

Julio César
Hernández Moreno

Caracterización mecánica de mezcla asfáltica en frío con emulsión
modificada con SBS y adición de filler cementante

2024



Universidad Autónoma de Querétaro

**Caracterización mecánica de mezcla asfáltica en frío con emulsión
modificada con SBS y adición de filler cementante**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Querétaro, Qro a
15 de noviembre de 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

“Caracterización mecánica de mezcla asfáltica en frío con emulsión modificada con SBS y adición de filler cementante”

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

Presenta:

Julio César Hernández Moreno

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Presidente

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Secretario

Firma

Dr. Ricardo Montoya Zamora

Vocal

Firma

Dra. Teresa López Lara

Suplente

Firma

Dr. Saúl Obregón Biosca

Suplente

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Director de la Facultad

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
15 de noviembre de 2024

RESUMEN

Las carreteras desempeñan un rol muy importante en el desarrollo económico y social de los países, por ello es de vital importancia construir y mantener caminos en buen estado y ello depende de la calidad de su pavimento, existen dos principales tipos de pavimentos usados en carreteras, rígidos y flexibles, siendo este último el más usado, los pavimentos flexibles se caracterizan por que su capa de rodadura es una carpeta hecha de mezcla asfáltica.

Una mezcla asfáltica está constituida por agregados pétreos, rellenos (*filler*) y ligante asfáltico y existen diversos tipos de mezcla asfáltica, la más popular en la mezcla en caliente, en su producción se calienta a altas temperaturas los componentes y se consumen grandes cantidades de combustible para ello y a su vez esto libera una gran cantidad de gases de efecto invernadero, existe una alternativa menos contaminante, la denominada mezcla fría que para su producción no requiere calentar los materiales por lo cual es más amigable con el ambiente, sin embargo este tipo de mezcla, no es capaz de soportar las mismas cargas que una mezcla caliente, por ello aquí se plantea una alternativa de mejoramiento mecánico de las mezclas frías usando emulsión modificada y rellenos cementantes. Se realizaron cuatro tipos de mezclas, variando el uso de una emulsión con y sin modificador SBS, así como el uso de filler mineral o filler cementante ternario para ser evaluadas en pruebas de desempeño mecánico, observó que el comportamiento de la mezcla asfáltica fría en las pruebas las TSR mejoró en un aproximadamente un 10% con el uso de filler cementante independientemente de la emulsión usada, mientras que en la prueba de rueda cargada de Hamburgo se obtuvo una mejoría significativa de soportar antes de llegar a una deformación de 10 mm un número de 6000 pasadas sin el uso del filler cementante ternario y emulsión modificada a 14000, mientras que la mezcla con emulsión sin modificar y filler cementante ternario soporto 20000 pasadas y obtuvo una deformación de 5.3 mm

(Palabras clave: Mezcla asfáltica en frío, emulsión modificada, rellenos cementantes, desempeño mecánico)

SUMMARY

Roads play a very important role in the economic and social development of countries, therefore it is vitally important to build and maintain roads in good condition and this depends on the quality of their pavement, there are two main types of pavements used on roads, rigid and flexible, the latter being the most used, flexible pavements are characterized by the fact that their wearing layer is a layer made of asphalt mixture.

An asphalt mixture is made up of stone aggregates, fillers and asphalt binder and there are various types of asphalt mixture, the most popular being hot mix, in its production the components are heated to high temperatures and large quantities of fuel are consumed. For this purpose and in turn this releases a large amount of greenhouse gases, there is a less polluting alternative, the so-called cold mix that for its production does not require heating the materials, making it more environmentally friendly, however this type of mixture is not capable of supporting the same loads as a hot mixture, therefore an alternative for mechanical improvement of cold mixtures using modified emulsion and cementitious fillers is proposed here. Four types of mixtures were made, varying the use of an emulsion with and without SBS modifier, as well as the use of mineral filler or ternary cementitious filler to be evaluated in mechanical performance tests, it was observed that the behavior of the cold asphalt mixture in the Tests the TSR improved by approximately 10% with the use of cementitious filler regardless of the emulsion used, while in the Hamburg loaded wheel test a significant improvement was obtained in supporting before reaching a deformation of 10 mm a number from 6000 passes without the use of the ternary cementitious filler and modified emulsion to 14000, while the mixture with unmodified emulsion and ternary cementitious filler withstood 20000 passes and obtained a deformation of 5.3 mm

(Key words: Cold mix asphalt, modified emulsion, cementitious filler)

**Universidad Autónoma de
Querétaro**

Este trabajo es dedicado a mi familia

En especial dedicado a mi papá +

AGRADECