_{be} más alto para mejorar la durabilidad y la resistencia al agrietamiento.

Sin embargo, basarse únicamente en V_a y V_{be} para el diseño de la mezcla tiene limitaciones porque estos dos parámetros no proporcionan ninguna indicación sobre la calidad de los ligantes asfálticos vírgenes y reciclados o sus interacciones con diferentes tipos de aditivos asfálticos si se utilizan. Como resultado, el sistema de diseño de mezcla Superpave por sí solo puede no ser suficiente para determinar el uso de pavimentos asfálticos recuperados (RAP), tejas asfálticas recicladas (RAS), y aditivos asfálticos (NCAT 2021).

Hay una variedad de posibles factores que contribuyen a que los proyectos tengan problemas de agrietamiento, incluyendo la falta de tratamiento adecuado de los problemas subyacentes del pavimento, problemas con la calidad de la construcción y problemas con los diseños de las mezclas. En consecuencia, la mayoría de los Departamentos Estatales de Transporte han ajustado sus requisitos de diseño de mezclas a partir de las normas de diseño de mezclas de la AASHTO Superpave en un intento de mejorar la durabilidad de sus mezclas, (West *et al.*, 2018)

Lamentablemente, los pequeños ajustes o retoques en el enfoque de diseño Superpave no han podido resolver algunos de los problemas fundamentales. La creciente conciencia de las deficiencias del sistema de diseño de mezclas Superpave ha llevado a muchas personas de todas las partes de la comunidad de pavimentos asfálticos a buscar un nuevo enfoque para el diseño de mezclas asfálticas, (NCHRP 20-07 2018)

Otra limitación del sistema de diseño de mezclas Superpave es que la V_{be} depende en gran medida de la gravedad específica del agregado (G_{sb}), que no es una propiedad confiable, debido a que algunas fuentes de los materiales podrían tener variaciones significativas de G_{sb} dentro de un mismo año debido a la geología del lugar y a las operaciones mineras.

2.4 Diseño de Mezcla Balanceado (BMD)

En septiembre de 2015, el antiguo Grupo de Trabajo de Expertos (ETG, por sus siglas en inglés) en Mezclas y Construcción de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) formó un Grupo de Trabajo de Diseño de Mezclas Equilibradas, que estaba formado por investigadores de asfalto, profesionales e ingenieros de pavimentos de agencias de carreteras federales y estatales con la finalidad de definir un diseño balanceado de mezclas (BMD por sus siglas en inglés) como "el diseño de mezclas asfálticas mediante pruebas de rendimiento en especímenes adecuadamente acondicionados que abordan múltiples modos de deterioro teniendo en cuenta el envejecimiento de la mezcla, el tráfico, el clima y la ubicación dentro de la estructura del pavimento.

El cuál básicamente consiste en el uso de una prueba de ahuellamiento para definir un contenido máximo de asfalto más allá del cual probablemente se producirían fallos de deformación permanente y una prueba de agrietamiento que indicaría un contenido mínimo de asfalto por debajo del cual podría producirse un fallo de agrietamiento, este marco se conoce como diseño de mezcla balanceado (BMD) Texas A&M Transportation Institute (2018).

El Diseño Balanceado de Mezclas (BMD) mejora la probabilidad de que una mezcla asfáltica posea la combinación y calidad adecuadas de sus componentes con el fin de superar los criterios establecidos en las pruebas de rendimiento para asegurar la durabilidad a largo plazo.

Dadas las condiciones y los problemas previamente expuestos, para este estudio se eligió complementar el método Superpave con el Diseño Balanceado de Mezclas (BMD). En el BMD, se busca lograr un equilibrio entre los componentes de la mezcla para garantizar un rendimiento óptimo, empleando el análisis del rendimiento y la implementación del Ensayo de Agrietamiento de la Mezcla por Tracción Indirecta (IDEAL-CT) como parte del proceso. Esto se debe a que, en los

3. METODOLOGÍA

La fase inicial consistió en una evaluación volumétrica de la mezcla de asfalto y agregado para determinar la cantidad inicial de asfalto. Una vez finalizado este proceso, se llevaron a cabo pruebas para verificar la resistencia al agrietamiento y la deformación permanente. En el caso de que alguno de estos aspectos no cumpliera con los criterios deseados, se ajustaba la cantidad de asfalto y las proporciones de la mezcla para alcanzar el rendimiento esperado.

Una vez superada esta etapa, se llevaron a cabo pruebas para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad, y una vez aprobadas, el diseño se convierte en la fórmula de trabajo.

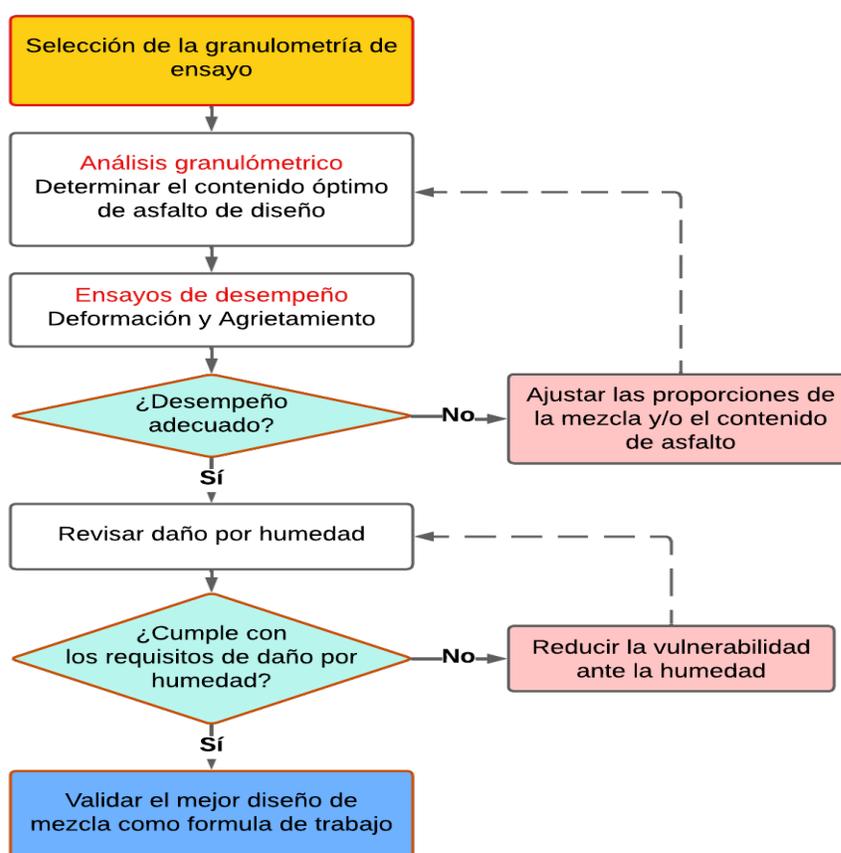


Figura 3-1 Metodología del diseño

3.1 Obtención del agregado pétreo

Como punto de partida en este trabajo de investigación, se realizó una búsqueda para ubicar los bancos de materiales que mejor cumplieran con los requisitos de calidad de los agregados pétreos solicitados por normativa.

En las siguientes figuras se ubica el banco de material muestreado.

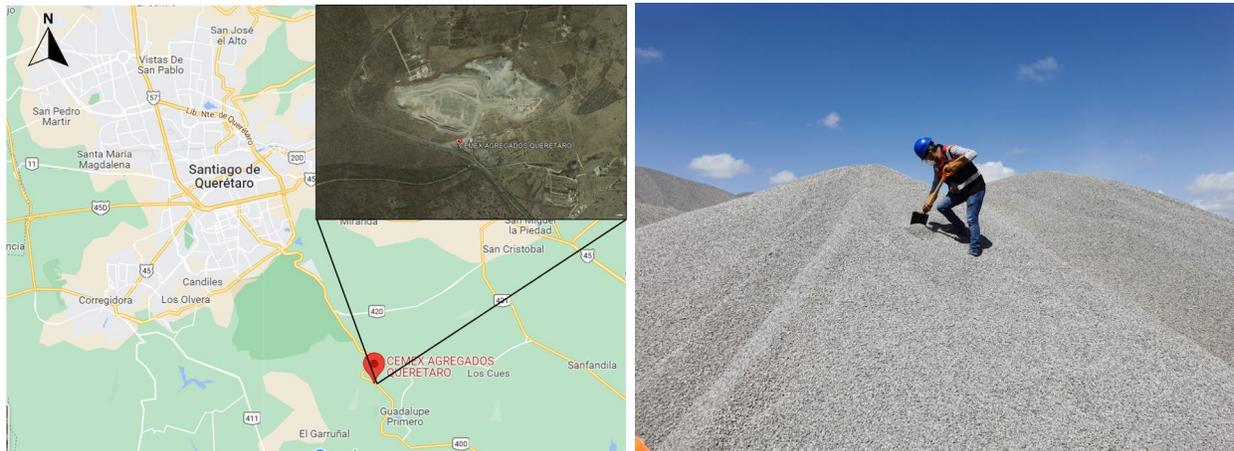


Figura 3-2 Ubicación de banco de material "Cemex la Loma"

Fuente: Google Maps

De los bancos identificados se realizó el muestreo conforme lo indica la norma ASTM D75 sobre muestreo de agregados a fin de obtener una muestra representativa del material, como se muestra a continuación



Figura 3-3 Almacenamiento de los agregados pétreos



Figura 3-4 Muestreo de los agregados pétreos

3.2 Obtención y clasificación del RAP

El material asfáltico recuperado se obtuvo de los trabajos de fresado

ejecutados en los diferentes frentes de trabajo de la Autopista Monterrey – Nuevo Laredo

3.2.1 Extracción del asfalto en Rotarex

El proceso para separar el agregado pétreo del asfalto en el RAP se recurrió al equipo de extracción Rotarex, la prueba se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM2172



Figura 3-3 Equipo de extracción del asfalto en el RAP

3.3 Selección inicial de la granulometría de ensayo

“Históricamente las especificaciones de las granulometrías han consistido en bandas maestras (límite superior e inferior) en los cuales se especifica el máximo y mínimo porcentaje que pasa para cada malla” PT No 299 (IMT, 2006).

Con base en la norma ASTM C136/AASHTO T 27, se realizaron las combinaciones granulométricas para determinar el porcentaje adecuado del agregado pétreo de los diferentes bancos de Material y el pavimento asfáltico recuperado, a manera de cumplir con la granulometría de diseño.

Superpave propone para la estructura del agregado de diseño, ya sea para un material de un solo origen o combinados con 2 o más materiales de diferentes orígenes, representarlos en una sólo curva granulométrica, cumpliendo con cierto criterio de aceptación, el cual consiste en 4 puntos de control, uno en cada tamiz

diferente: el tamiz máximo, el tamiz máximo nominal, el tamiz de 2,36 mm y el tamiz de 75 micras.

El tamiz máximo nominal es un tamaño de tamiz mayor que el primer tamiz para retener más del diez por ciento del agregado combinado. El tamaño de tamiz máximo es un tamaño de tamiz mayor que el tamiz nominal. Cualquier propuesta de gradación de la mezcla de prueba tiene que pasar entre los puntos de control establecidos en los cuatro tamices.

En la siguiente tabla se muestra los requerimientos en la granulometría de diseño.

Tabla 3-1 Granulometría del diseño de la mezcla, Superpave Fundamentals

Gradation Criteria for 19.0 mm Nominal Mixture			
Gradation Control Item	Sieve Size, mm	Minimum, %	Maximum, %
Control Points	25.0	100.0	
	19.0	90.0	100.0
	12.5		90.0
	2.36	23.0	49.0
	0.075	2.0	8.0

3.4 Realizar el diseño volumétrico

Una herramienta que puede ayudar a analizar las propiedades del HMA es el diagrama de componentes, un diagrama que ilustra los componentes individuales que conforman el HMA: asfalto, agregado y aire. El diseño simplificado del diagrama de componentes ayuda a visualizar las relaciones volumétricas y de masa que se utilizan en el análisis del HMA.

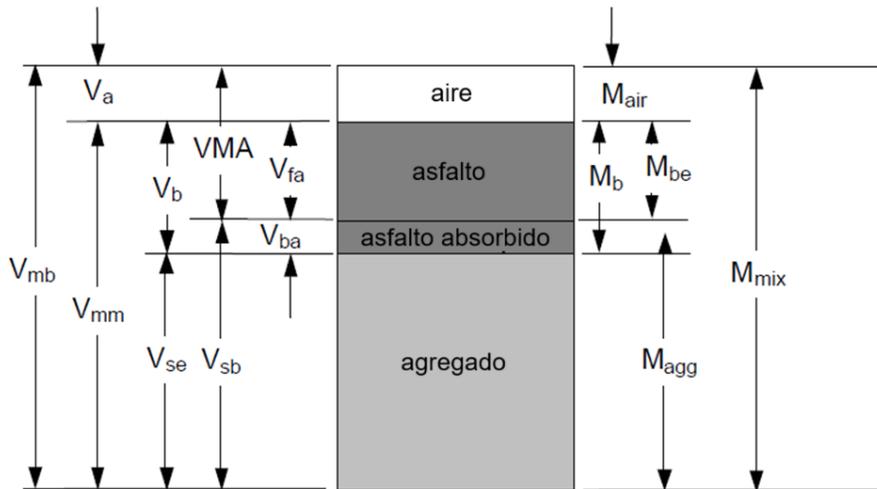


Figura 3-4 Diagrama del análisis volumétrico

- VMA = Volumen de vacíos en el agregado mineral
- Vmb = Volumen a total de la mezcla compactada
- Vmm = Volumen sin vacíos de la mezcla de pavimentación
- Vfa = Volumen de vacíos rellenos de asfalto
- Va = Volumen de vacíos de aire
- Vb = Volumen de ligante asfáltico
- Vba = Volumen de ligante asfáltico absorbido
- Vsb = Volumen de agregado mineral (por gravedad específica a granel)
- Vse = Volumen de agregado mineral (por gravedad específica efectiva)
- M = Masa total de la mezcla asfáltica
- Mb = Masa de ligante asfáltico
- Mbe = Masa de ligante asfáltico efectivo
- Magg = Masa del agregado
- M air = Masa de aire = 0

Este enfoque comienza con el método actual de diseño de mezcla volumétrica, es decir, Superpave, para establecer una clasificación inicial de los agregados y el contenido de ligante. Alternativamente, se puede utilizar un diseño de mezcla existente aprobado por alguna dependencia. En este apartado el diseño

se apegará a las Normas y recomendaciones propuestos por el método Superpave.

La premisa central en el diseño de la mezcla volumétrica Superpave es que la cantidad correcta de ligante asfáltico se utiliza en cada mezcla de prueba para que cada mezcla alcance exactamente el 96% de la gravedad específica teórica máxima (Gmm) o el 4% de contenido de vacíos de aire en el número de giros de diseño (Ndesing).

Los investigadores de SHRP crearon un método de compactación de laboratorio conocido como Compactador Giratorio Superpave, también conocido como SCG, con el cual se logró compactar las muestras de manera similar a la que se obtendría en campo en las condiciones de tráfico y clima específicas.

El fundamento del SGC se originó a partir de una versión adaptada del compactador giratorio de Texas, el cual emplea los principios del compactador giratorio francés. El compactador giratorio de Texas es capaz de densificar los especímenes de manera realista. El diámetro de la muestra es de 150 mm y puede compactar mezclas con agregados de hasta 50 mm de tamaño máximo (37.5 mm de tamaño máximo nominal). El equipo consta de los siguientes componentes, tal y como se muestra en la figura 3.5

- Marco de reacción, base rotatoria, y motor
- Sistema de carga, pisón de carga, y medidor de presión
- Medición de altura y sistema de registro
- Molde y plato de base

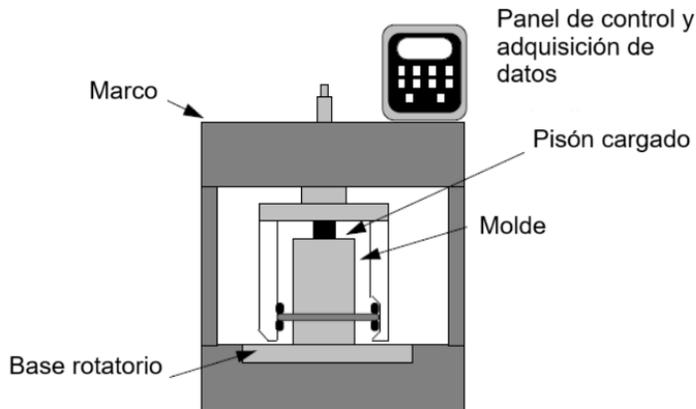


Figura 3-5 Esquema del equipo de compactación

El compactador giratorio Superpave (SGC), es el elemento clave en el diseño de mezclas basado en la volumetría. Una mezcla se considera exitosa si satisface criterios volumétricos estrictos tanto en el número inicial de giros como en el número de giros de diseño ($N_{initial}$ y N_{design} , respectivamente). Estos niveles, a su vez, son establecidos por el tráfico total proyectado para la vida útil del pavimento, expresado en términos de ejes equivalentes (ESALs).

En el proceso de mezclado, el equipo de compactación tiene la capacidad de acomodar las partículas de agregado de una manera similar al obtenido en campo, además, puede medir la compactación, lo que permite identificar mezclas sensibles y problemas asociados con la compactación.

Durante la compactación en el SGC, el pisón aplica una presión de 600 kPa sobre el espécimen. Un medidor se encarga de mantener constante esta presión durante todo el proceso de compactación. El molde utilizado en el SGC tiene un diámetro interior de 150 mm y cuenta con un plato en la base que proporciona confinamiento. La base del SGC gira a una velocidad de 30 revoluciones por minuto durante el proceso de compactación, con el molde posicionado a un ángulo de compactación de 1.25 grados

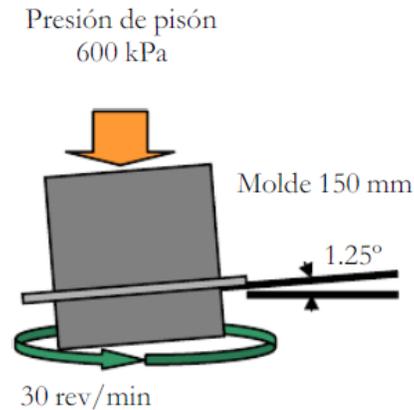


Figura 3-6 Configuración del molde SGC

La medición de la altura del espécimen es posible durante el proceso de compactación, siendo esta una de las características fundamentales del SGC. La densidad del espécimen puede determinarse durante la compactación al conocer la masa colocada en el molde, el diámetro interior del mismo y su altura. El registro de la posición del pisón durante el ensayo permite la medición de la altura del espécimen, proporcionando información detallada sobre sus características.

En la siguiente Tabla, se indica el esfuerzo de compactación del SGC.

Tabla 3-2 Esfuerzo de compactación giratorio, Superpave Mix Desing

ESALs de diseño (millones)	Parámetros de compactación			Aplicaciones típicas
	Ninicial	Ndiseño	Nmáximo	
< 0.3	6	50	75	En carreteras con tráfico muy ligero , vías locales y calles de ciudades donde el tráfico de camiones está prohibido o es muy pequeño.
0.3 a < 3	7	75	115	Vías colectoras o accesos a ciudades. Tráfico medio
3 a < 30	8	100	160	Carreteras con dos carriles, multicarriles divididos y accesos parcial o completamente controlados. Calles de ciudades con tráfico medio a alto , rutas estatales, rutas federales y algunas intersecciones rurales
≥ 30	9	125	205	Mayoría del sistema interestatal tanto rural como urbano. Tráfico alto

3.4.2 Preparación y compactación de especímenes

Dependiendo del propósito específico, se pueden utilizar tres dimensiones distintas de especímenes. En el caso de especímenes compactados destinados al diseño de mezclas Superpave, las dimensiones son de 150 mm de diámetro por 115 mm de altura, con una cantidad aproximada de 4700 gramos de agregado. La determinación de la gravedad específica teórica máxima se realiza mediante una muestra suelta, generalmente con un rango de 1000 a 2500 gramos. Por otro lado, el ensayo de daño por humedad requiere un espécimen de 95 mm de altura y alrededor de 3700 gramos de agregado. Para llevar a cabo el ensayo de ahuellamiento por Rueda cargada de Hamburgo, se necesita un espécimen de 50 a 60 mm de altura y aproximadamente entre 2000 y 2500 gramos de agregado. Finalmente, el ensayo del índice de tolerancia al agrietamiento (CT-Índice) se realiza con un espécimen de 62 mm de altura y cerca de 2500 gramos de agregado.

3.4.3 Selección del óptimo contenido de asfalto

Durante el proceso de la compactación, la altura del espécimen se mide y registra en cada revolución. La gravedad específica aparente de la mezcla, G_{mb} , se estima mediante cálculos que involucran el diámetro del molde y la altura registrada del espécimen, siguiendo las pautas establecidas en la normativa AASHTO R35.

3.5 Realizar los ensayos de ahuellamiento

El diseño inicial de la mezcla se comprueba entonces con la prueba de ahuellamiento seleccionada (Rueda cargada de Hamburgo siguiendo el procedimiento como lo indica la norma AASHTO T 324 "Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures", dicha prueba se realiza con la finalidad de identificar fallas prematuras debidas a la susceptibilidad a la formación de roderas en mezclas asfálticas.

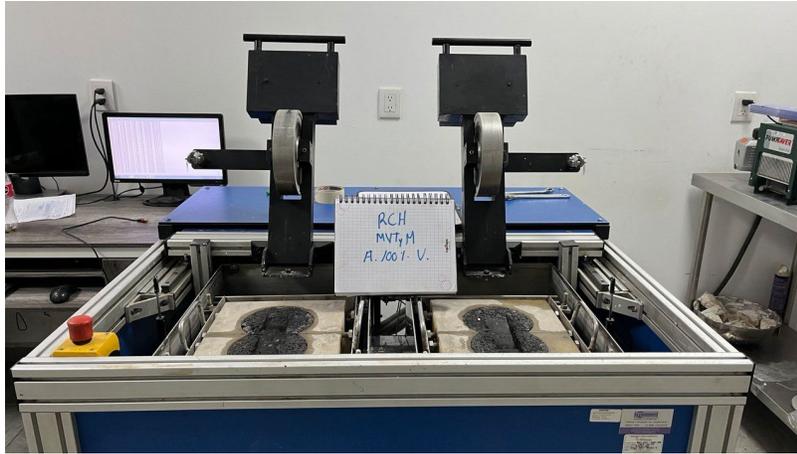


Figura 3-7 Equipo Rueda Cargada de Hamburgo.

3.6 Realizar los ensayos agrietamiento

Ensayo de Agrietamiento de la Mezcla por Tracción Indirecta (IDEAL-CT por sus siglas en inglés) para determinar la propagación de la grieta dado a que en los diseños convencionales no se realizan ensayos de agrietamiento, además, al tratarse de una mezcla combinada con RAP es propensa a presentar fallas prematuras por agrietamiento, por otra, el ensayo IDEAL-CT es una prueba sencilla de realizar, eficiente y rentable por lo que la convierte en una prueba ideal para determinar el índice de agrietamiento, de este modo podemos conocer el porcentaje ideal de RAP para obtener un buen diseño.

El ensayo IDEAL-CT (Indirect tensile asphalt cracking test) se ejecuta sobre probetas cilíndricas a las condiciones de carga, temperatura, geometría que señala la especificación ASTM D8225 – 19 “Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature”, cuyo propósito es obtener un parámetro de resistencia al agrietamiento (CT index), el cual permitirá conocer las cantidades idóneas de RAP en la mezcla.

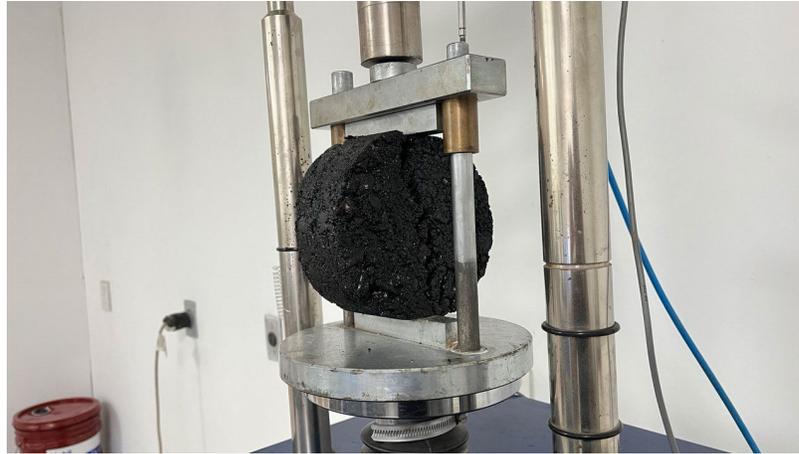


Figura 3-8 Equipo Índice de agrietamiento (IDEAL - CT)

3.7 Realizar ensayo de daños por humedad

Después de pasar las pruebas de ahuellamiento y agrietamiento, evaluar la mezcla con la prueba de daño por humedad seleccionada (Ensayo de susceptibilidad a la humedad TSR).

El último paso en el proceso de diseño de mezclas Superpave implica la evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad. Este procedimiento, conocido como AASHTO T283 o "Resistance of Compacted Bituminous Mixtures to Moisture Induced Damage," se realiza en la combinación específica de agregados y contenido de asfalto establecido en el diseño. Los especímenes para este ensayo se compactan con aproximadamente un 7% de vacíos de aire.

La preparación de los especímenes incluye un ciclo opcional de saturación por congelación, seguido de 24 horas de deshielo a 60 °C. Durante la prueba, se evalúa la resistencia a la tensión indirecta de los especímenes. La sensibilidad al daño por humedad se calcula como la relación entre la resistencia a la tensión promedio de los especímenes acondicionados y la resistencia a la tensión promedio de los especímenes de control. Se establece que la pérdida de resistencia no debe

ser inferior al 80%.



Figura 3-9 Equipo para la evaluación de daños por humedad

3.8 Análisis de resultados

Si el diseño pasa el criterio de la prueba de daño por humedad (Ensayo de susceptibilidad a la humedad TSR), se establece la fórmula de la mezcla de trabajo para la producción.

En caso contrario, es necesario añadir agentes anti-huellas, como cal hidratada, y la mezcla modificada se vuelve a evaluar con la misma prueba de daños por humedad hasta que se obtenga un resultado satisfactorio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los agregados pétreos utilizados provienen del Banco de Material Cemex “Agregados Querétaro”, ubicado en el municipio de Huimilpan, Querétaro, con coordenadas: Latitud: 20.497898°, Longitud:100.318745°.

4.1 Característica de los agregados pétreos

Los requisitos de calidad de los agregados pétreos solicitados por normativa se indica en la Tabla 4-1, en donde se observa el cumplimiento de cada uno de los parámetros requeridos. El agregado pétreo utilizado en el presente trabajo tiene un origen basáltico.

Tabla 4-1 Caracterización de los agregados pétreos

Propiedad física	Norma	Grava 3/4"	Sello (3/8)	Arena no. 4	Grava rap	Arena rap	especificación
Gravedad Específica Bruta, Gsb		2.819	2.805	2.670	2.791	2.598	> 2.4
Gravedad Específica Aparente, Gsa	ASTM C 127	2.904	2.900	2.898	2.867	2.847	-
Absorción, %		1.04%	1.20%	2.96%	1.64%	2.54%	-
Pruebas en el agregado fino							
Angularidad, %	AASHTO T 304						40% mín.
Equivalente de Arena, %	ASTM D 2419			78%			50% mín.
Azul de Metileno, mg/g	AMAAC RA 05			15			15 máx.
Pruebas en el agregado grueso							
Desgaste de Los Ángeles, %	ASTM C 131	8.2%					30% máx.
Micro-Deval, %	AASHTO T 327	10.1%					15% máx.
Intemperismo Acelerado (Sulfato Sodio), %	ASTM C88	4.7%					15% máx.
Partículas con 1 Cara Fracturada, %		100.0%					100% mín.
Partículas con 2 ó más Caras Fracturadas, %	ASTM D 5821	100.0%					90% mín.

4.2.1 Calidad del material asfáltico

En este estudio el asfalto utilizado se clasificó según su grado de desempeño como un PG 64-22 H, y de acuerdo con su carta de viscosidad el rango de temperatura de mezclado y compactación son de 140 – 145 °C y 151.6 – 158.1 °C. respectivamente, Fig. 4-2.

Los Grados de Desempeño (PG, por sus siglas en inglés) son aquellos cuyo comportamiento en pavimentos se define en base a las temperaturas máximas y mínimas previstas en el lugar de aplicación, la intensidad anticipada del tráfico y la velocidad de operación de la carretera. Estos grados garantizan un rendimiento adecuado para resistir deformaciones, agrietamientos por bajas temperaturas y agrietamientos por fatiga en condiciones de operación específicas. Estas condiciones se han establecido mediante correlaciones con pruebas y tratamientos especiales, generando simulaciones de envejecimiento a corto y largo plazo, (N·CMT·4·05·004/18), el análisis de la calidad del cemento asfáltico se presenta en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2 Calidad del asfalto

Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Densidad	ASTM D70-18	25 °C	G _b	1.026	N/A
Punto de Inflamación	ASTM D8254-19	N/A	PI	297.036 °C	≤ 230 °C
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	0.388 Pa·s	≤ 3 Pa·s
Punto de Reblandecimiento	ASTM D36-14	N/A	PR	48.350 °C	≥ 55 °C
Separación, diferencia anillo y esfera	ASTM D71713/M-MMP-4-05-022/02	N/A	Sep	No aplica °C	≤ 2 °C
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024/02	25 °C	RET	8.000 %	No aplica
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	G*/senδ	1.385 kPa	≥ 1 kPa
Envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-19					
Cambio de masa	ASTM D2872-19	163 °C	CM	-1.271 %	≤ 1.0%
Recuperación elástica en ductilómetro	M-MMP-4-05-024/02	25 °C	RED	33.000 %	No aplica
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	G*/senδ	7.94 kPa	≥ 2.2 kPa
Recuperación elástica por esfuerzo múltiple	ASTM D7405-20	64 °C	Jnr 3.2	11.99 kPa ⁻¹	No aplica
			RE 3.2	0.91 %	
Envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-19					
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	25 °C	G*(senδ)	2609 kPa	≤ 5,000 kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	12 °C	S	117 MPa	≤ 300 MPa
			m	0.308	≥ 0.300

Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:

PG	64	-	22	" V "
----	----	---	----	-------

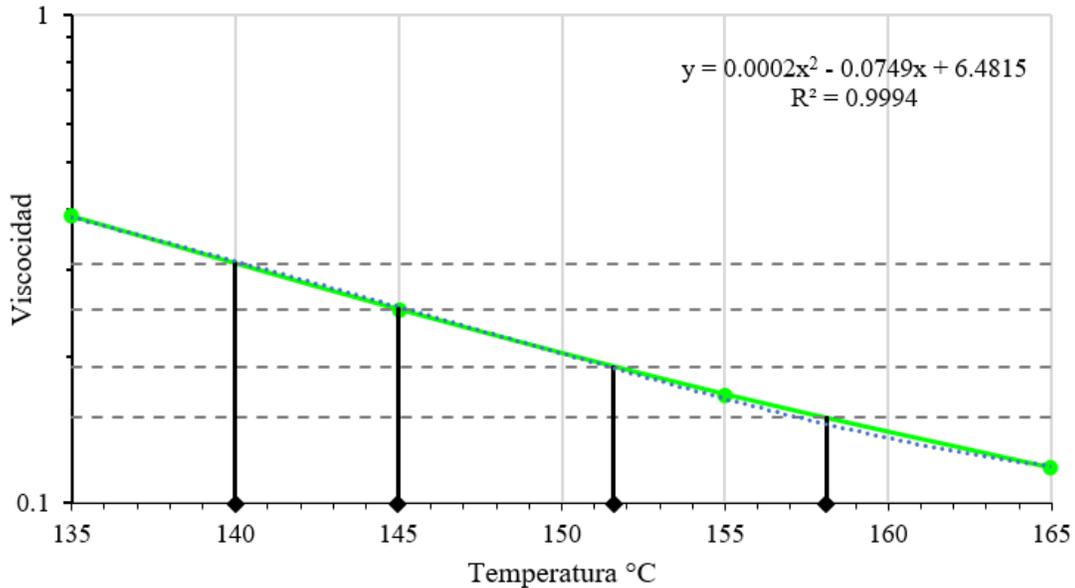


Figura 4-2 Curva de mezclado y compactación

4.3 Diseño volumétrico

Con base en la norma ASTM C136/AASHTO T 27, se propusieron las combinaciones granulométricas con la finalidad de cumplir con los parámetros indicados en la normativa antes mencionada, en total se propusieron 2 combinaciones diferentes, uno para la mezcla virgen (de control) y el segundo para la mezcla combinada con RAP.

4.3.1 Diseño Base

Para el diseño de referencia se consideró un nivel de diseño para un total de 0.3 a <3 millones de ejes equivalentes (ESAL's) con el objetivo de establecer los parámetros a evaluar siguiendo las recomendaciones de la metodología Superpave. Para ello, la granulometría de diseño se definió a partir del ajuste de la curva combinada de los pétreos utilizando agregados minerales 100% de origen virgen, los cuales fueron grava de 3/4", sello de 3/8" y arena, en una proporción de 25%, 30% y 45% respectivamente (Fig. 4-3), posterior al cumplimiento de la granulometría, se determinó el contenido óptimo de asfalto con el objetivo de alcanzar un volumen de vacíos en la mezcla del 4%, además, se verificó que se cumplieran con demás parámetros

volumétricos establecidos en la metodología, como son: los vacíos del agregado mineral (VAM), vacíos llenos con Asfalto (VAF), porción de fino (DP), gravedad específica de la mezcla compacta (Gmb) y la gravedad específica teórica máxima (Gmm).

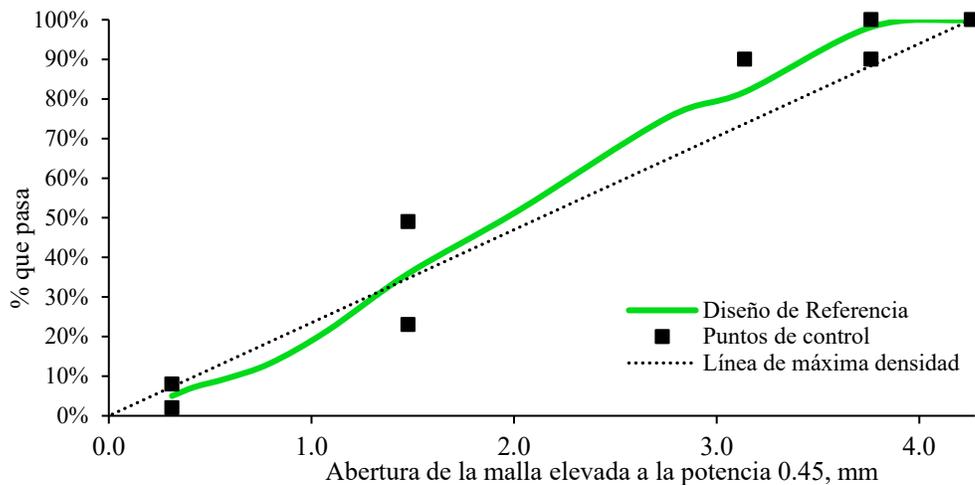
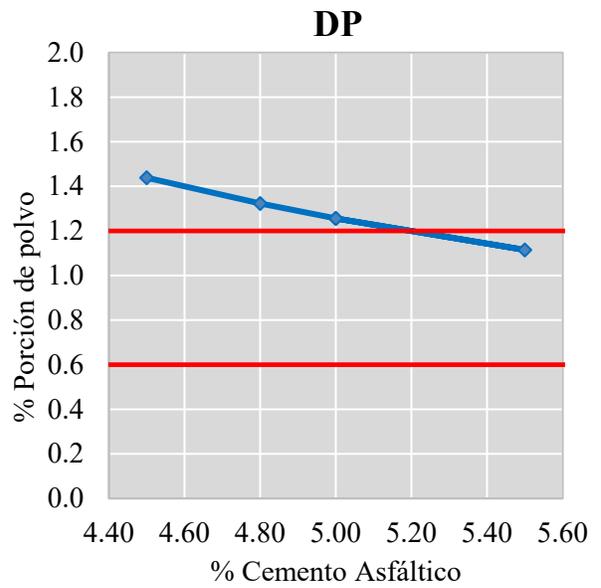
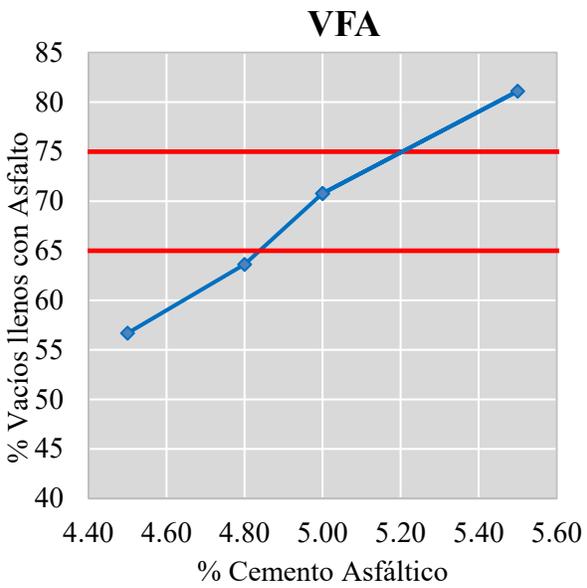
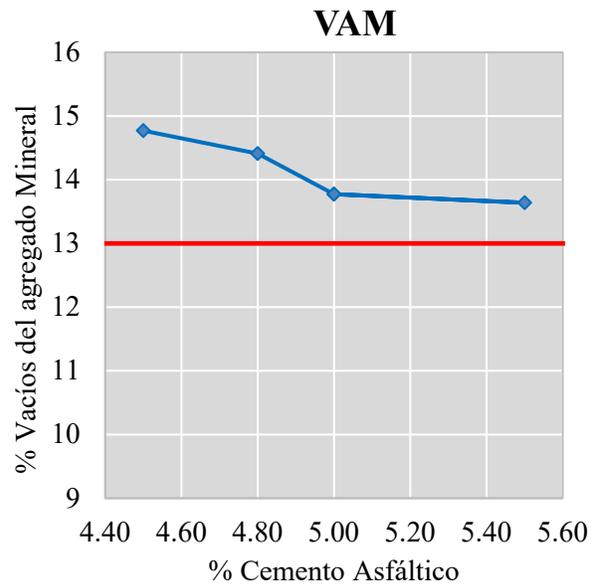
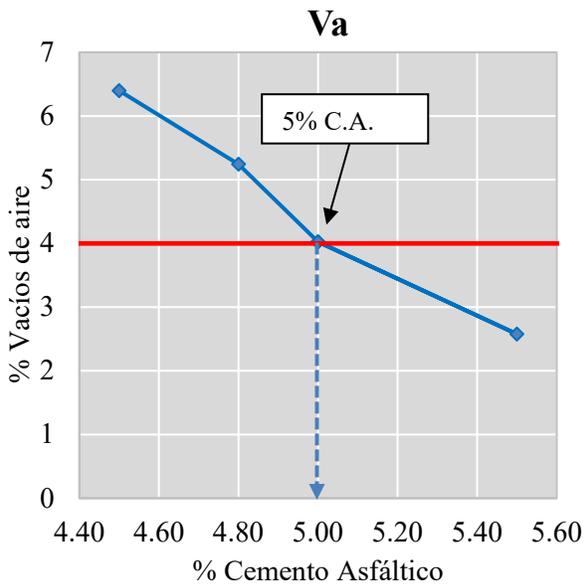


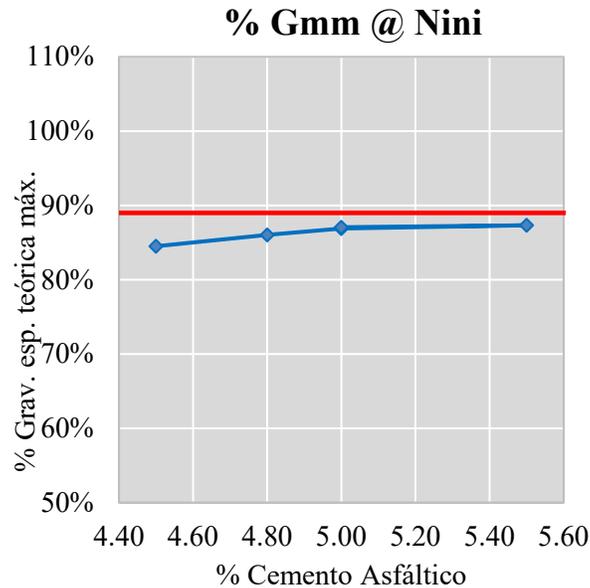
Figura 4-3 Distribución granulométrica de la mezcla de control T. 3/4"

Para encontrar el contenido óptimo de asfalto se evaluaron las propiedades volumétricas a 4 mezclas con distintas proporciones de ligante, dichos resultados se presentan en la Tabla 4-3, en el cual se observa que, con el 5% de ligante asfáltico se cumplen con los parámetros requeridos.

Tabla 4-3 Análisis volumétrico de la mezcla.

Esp. No.	PB, %	Gmm	W seco (A)	W sum (B)	W ssd	Vol.	% Prom. Gmm @ Ndis								Gmb Prom @ Nini	% Gmm @ Nini
							Va, %	VAM, %	VFA, %	Pbc, %	DP	Gmb Prom @ Nini	% Gmm @ Nini			
1A	4.50	2.636	4698.2	2803.2	4705.8	1902.6	2.467	93.6%	6.4	14.8	56.7	3.5	1.4	2.228	84.5%	
1B	4.50		4694.5	2800.1	4704.2	1904.1										
2A	4.80	2.623	4853.1	2906.7	4863.1	1956.4	2.486	94.8%	5.2	14.4	63.6	3.8	1.3	2.257	86.0%	
2B	4.80		4869.9	2921.9	4877.2	1955.3										
3A	5.00	2.615	4882.5	2942.3	4889.7	1947.4	2.509	96.0%	4.0	13.8	70.8	4.0	1.3	2.272	86.9%	
3B	5.00		4897.6	2954.2	4904.2	1950.0										
4A	5.50	2.593	4884.2	2956.2	4889.2	1933.0	2.524	97.3%	2.7	13.7	80.6	4.5	1.1	2.263	87.2%	
4B	5.50		4864.3	2940.8	4869.7	1928.9										





4.3.2 Diseño con RAP

Para el diseño combinado con material recuperado, se propusieron 3 mezclas adicionales con RAP en una proporción de 20, 30 y 40% con respecto al peso total de la mezcla siguiendo las recomendaciones del reporte 673 del manual de diseño del NCHRP, la granulometría propuesta se presenta en la figura 4-4; para conocer el porcentaje óptimo de asfalto, se parte del óptimo del diseño base, y se le descuenta el porcentaje aportado por el pavimento recuperado (el cual es de 3.2%). Los resultados del análisis volumétrico se muestran en la Tabla 4-4, en el cual se aprecia que el contenido de asfalto óptimo obtenido es menor que el óptimo del diseño, en este caso resultó ser de 4.80% para la mezcla con 20% de RAP, 4.65% y 4.53% para las mezclas con 30% y 40% de RAP respectivamente, cabe mencionar que el agregado del RAP tuvo una menor absorción de asfalto dado a que ya presentó este efecto en su diseño original.

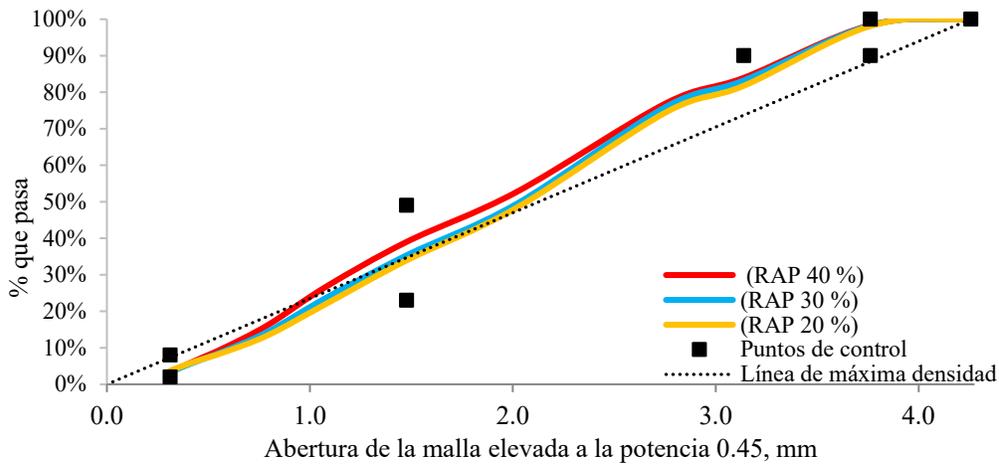


Tabla 4-4 Análisis volumétrico de la mezcla.

Esp. No.	PB, %	Gmm	W seco (A)	W sum (B)	W ssd	Vol.	Prom. Gmb	% Gmm @ Ndis	Va, %	VAM, %	VFA, %	Pbe, %	DP	Gmb Prom @ Nini	% Gmm @ Nini
1A	5.00	2.598	4836.5	2906.6	4839.2	1932.6	2.502	96.3%	3.7	10.7	65.4	2.9	1.1	2.2587268	86.9%
1B	5.00		4839.6	2907.4	4842.5	1935.1									
RAP 20%															
2A	4.36	2.625	4882.5	2938.3	4888.6	1950.3	2.503	95.3%	4.7	10.1	53.8	2.2	1.4	2.2690094	86.4%
2B	4.36		4897.6	2948.2	4905.2	1957.0									
RAP 30%															
1A	5.00	2.598	4838.3	2911.8	4841.5	1929.7	2.506	96.5%	3.5	10.6	66.5	2.9	1.1	2.2687855	87.3%
1B	5.00		4852.4	2919.2	4856.3	1937.1									
2A	4.36	2.625	4829.5	2908.8	4833.3	1924.5	2.511	95.6%	4.4	9.8	55.4	2.2	1.4	2.2505098	85.7%
2B	4.36		4824.8	2908.8	4829.7	1920.9									
RAP 40%															
1A	5.00	2.598	4863.4	2930.7	4866.4	1935.7	2.511	96.6%	3.4	10.4	67.7	2.9	1.1	2.2600094	87.0%
1B	5.00		4855.1	2924.4	4858.9	1934.5									
2A	4.36	2.625	4839.9	2921.6	4847.6	1926.0	2.514	95.8%	4.2	9.7	56.2	2.2	1.4	2.2909821	87.3%
2B	4.36		4844.6	2926.3	4852.7	1926.4									

Finalmente, en la figura 4-5 se presenta de manera gráfica el porcentaje óptimo de asfalto con base en el análisis volumétrico para los diseños combinados con RAP.

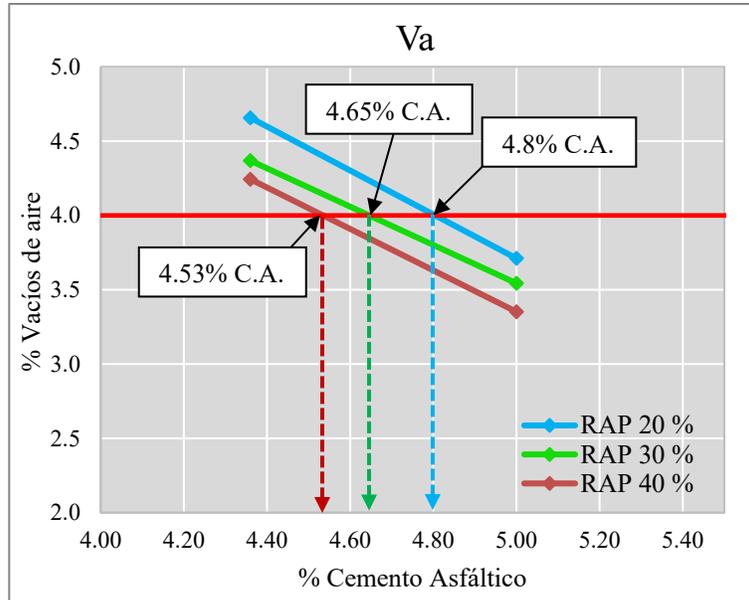


Figura 4-5 Distribución granulométrica de la mezcla de control T. ¾"

4.4 Ensayo de ahuellamiento mediante Rueda cargada de Hamburgo

La evaluación del ahuellamiento se realizó mediante el equipo de rueda cargada de Hamburgo (Figura 4-6), bajo condiciones adecuadas indicadas en la norma (AASHTO T-324).

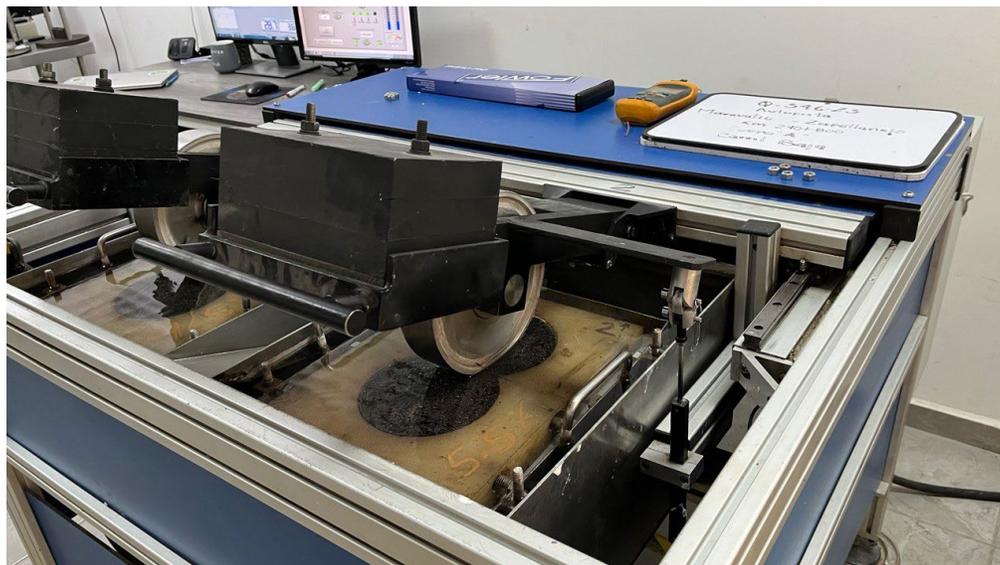


Figura 4-6 Ensayo de ahuellamiento mediante Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO-T-324)

4.4.1 Evaluación de la rodera para el diseño de referencia

Para evaluar la susceptibilidad a la formación de roderas se realizaron tres mezclas con distintos porcentajes de asfalto.

El primero con el porcentaje óptimo de asfalto (5%) el cual presentó una profundidad de rodera de 12.71 mm en promedio, sin embargo, para fines de control consideramos una rodera máximo permisible de 12.5 mm como lo recomienda el Departamento de Transporte de Texas, por lo tanto, esta mezcla no cumplió con este parámetro.

El segundo diseño se realizó disminuyendo el porcentaje de asfalto en 0.5%, con esta nueva mezcla se obtuvo una profundidad de rodera de 8.85 mm, menor que el máximo permisible, por lo que se consideró como válido.

El tercer diseño se realizó con un porcentaje de asfalto mayor al óptimo, tal y como lo indica la metodología del diseño de mezcla balanceada, sin embargo, la profundidad de rodera obtenido fue de 16.56, muy por arriba del permisible. Por lo que concluimos en este apartado que la mezcla diseñada con el porcentaje óptimo de asfalto no cumple con el parámetro requerido, por otra parte, al disminuirle el porcentaje de asfalto en una proporción de 0.5 % se logró cumplir con lo requerido, sin embargo, al disminuirle el porcentaje de asfalto la mezcla tiende a volverse rígida, por lo que es necesario evaluar la resistencia al agrietamiento. Los resultados del ensayo de rodera se presentan en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5 Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla de control (HWTT- AASHTO T 324)

	Designación de la mezcla	Contenido Asfáltico (%)	Vacios de aire (%)	Rodera (1)	Rodera (2)	Promedio Rodera
	Diseño (Menor % de asfalto)	4.5	7.08	8.62	9.09	8.85
Mezclas de control	Diseño de Referencia (% óptimo de asfalto)	5	6.62	12.74	11.67	12.20
	Diseño (Mayor % de asfalto)	5.5	7.50	16.36	16.75	16.56

El comportamiento de las roderas en las mezclas a 20,000 pasadas puede observarse

en la figura 4-7.

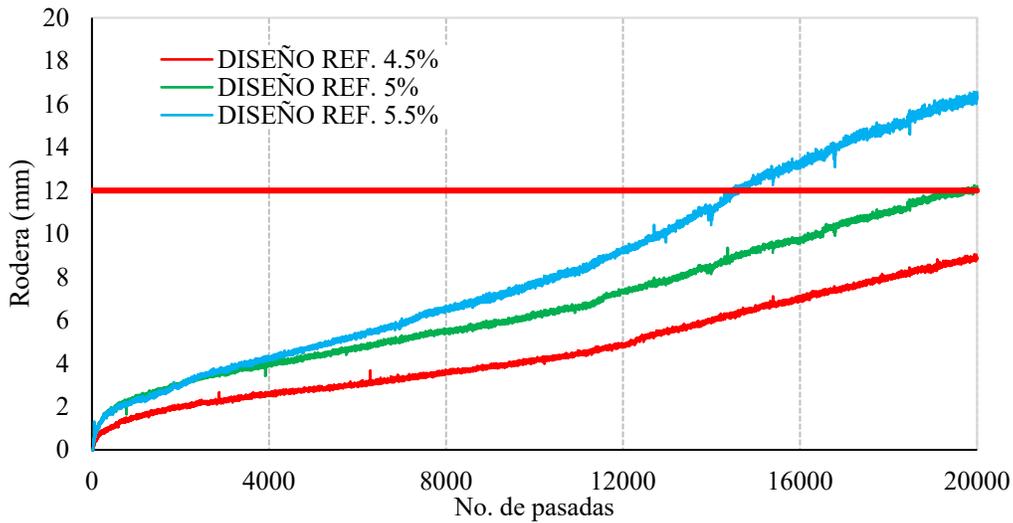


Figura 4-7 Determinación de la profundidad de rodera HWTT para el diseño Virgen.

4.4.2 Evaluación de la rodera para el diseño combinado con 20% de RAP

Al igual que en la mezcla de referencia, para el diseño combinado con RAP se realizaron 3 combinaciones distintas de asfalto, el primero con el óptimo (4.8%), el segundo con un porcentaje menor (4.3%) y el tercero con una dosificación mayor (5.3%).

De la evaluación se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 4-6, en donde se puede apreciar el cumplimiento del parámetro de rodera en las tres mezclas.

Tabla 4-6 Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla combinado con 20% de RAP (HWTT- AASHTO T 324)

	Designación de la mezcla	Contenido Asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Rodera (1)	Rodera (2)	Promedio Rodera
Mezclas combinado con 20% de RAP	Diseño (Menor % de asfalto)	4.30	6.72%	2.86	3.10	2.98
	Diseño de Referencia % óptimo de asfalto	4.80	7.15%	5.88	5.44	5.66
	Diseño (Mayor % de asfalto)	5.30	6.96%	8.08	8.36	8.22

El comportamiento de las roderas en las mezclas puede observarse en la figura 4-8

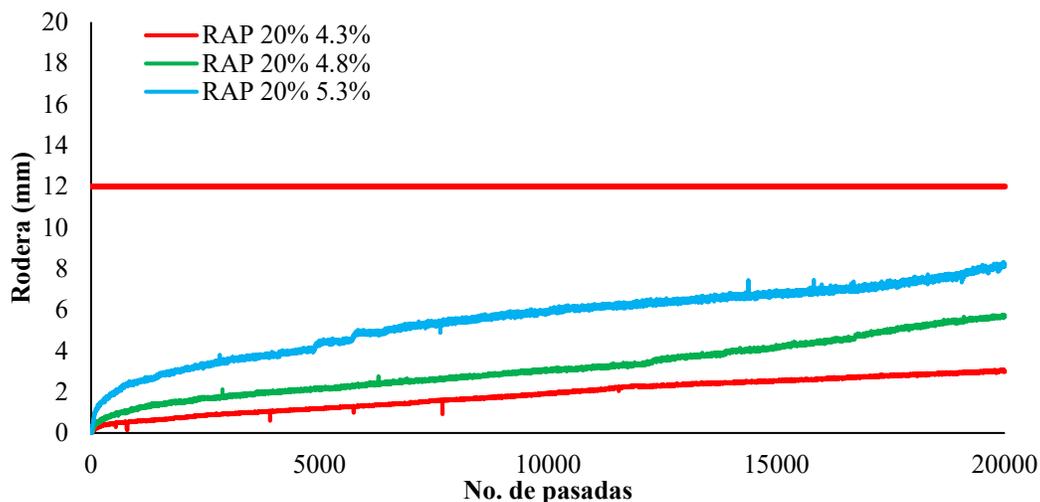


Figura 4-8 Determinación de la profundidad de rodera HWTT para el diseño combinado con 20% de RAP.

4.4.3 Evaluación de la rodera para el diseño combinado con 30% de RAP

Para el diseño con 30% de RAP, se realizaron cuatro combinaciones con distintos contenidos asfálticos, el primero con un porcentaje óptimo de asfalto de 4.65%, obtenido mediante el análisis volumétrico, el cual presentó un ahuellamiento de 2.81 mm en promedio, muy por debajo del máximo permitido, por lo que se consideró como bueno; partiendo de este resultado las tres mezclas siguientes se realizaron en proporciones de 0.5% más de asfalto con respecto al óptimo, es decir, 5.15%, 5.65% y 6.15%, esto con la finalidad de conocer en qué medida aumentaba la formación de roderas.

Los resultados se presentan en la Tabla 4-7, en el cual se observa que todas resultaron favorables (< 12mm) ya que, al no utilizar algún aditivo rejuvenecedor, las propiedades del asfalto del RAP contribuyen a rigidizar la mezcla, volviéndolo resistente a la formación de surcos.

Tabla 4-7 Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla combinado con 30% de RAP (HWTT- AASHTO T 324)

Designación de la mezcla	Contenido Asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Rodera (1)	Rodera (2)	Promedio Rodera

Mezclas combinado con 30% de RAP	Diseño (% óptimo de asfalto)	4.65	6.62	2.59	3.04	2.81
	Diseño (Mayor % de asfalto)	5.15	7.35	5.6	4.22	4.91
	Diseño (% óptimo de asfalto)	5.65	6.84	8.28	6.81	7.54
	Diseño (Mayor % de asfalto)	6.15	7.50	9.07	10.27	9.67

El comportamiento de las roderas en las mezclas puede observarse en la figura 4-9, evidenciando lo rígido que se vuelven las mezclas con contienen RAP.

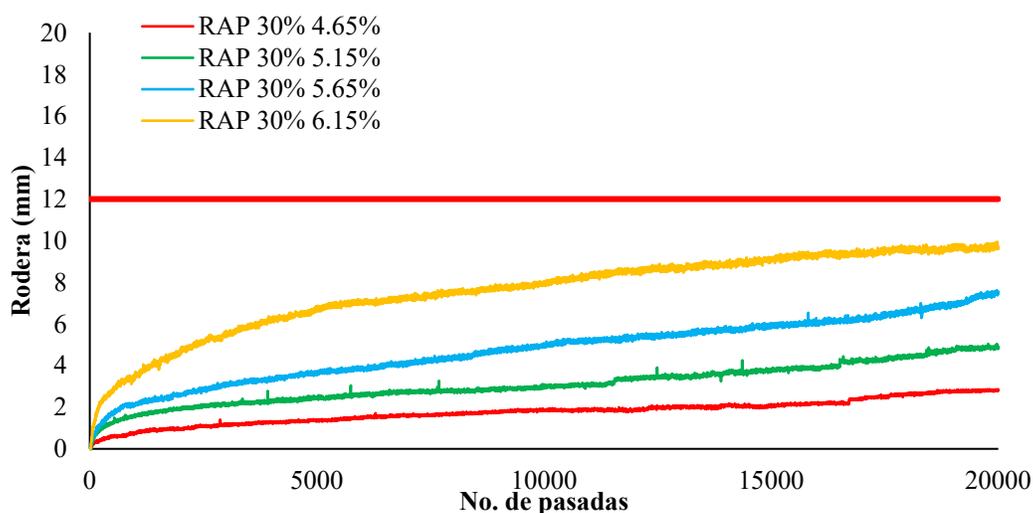


Figura 4-9 Determinación de la profundidad de rodera HWT para el diseño combinado con 30% de RAP.

4.4.4 Evaluación de la rodera para el diseño combinado con 40% de RAP

De igual forma, se evaluaron las mezclas con 40% de RAP, en donde la rigidez de la mezcla era evidente, el cual se aprecia de manera contundente en la Tabla 4-8, ya que la presencia de ahuellamiento fue mínimo.

Por otra parte, al adicionar altos porcentajes de RAP a una mezcla se presenta el efecto del fenómeno de agrietamiento, que es uno de los principales deterioros que presenta un pavimento y que, además, son los que más daños le pueden llegar a ocasionar; en este trabajo al utilizar mezclas con altos porcentajes de RAP resulta sumamente importante evaluar este comportamiento, para determinar el porcentaje máximo de pavimento recuperado a utilizar en una mezcla antes de llegar a la falla prematuro por agrietamiento.

Tabla 4-8 Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo para la mezcla combinado con 40% de RAP

(HWTT- AASHTO T 324)

	Designación de la mezcla	Contenido Asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Rodera (1)	Rodera (2)	Promedio Rodera
Mezclas combinado con 40% de RAP	Diseño % óptimo de asfalto	4.53	6.51%	2.06	1.90	1.98
	Diseño (Mayor % de asfalto)	5.03	7.15%	3.10	3.34	3.22
		5.53	6.67%	4.89	4.43	4.66

El comportamiento de las roderas en las mezclas puede observarse en la figura 4-10

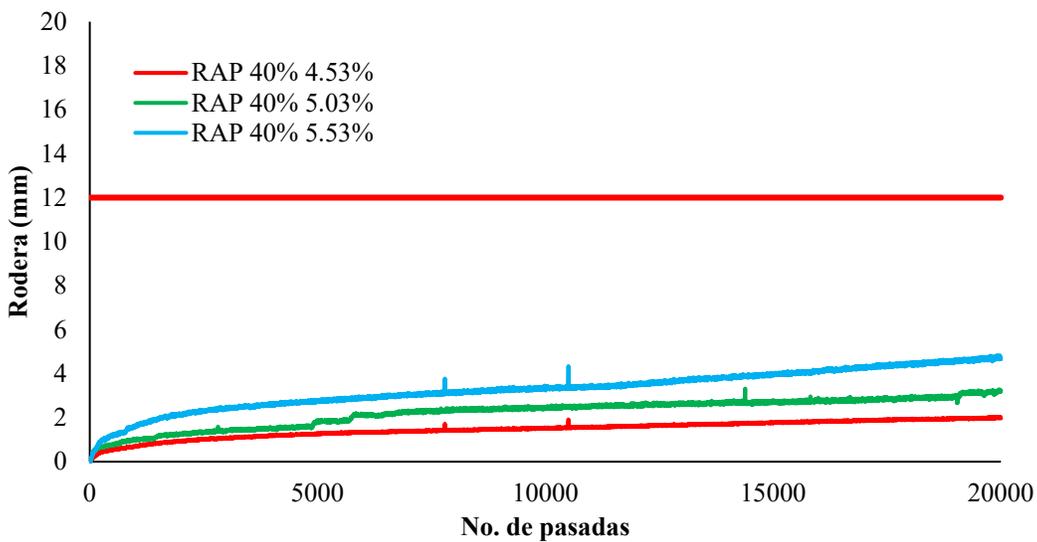


Figura 4-10 Determinación de la profundidad de rodera HWTT para el diseño combinado con 30% de RAP.

4.5 Ensayo del índice de agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL-CT)

Índice de agrietamiento (CT index)

El ensayo IDEAL-CT (Indirect tensile asphalt cracking test) se ejecuta sobre probetas cilíndricas a las condiciones de carga, temperatura, geometría que señala la especificación ASTM D8225 – 19 “Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature”, cuyo propósito es obtener un parámetro de agrietamiento (CT index) a partir de una curva de carga-desplazamiento, de tal forma que es posible determinar la resistencia al agrietamiento de las mezclas a una temperatura intermedia que puede variar en un rango de 5° C a 35° C; En la figura 4-11, se muestra la curva

típica de carga-desplazamiento, donde usando las ecuaciones 1 y 2 se puede determinar el índice de Tolerancia al Agrietamiento (CT-índice), siendo esto una implementación del diseño de mezcla balanceado.

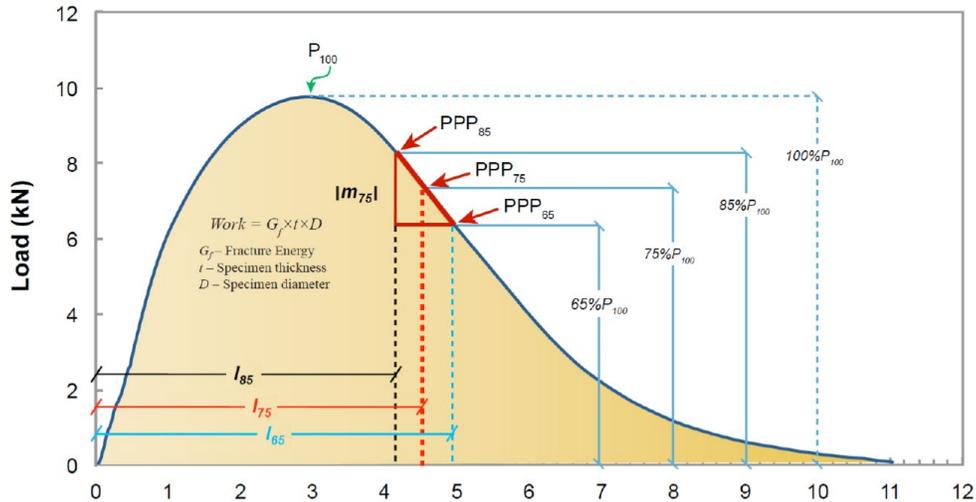


Figura 4-11 Curva carga-desplazamiento típico del ensayo de agrietamiento IDEAL-CT (ASTM D8225).

$$\text{Para especímenes con espesor de 62 mm: } CTindex = \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \frac{l_{75}}{D} \quad (1)$$

$$\text{Para especímenes con espesor de } 62 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm: } CTindex = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \frac{l_{75}}{D} \quad (2)$$

Donde, G_f es la energía de fallo calculada dividiendo el trabajo de fallo (área bajo la curva carga-desplazamiento) por el área de la sección transversal de la probeta; $|m_{75}|$ es el valor absoluto de la pendiente post-pico m_{75} ; l_{75} es el desplazamiento al 75% de la carga post-pico; D es el diámetro de la probeta; y t es el espesor de la probeta.

Posteriormente, se realizó el ensayo de agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL-CT) (Figura 4-12) para conocer el índice de agrietamiento de las mezclas propuestas, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D8225 – 19, siendo esta prueba una revisión propuesta por el método de Diseño Balanceado, que a diferencia del método Superpave, no se revisa este parámetro.



Figura 4-12 Ensayo de agrietamiento por tensión indirecta (IDEAL-CT, ASTM D8225 – 19)

4.5.1 Evaluación del índice de agrietamiento para el diseño de referencia

La revisión del índice de agrietamiento partió del diseño de referencia diseñado con el 5% de asfalto, para el cuál se obtuvo un índice de tolerancia al agrietamiento de 87.42, cabe mencionar que para este parámetro actualmente no existe alguna norma que nos indique el rango mínimo de aceptación, únicamente existen recomendaciones de diferentes departamento de transporte en Estados Unidos (DOT's por sus siglas en inglés) obtenidos mediante tramos de prueba, los cuales se encuentran registrados en el Reporte 21-03 del Centro Nacional de la Tecnología del Asfalto (NCAT, por sus siglas en inglés), por lo que resulta novedoso revisar el desempeño de las mezclas diseñadas con materiales de la región con referente al agrietamiento para su implementación futuro.

De la Tabla 4-9, podemos analizar que a medida que se reduce el porcentaje de asfalto en la mezcla, esta tiende a ser menos resistente, por otra parte, al adicionarle mayor porcentaje de asfalto, aumenta la resistencia al agrietamiento, es decir, se vuelve más flexible, sin embargo, hay que considerar que mientras más asfalto se le adiciona se vuelve más propenso a presentar fallas prematuras por roderas.

Tabla 4-9 Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla de control (IDEAL-CT)

Designación de la mezcla	Contenido Asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Carga máxima (kN)	Índice de tolerancia al agrietamiento (CT Index)
Diseño (Menor % de asfalto)	4.5	6.81	9.99	48.39
Mezclas de control Diseño de Referencia (% óptimo de asfalto)	5	7.11	8.41	87.42
Diseño (Mayor % de asfalto)	5.5	7.13	7.96	95.95

En la figura 4-13, se observa el comportamiento de las mezclas con diferentes porcentajes de asfalto, dentro de los cuales, el de menor porcentaje de asfalto soporta una mayor carga a diferencia de las otras dos, sin embargo, la pendiente de caída en la falla es mayor, por lo tanto el índice de agrietamiento es menor, por otra parte, la mezcla con mayor porcentaje de asfalto tiende a resistir menor carga, pero se observa que la pendiente después de la falla es menor, por lo tanto, presenta un mayor índice de agrietamiento.

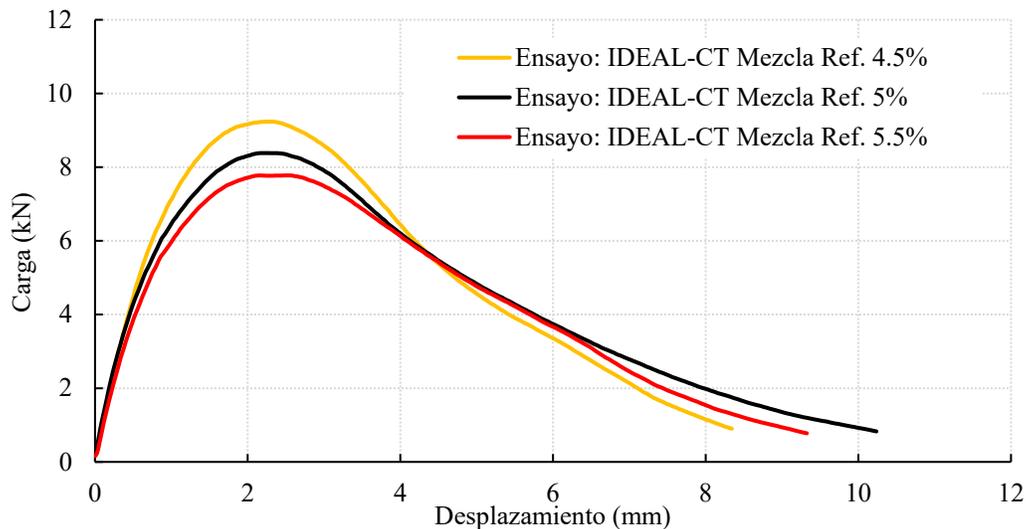


Figura 4-13 Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño Base.

4.5.2 Evaluación del índice de agrietamiento para el diseño combinado con 20% de RAP

Para la evaluación del índice de agrietamiento, se realizaron especímenes con dosificaciones iguales al del ensayo de rodera, las cuales se muestran en la Tabla 4-10. En el cual se aprecia que con el porcentaje óptimo de asfalto (4.8%) el índice de

agrietamiento obtenido es relativamente bajo con respecto al del diseño original, no obstante, al adicionarle un mayor porcentaje de asfalto esta mejora sustancialmente, obteniendo un índice de agrietamiento bastante competente.

Tabla 4-10 Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla combinado con 20% de RAP (IDEAL-CT)

	Designación de la mezcla	Contenido Asfáltico (%)	Vacios de aire (%)	Carga máxima (kN)	Índice de tolerancia al agrietamiento (CT – Index)
Mezclas combinado con 20% de RAP	Diseño (Menor % de asfalto)	4.30	6.85%	11.205	36.36
	Diseño de Referencia % óptimo de asfalto	4.80	7.34%	10.052	58.73
	Diseño (Mayor % de asfalto)	5.30	7.12%	9.171	77.06

Al igual que en las mezclas vírgenes, el comportamiento en las mezclas combinadas con RAP presentó el mismo efecto, es decir, las mezclas con menor contenido de asfalto toleraron una mayor carga, sin embargo, la pendiente después de la falla era mayor, por ende, la resistencia al agrietamiento resultó ser menor, Fig.4-15.

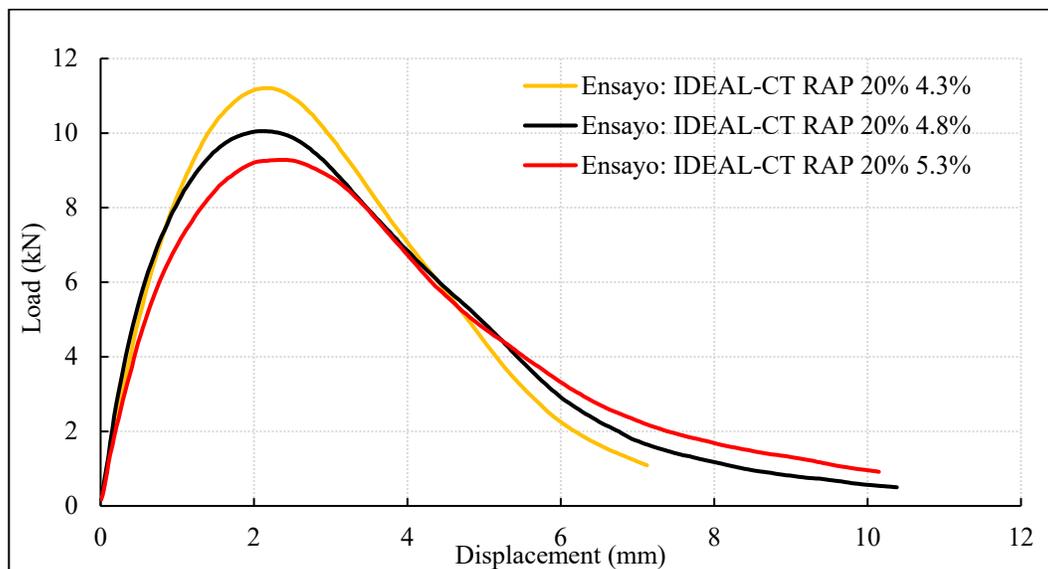


Figura 4-14 Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño combinado con 20% de RAP.

4.5.3 Evaluación del índice de agrietamiento para el diseño combinado con 30% de RAP

Del mismo modo se ensayaron las mezclas combinadas con 30% de RAP, en las

mismas proporciones de asfalto que en el ensayo de ahuellamiento.

Los resultados se presentan en la Tabla 4-11, obteniendo un índice de agrietamiento muy por debajo que el de la mezcla de referencia (mezcla virgen), este resultado era de esperarse ya que el utilizar un porcentaje bastante alto de pavimento recuperado la mezcla tiende a volverse rígida, por lo tanto, tiende a grietarse con mayor facilidad, por otra parte, se observa que las mezclas con mayor porcentaje de asfalto presentan un aumento gradual en la resistencia al agrietamiento, volviéndose más flexibles, sin embargo, en la mezcla con 6.15% de asfalto, la apariencia física era muy notable el exceso de asfalto, por lo que no se realizaron mezclas con mayor contenido asfáltico.

Tabla 4-11 Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla combinado con 30% de RAP (IDEAL-CT)

Designación de la mezcla		Contenido Asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Carga máxima (kN)	Índice de tolerancia al agrietamiento (CT – Index)
Mezclas combinado con 30% de RAP	Diseño (% óptimo de asfalto)	4.65	7.05	14.06	38.96
	Diseño (Mayor % de asfalto)	5.15	6.64	11.3	48.2
		5.65	7.36	10.63	56.12
		6.15	6.9	9.95	62.32

En la siguiente figura, se observa la curva de carga desplazamiento para la mezcla combinado con 30% de RAP, en el cual, se aprecia que, a mayor contenido de pavimento recuperado, mayor es la pendiente y la carga, sin embargo, el índice de agrietamiento resulta menor.

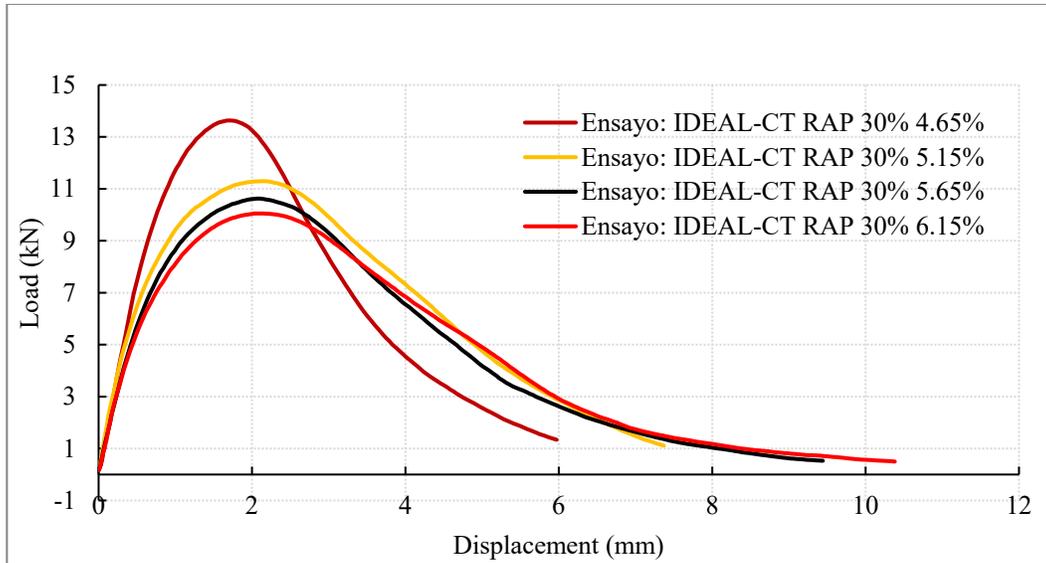


Figura 4-15 Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño combinado con 30% de RAP.

4.5.4 Evaluación del índice de agrietamiento para el diseño combinado con 40% de RAP

Para las mezclas combinadas con 40% de RAP fue evidente que la resistencia iba a resultar menor, a pesar de adicionarle porcentajes altos de asfalto no se iba a lograr una mezcla flexible y estable, además de no ser redituable en los costos, por lo que no se le agregó más del 6% de asfalto. Los resultados se presentan en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12 Resultados del ensayo de agrietamiento por tensión indirecta para la mezcla combinado con 40% de RAP (IDEAL-CT)

	Designación de la mezcla	Contenido Asfáltico (%)	Vacíos de aire (%)	Carga máxima (kN)	Índice de tolerancia al agrietamiento (CT - Index)
Mezclas combinado con 40% de RAP	Diseño % óptimo de asfalto	4.53	7.29%	12.827	29.98
	Diseño (Mayor % de asfalto)	5.03	6.61%	12.611	36.18
		5.53	7.49%	10.952	46.84

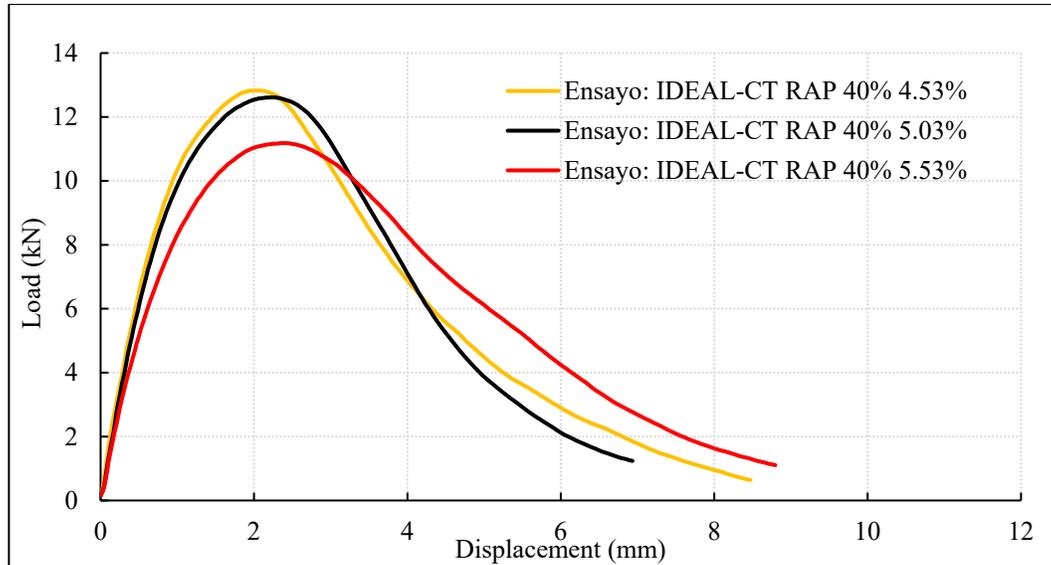


Figura 4-16 Curva de carga-desplazamiento IDEAL-CT para el diseño combinado con 40% de RAP.

Finalmente, se realizó una comparativa entre los resultados de la prueba de ahuellamiento y del índice de agrietamiento (Figura 4-17), con el objetivo de conocer un rango aceptable de asfalto para la mezcla, dentro del cual no presente fallas por deformación permanente ni por agrietamiento, tal y como lo recomienda el Diseño Balanceado de Mezcla Asfáltica, considerando parámetros conocidos como la rodera máxima permitida, (12 mm, Superpave) y un índice de agrietamiento mínimo de 70, como lo recomienda el Departamento de Transporte de Virginia (VDOT's) establecido en el Reporte 21-03 del NCAT.

Partiendo de estos parámetros se obtiene que:

Para la mezcla de referencia con 5% de contenido asfáltico, se logra cumplir con el índice de agrietamiento, sin embargo, presenta una rodera mayor al máximo permitido, por lo que esta mezcla no se considera como válido.

Para la mezcla con 4.5% de asfalto, se cumple satisfactoriamente con la rodera, sin embargo, con se cumple con el índice de agrietamiento, por lo que esta mezcla también se descarta.

No está de más mencionar que, aunque la mezcla con 5.5% de contenido asfáltico no cumple en rodera, presenta una mejora en el índice de agrietamiento muy por arriba del mínimo requerido, sin embargo, también se descarta la mezcla.

No obstante, al analizar el rango entre **4.8% y 4.95%** de contenido asfáltico, se observa que es el rango en el cuál, se cumple satisfactoriamente con estos dos parámetros; cabe resaltar que con menor cantidad de asfalto que el óptimo se logra obtener un buen desempeño de la mezcla.

Por lo que este rango de contenido asfáltico podría ser el viable para el diseño de la mezcla.

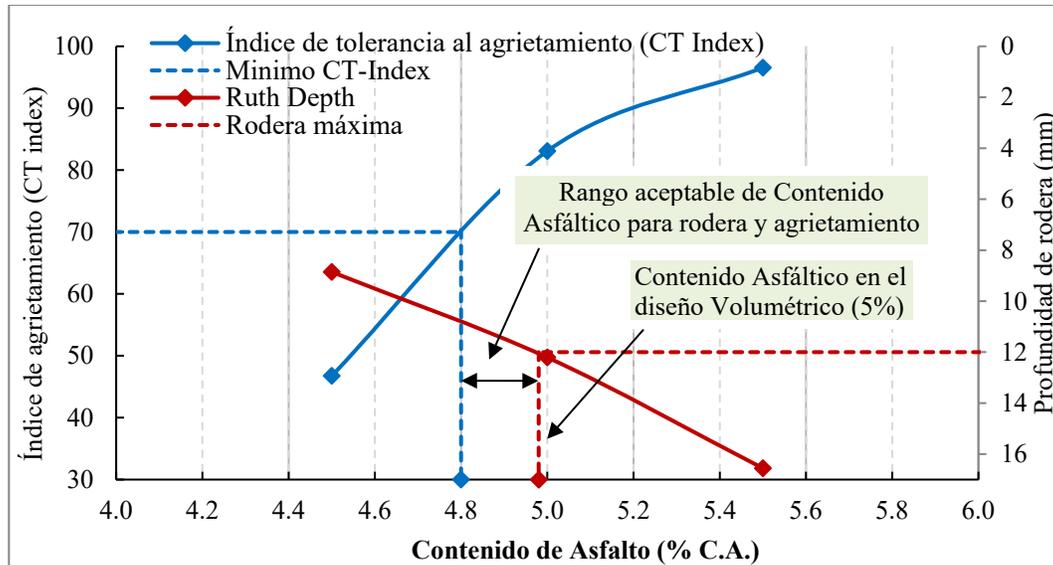


Figura 4-17 Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (diseño Base).

Siguiendo el mismo criterio de análisis, se revisaron los resultados de las mezclas combinadas con RAP, (Figuras 4-18, 4-19 y 4-20) en el cuál, se observa:

Para los diseños con 20% de RAP, se obtiene que para la mezcla con 4.3% de contenido asfáltico, se logra cumplir con el criterio de rodera, sin embargo, presenta un índice de agrietamiento menor al mínimo permitido, por lo que esta mezcla no se considera como válido.

Para la mezcla con 4.8% de asfalto, se cumple satisfactoriamente con la rodera, sin embargo, no se logra cumplir con el índice de agrietamiento, por lo que esta mezcla también se descarta.

Al revisar los resultados de la mezcla con 5.3% de asfalto, se obtiene que se logra cumplir con los dos parámetros requeridos, por lo que esta mezcla se considera como aceptable.

No obstante, al analizar el rango entre **5.1% y 5.3%** de contenido asfáltico, se observa que es el rango en el cuál, se cumple también satisfactoriamente con estos dos parámetros;

Por lo que este rango de contenido asfáltico podría ser el viable para el diseño de la mezcla.

Analizando la Figura 4-19, para la mezcla combinado con 30% RAP, obtenemos que se cumple satisfactoriamente con el criterio de evaluación de la rodera, ya que todas se encuentran por debajo del máximo permitido, sin embargo, no se logra cumplir con el parámetro del índice de agrietamiento, ya que todas presentaron valores por debajo del mínimo permitido (70), aunque se notó un aumento significativo al dosificarle mayor porcentaje de asfalto, a tal grado de llegar a un valor cercano al mínimo utilizando 6.15% de contenido asfáltico, sin embargo, con este porcentaje la apariencia de la mezcla no era el adecuado, por lo que no se obtuvo un porcentaje de asfalto viable para cumplir con los parámetros.

Para el caso de la mezcla con 40% de RAP, todas cumplen con el criterio de rodera, sin embargo, los resultados del índice de tolerancia al agrietamiento son relativamente bajos, por lo que no se logra cumplir con este parámetro aún agregándole un porcentaje más alto de asfalto, por lo tanto, una mezcla con altos porcentajes de asfalto podría no ser viables, a menos que se le agregue algún aditivo rejuvenecedor. Cabe resaltar que para este análisis no se utilizó ningún aditivo rejuvenecedor en la mezcla, únicamente se utilizó un asfalto 64-22 para todos los diseños.

Por otra parte, West. R et al. (NCHRP, 2018) mencionan que en algunos tramos de pruebas se obtuvieron índices de agrietamiento alrededor de 30 y que, además, mostraron buen comportamiento, por lo que suena viable utilizar este tipo de mezclas para pavimentos con una intensidad de tráfico ligeramente moderados, ya que los valores de agrietamiento obtenidos son mayores que 30.

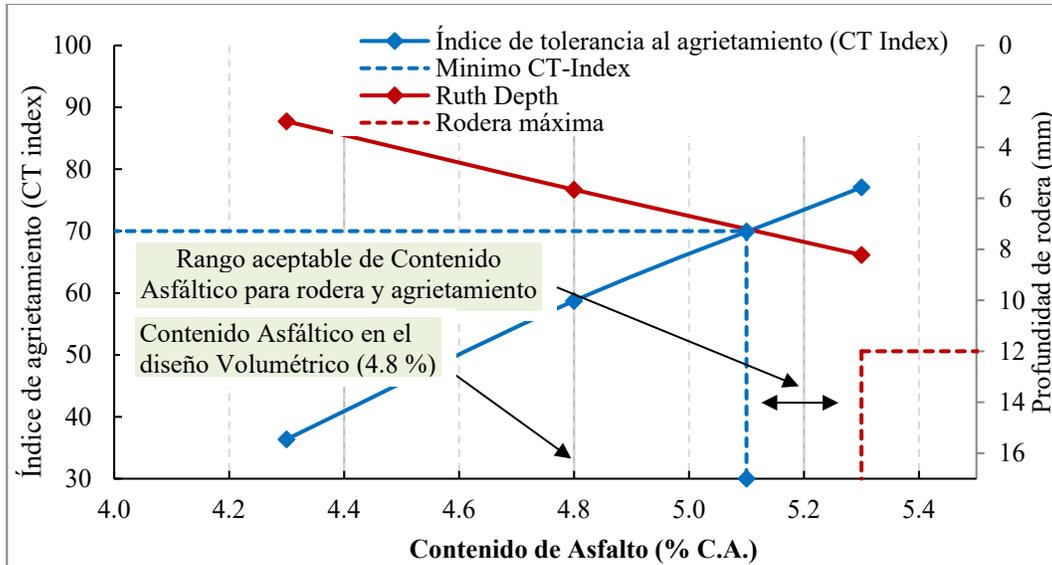


Figura 4-18 Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (diseño combinado con 20% de RAP).

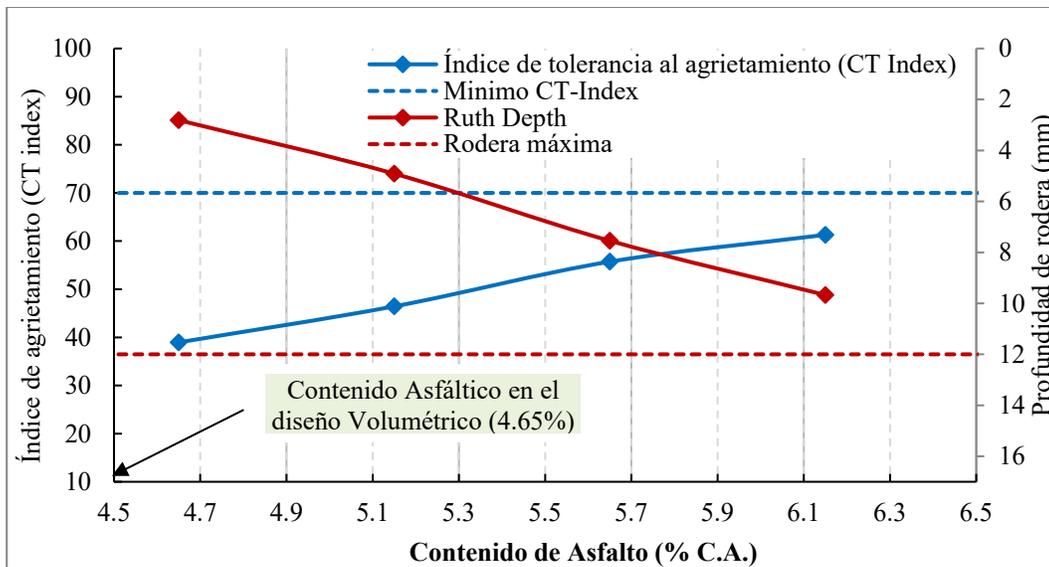


Figura 4-19 Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (diseño combinado con 30% de RAP).

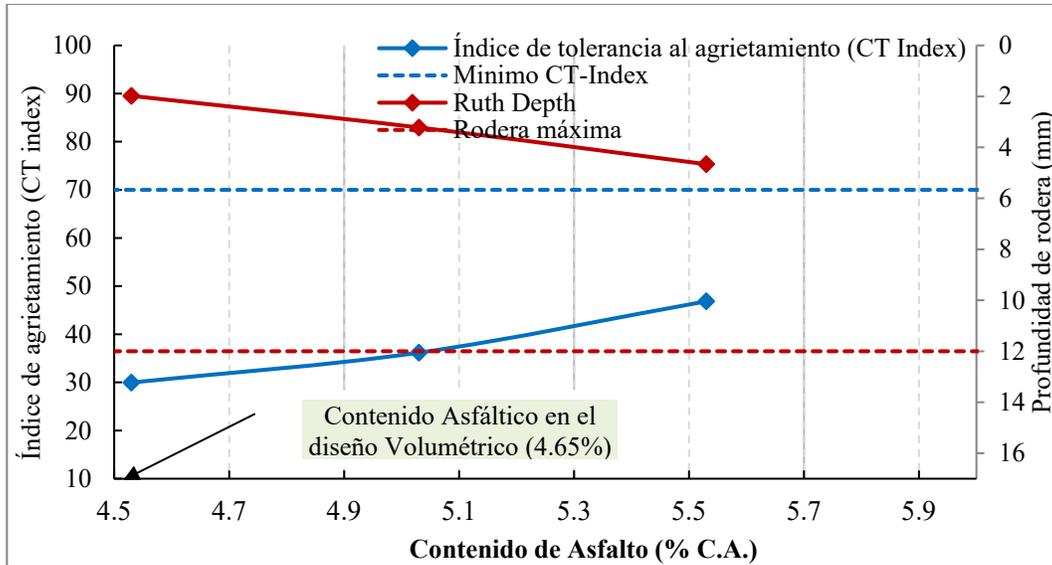


Figura 4-20 Resistencia al agrietamiento y a la deformación permanente en función del contenido de asfalto (diseño combinado con 40% de RAP).

Para obtener una buena mezcla, se requiere que sea tanto rígido como flexible, es decir, mantener un equilibrio para lograr un buen desempeño, es por eso que en la siguiente figura se presenta una forma de analizar una mezcla evaluando dos principales parámetros como son el agrietamiento y la deformación permanente, dentro del cual queda en evidencia que las mezclas combinadas con RAP tienden a ser rígidas y frágiles, mientras que las mezclas vírgenes presentan un comportamiento flexible y deformable a mayor porcentaje de asfalto.

Siguiendo la tendencia del comportamiento de la mezcla virgen (de referencia) se obtiene una zona en el cuál podría estar en cumplimiento teóricamente, utilizando un porcentaje de asfalto entre 4.8 y 4.95% como se indica en la figura 4-17.

Por otra parte, analizando la tendencia de las mezclas combinadas con 20% de RAP, se observa que también existe una zona en el cual estarían en cumplimiento, utilizando un porcentaje de asfalto entre 5.1 y 5.3% como se presenta en la figura 4-18

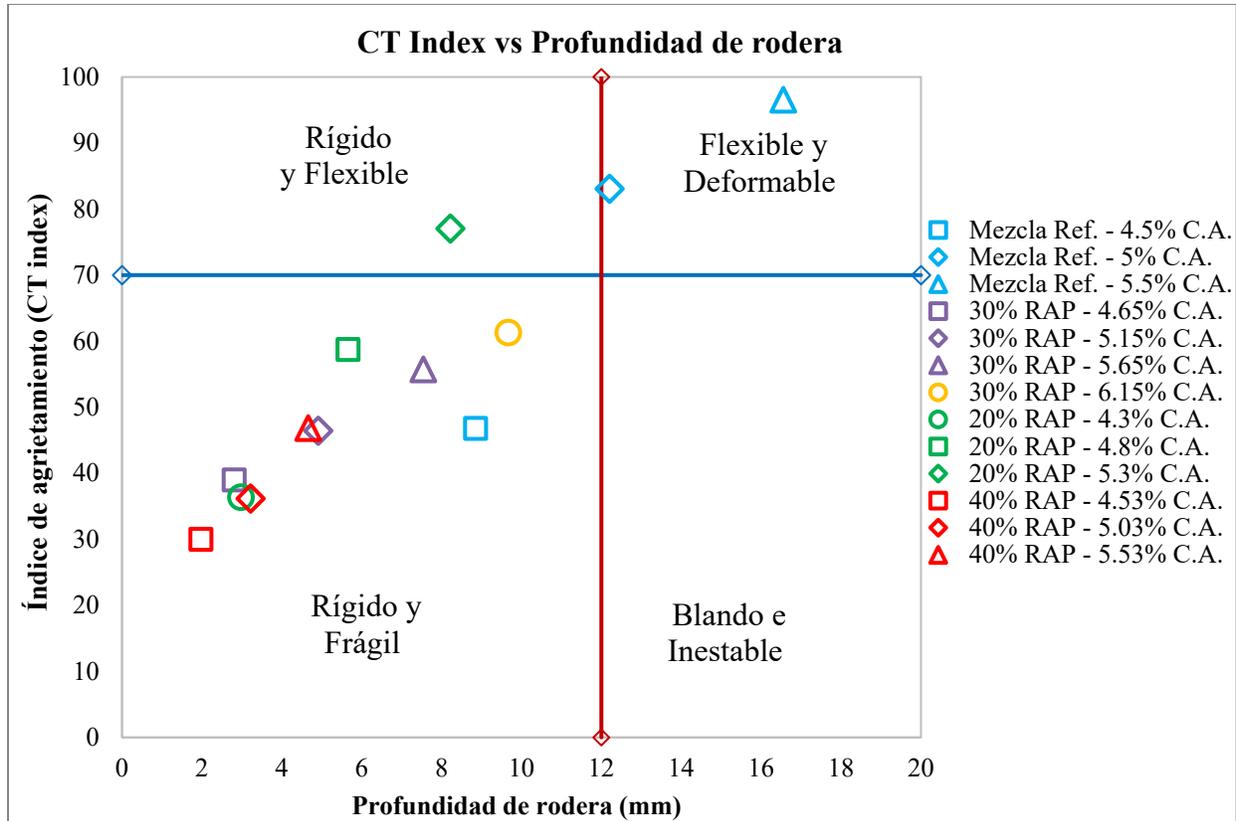


Figura 4-21 Diagrama de interacción del desempeño de las mezclas

4.6 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad (TSR)

Finalmente se evaluó la resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad mediante la relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR) como lo indica la normativa AASHTO T283.

Para realizar este ensayo se elaboró una mezcla asfáltica con material de origen 100% virgen con un porcentaje de asfalto de 4.9% con base en los resultados mostrados en la figura 4-17, en el cual se recomienda un rango de porcentaje de asfalto de 4.8 a 4.95% dentro del cual se demuestra que se logra un buen desempeño de la mezcla.

Además, se elaboró una mezcla combinada con 20% de RAP con un porcentaje asfáltico de 5.2% considerando en este porcentaje el aporte de asfalto del RAP; para este caso se tomó en cuenta lo obtenido en la figura 4-18, en el que se recomienda un rango de ligante asfáltico de 5.1 a 5.3% garantizando el cumplimiento de los parámetros

evaluados.

Una vez elaborado la mezcla se procedió a realizar el ensayo, en el cual se obtuvo lo siguiente:

Tabla 4-13 Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad (TSR) Diseño Base

Cálculos de resistencia	Acondicionado	Sin acondicionar
Carga [N]	10217	12130
Resistencia del espécimen acondicionado ($2000 \cdot P / \pi t D$) [kPa]	460.7	553.2
(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta $(St_a / St) \cdot 100$ [%]	84	

Tabla 4-14 Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad (TSR) Diseño combinado con 20% de RAP

Cálculos de resistencia	Acondicionado	Sin acondicionar
Carga [N]	13297	14864
Resistencia del espécimen acondicionado ($2000 \cdot P / \pi t D$) [kPa]	602.8	677.9
(TSR) Relación de resistencia a la tensión indirecta $(St_a / St) \cdot 100$ [%]	89	

De los resultados mostrados en las tablas 4-13 y 4-14 se observa para la mezcla combinada con 20 de RAP, la carga aplicada fue mayor que en la mezcla base (materiales de origen 100% virgen), esto se le atribuye a la rigidez que presenta en RAP, lo que lo vuelve menos susceptible a los daños por húmedas.

Por otra parte, analizando los especímenes que fueron expuestos al ciclo de congelamiento y descongelamiento (acondicionados) presentaron una menor resistencia a la carga, debido a la presencia de humedad en la mezcla, sin embargo, la resistencia obtenida en la mezcla base (acondicionado) con respecto a la mezcla base (sin acondicionar) fue de 84%, mientras que la mezcla combinado con RAP (acondicionado) presentó una resistencia de 89% con respecto a la mezcla combinado con RAP (sin acondicionar).

Por lo tanto, se determina que el diseño obtenido para la mezcla asfáltica base y para la mezcla combinado con 20% RAP son adecuados, ya que ambos cumplen con el parámetro mínimo requerido en el ensayo de daños por humedad, que es de 80%. El comportamiento en la resistencia a la carga para cada una de las mezclas analizadas se puede observar en las figuras 4-22 y 4-23.

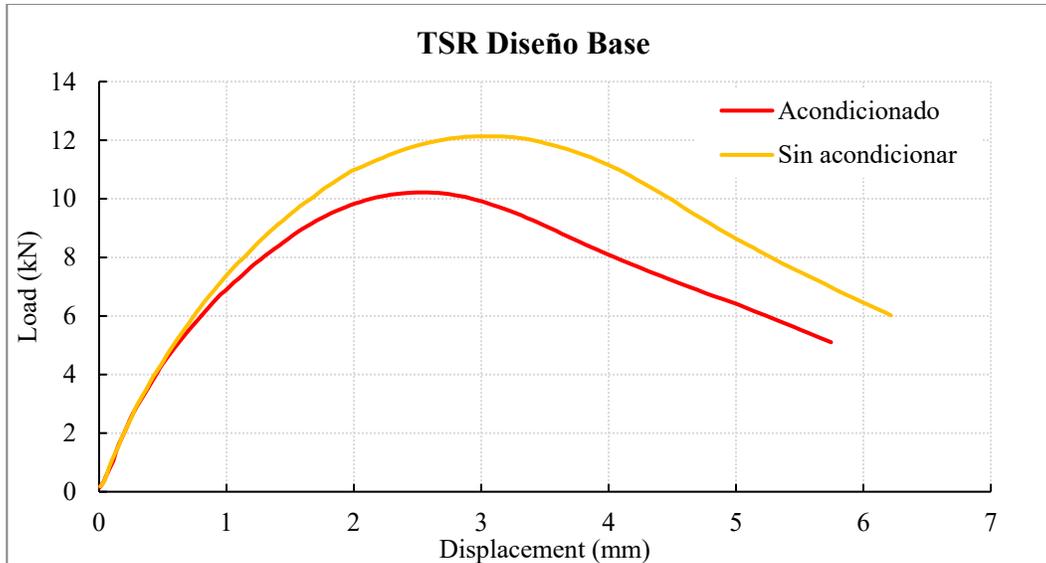


Figura 4-22 Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de daños por humedad (TSR) para el diseño base

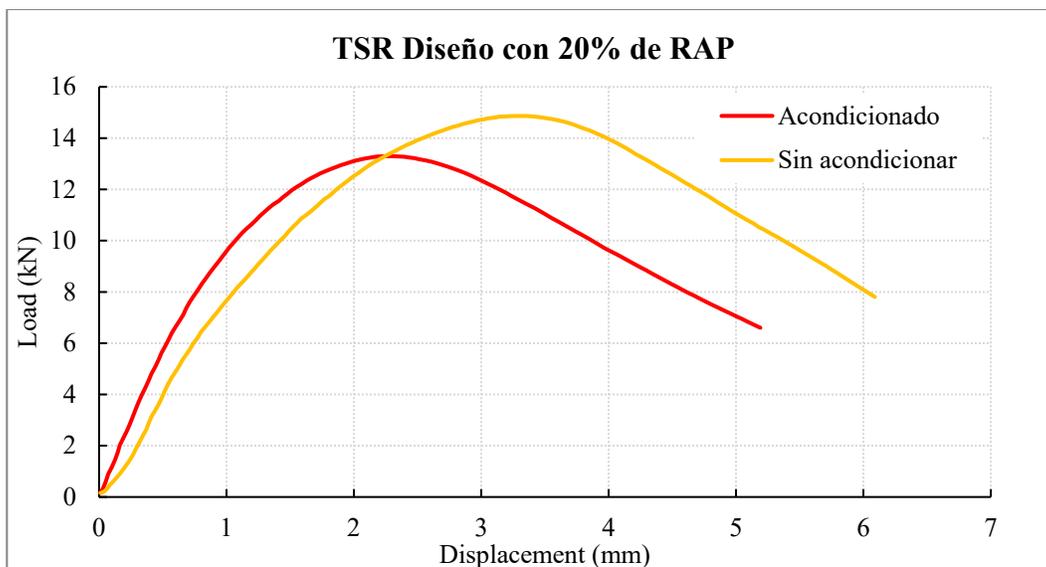


Figura 4-23 Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de daños por humedad (TSR) para el diseño combinado con 20% de RAP.

Como parte del análisis de los resultados, se afirma que se cumplieron con los objetivos planteados dentro del documento, ya que se obtuvo un diseño de mezcla asfáltica base con las combinaciones adecuadas entre los agregados y el asfalto para un buen desempeño, tanto para los ensayos de agrietamiento como la deformación permanente, además de los daños inducidos por humedad. No obstante, se logró utilizar un porcentaje considerable de pavimento recuperado (RAP) en un 20% superando a la mezcla base en el desempeño con respecto al ahuellamiento y los daños por humedad.

Además, se logró optimizar el uso del ligante asfáltico con respecto al porcentaje óptimo obtenido por el método Superpave, dado a que un alto contenido de asfalto contribuye a generar emisiones de dióxido de carbono al ambiente; por otra parte, se evaluó el porcentaje de volátiles que se evaporan durante la producción de la mezcla, lo cual resultó ser intrascendente, ya que la pérdida de masa fue de 0.012%.

Dentro del Anexo I, se presentan las evidencias fotográficas de los trabajos realizados durante el periodo de realización de la Tesis.

5. CONCLUSIONES

Emplear la metodología de Diseño Balanceado, ayuda a obtener un rango de asfalto aceptable para un diseño y no utilizar un único porcentaje como se obtiene en el análisis volumétrico establecido en el método Superpave, optimizando la cantidad de cemento asfáltico y por ende una reducción en los costos de las obras, además de disminuir emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otra parte, se obtiene que es posible utilizar cantidades considerables de pavimento recuperado en carreteras con un tránsito de baja intensidad, aprovechando la mayor cantidad de RAP disminuyendo así el uso de materiales de orígenes vírgenes.

Aunque no existe una normativa en donde se indiquen parámetros mínimos del índice de agrietamiento (CT-Índice) existen recomendaciones de departamentos de transportes de Estados Unidos tales como Virginia, Texas, Oklahoma, entre otros; que nos dan pauta para tomar criterios de aceptación o rechazo para diseños de mezclas.

Dado a que en el método Superpave no se revisa el fenómeno del agrietamiento en las mezclas, es interesante el nuevo enfoque del Diseño Balanceado, ya que el método de ensayo que se propone (IDEAL-CT) es práctico, rápido y sencillo de realizar, sumándole que el equipo de prueba no requiere ser tan sofisticado, a diferencia de los otros métodos de ensayo para medir el agrietamiento que suelen ser demasiado tardados y caros y con equipos especiales; por lo que es importante aportar información de esta

prueba para las bases para una normativa que pueda servir como referencia a futuros desarrollos científicos y tecnológicos sustentables.

Se recomienda realizar mezclas con un asfalto diferente en la mezcla virgen para evaluar su comportamiento. Además de utilizar algún aditivo rejuvenecedor en las mezclas combinadas con RAP para evaluar si existe mejora significativa en el índice de agrietamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Devulapalli, L., Kothandaraman, S., & Sarang, G. (2020). Effect of rejuvenating agents on stone matrix asphalt mixtures incorporating RAP. *Construction and Building Materials*.
- (NJDOT), N. J. (2021). *Case Studies on the Implementation of Balanced Mix Design and Performance Tests for Asphalt Mixtures*.
- AASHTO. (s.f.). *AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixtures to Moisture Induced Damage*.
- Asphalt Institute. (2001). *SuperPave Mix Design*.
- Asphalt Institute. (s.f.). *Asphalt Hotmix Recycling. MS-20*. Obtenido de https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Asphalt%20Hotmix%20Recycling.%20MS-20&publication_year=1981&author=Asphalt%20Institute
- ASTM. (s.f.). *AASHTO T 324 Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures*.
- ASTM. (s.f.). *ASTM C136/AASHTO T 27 Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates / Sieve Analysis of Aggregates*.
- ASTM. (s.f.). *ASTM D5404 Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator*.
- ASTM. (s.f.). *ASTM D75/D75 M Standard Practice for Sampling Aggregates*.
- ASTM. (s.f.). *ASTM D8225 – 19 Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*.
- ASTM. (s.f.). *ASTM2172 Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures*.

- ASTM. (s.f.). *ASTM2172 Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures*).
- California Department of Transportation (Caltrans). (2021). *Case Studies on the Implementation of Balanced Mix Design and Performance Tests for Asphalt Mixtures*.
- Case Studies on the Implementation of Balanced Mix Design and Performance Tests for Asphalt Mixtures. (2021). *Texas Department of Transportation (TxDOT)*.
- Federal Highway Administration. (2014). *PAVEMENT SUSTAINABILITY*.
- Federal Highway Administration. (2018). *State of the Knowledge for the Use of Asphalt Mixtures with Reclaimed Binder Content FHWA-HIF-18-059*.
- Federal Highway Administration. (s.f.). *Superpave Fundamentals Reference Manual*.
- FHWA. (1997). *RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT*. New Jersey: Coordinating, Developing, and Delivering Highway Transportation Innovations.
- FHWA. (2011). *High Reclaimed Asphalt Pavement Use*. McLean: Research, Development, and Technology.
- FHWA. (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. McLean: Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Franke, R., & Ksaibati, K. (2015). A methodology for cost-benefit analysis of recycled asphalt pavement (RAP) in various highway applications. *International Journal of Pavement Engineering* .
- Ghuzlan, K., Al-Mistarehi, B., & Al-Momani, A. (2020). Rutting performance of asphalt mixtures with gradations designed using Bailey and conventional Superpave methods. *Construction and Building Materials*.
- Gungat, L., Othman Hamzah, M., Md. Yusoff, N., & Goh, S. (2019). Design and properties of high reclaimed asphalt pavement with RH-WMA. *Materials Science and Engineering*, 512.
- Hollerand, G., Wieringa, T., & Tailby, J. (2006). Rejuvenation treatments for aged pavements. *Transportation Research Board*.
- Hong, F., Guo, R., & Zhou, F. (2014). Impact of recycled asphalt pavement material variability on pavement performance. *Road Materials and Pavement Design*, 841–855.
- Huang, S.-C., Pauli, A., Grimes, R., & Turner, F. (594–603). Influence of Rejuvenators on the Physical Properties of RAP Binders. *Road Materials and Pavement Design*, 2015.

- Hugener, M., & Kawakami, A. (2017). Simulating repeated recycling of hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*.
- Illinois Department of Transportation (IDOT). (2021). *Case Studies on the Implementation of Balanced Mix Design and Performance Tests for Asphalt Mixtures*.
- Im, S., Karki, P., & Zhou, F. (2016). Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators. *Construction and Building Materials*.
- Im, S., Karki, P., & Zhou, F. (2016). Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 727–734.
- Institute, T. A. (2018). *Balanced Design of Asphalt Mixtures*.
- LanammeUCR. (2020). *Generalidades de la metodología de Diseño balanceado de mezcla asfáltica (BMD)*. Costa Rica: PITRA-LanammeUCR.
- Louisiana Department of Transportation & Development (LaDOTD) . (2021). *Case Studies on the Implementation of Balanced Mix Design and Performance Tests for Asphalt Mixtures*.
- Ma, Q., Guo, Z., Guo, P., Sun, L., & Yang, F. (2021). Research on Fatigue Prediction Model of Asphalt Mixture with. *Sustainability*.
- Maine Department of Transportation (MaineDOT). (2021). *Case Studies on the Implementation of Balanced Mix Design and Performance Tests for Asphalt Mixtures*.
- Moghaddam, T., & Baaj, H. (2016). The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction and Building Materials* .
- Mohammad, A., Mohammad, S., & Ankit, S. (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. *Construction and Building Materials*.
- National Asphalt Pavement Association. (2021). *Balanced Mix Design Resource Guide*. Greenbelt: National Center for Asphalt Technology.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. (2018). *Development of a Framework for Balanced Mix Design NCHRP 20-07/Task 406*.
- Norma Oficial Mexicana. (2005). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de NOM-052-SEMARNAT-2005.

- Oliveira, M., Muniz deFarias, M., & Silva, J. (2022). Fatigue analysis of hot recycled asphalt mixtures with RAP incorporation. *Case Studies in Construction Materials*.
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2020). Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*.
- PIARC. (2014). *Asociación Mundial de Carretera*. Obtenido de <https://www.piarc.org/es/pedido-de-publicacion/22252-es-Importancia%20de%20la%20conservaci%C3%B3n%20de%20carreteras>
- Plati, C., & Cliatt, B. (2018). A Sustainability Perspective for Unbound Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as a Pavement Base Material. *Sustainability*.
- Pradyumna, T., Mittal, A., & Jain Dr, P. (2013). Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 1149–1157.
- Sabahfer, N., & Hossain, M. (s.f.). Effect of Fractionation of Reclaimed Asphalt Pavement on Properties of Superpave Mixtures With Reclaimed Asphalt Pavement. *ASTM International*.
- Salehi, S., Arashpour, M., Jayantha, K., & Ross, G. (2021). Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. *Journal of Cleaner Production*.
- Santero, N., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Santos, J., Bryce, J., Flintsch, G., Ferreira, A., & Diefenderfer, B. (2015). A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices. *Structure and Infrastructure Engineering* .
- Santos, J., Flintsch, G., & Adelino, F. (2017). Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*.
- SCT. (2020). *Instituto Mexicano del Transporte*. Obtenido de Red Nacional de Caminos: <https://www.gob.mx/imt/es/articulos/aumenta-en-29-819km-la-longitud-total-de-la-red-nacional-de-caminos?idiom=es>
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2021). *Proyectos México*. Obtenido de <https://www.proyectosmexico.gob.mx/por-que-invertir-en-mexico/destino-atractivo/>

- Shen, J., Amirkhani, S., & Tang, B. (2006). Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures. *Construction and Building MATERIALS*, 958–964.
- Sogol, S., Erdem, C., & Shashwath, S. (2019). Strategies to improve performance of reclaimed asphalt pavement-recycled asphalt shingle mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*.
- Tran, N., Taylor, A., & Willis, R. (2012). EFFECT OF REJUVENATOR ON PERFORMANCE PROPERTIES OF HMA MIXTURES WITH HIGH RAP AND RAS CONTENTS. *National Center for Asphalt Technology*, Report 12-05.
- Virginia Department of Transportation (VDOT). (2021). *Case Studies on the Implementation of Balanced Mix Design and Performance Tests for Asphalt Mixtures*.
- Wang, L., Dai, Z., Zhao, K., & Dong, Z. (2020). Study on the influence of RAP Content on the performance of plant mix hot recycled asphalt mixture. *Construction Engineering and Management*.
- Wei, M., Wu, S., Zhu, L., Li, N., & Yang, C. (2021). Environmental Impact on VOCs Emission of a Recycled Asphalt Mixture with a High Percentage of RAP. *National Center for Biotechnology Information*.
- Zaumanis, M., Mallick, R., & Frank, R. (2013). Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. *Transportation Research Board*, 17-25.
- Zhang, J., Sun, H., Jiang, H., & et al. (2019). Experimental assessment of reclaimed bitumen and RAP asphalt mixtures incorporating a developed rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 660–669.
- Zhou, F., Mogawer, W., & Steger, R. (2021). Development of a coherent framework for balanced mix design and production quality control and quality acceptance. *Construction and Building Materials*.

APENDICE

ANEXO I

Evidencias fotográficas

Cuarteo de materiales



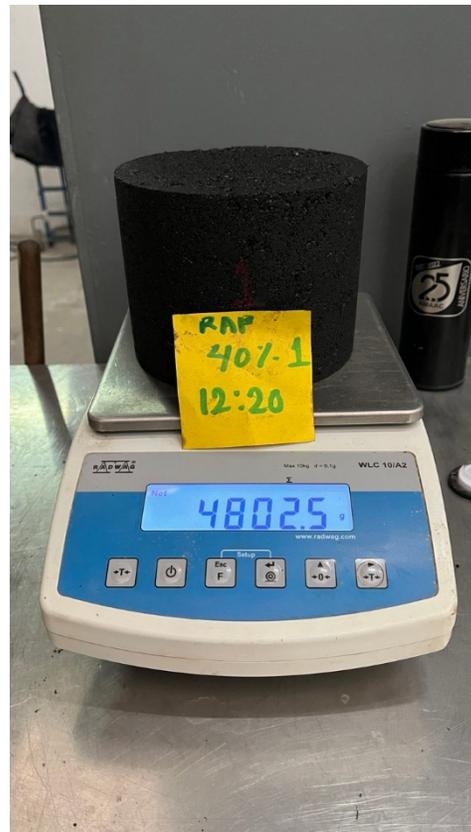
Evaluación de las propiedades del agregado pétreo



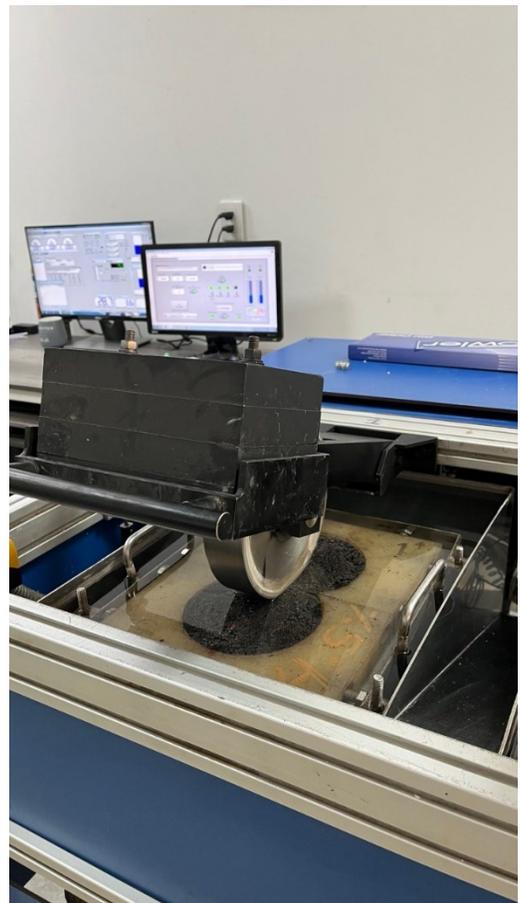


Diseño óptimo de la mezcla





Ensayo de deformación permanente mediante Rueda Cargada de Hamburgo



Ensayo de agrietamiento por Tensión indirecta



Evaluación de la susceptibilidad a la humedad (TSR)

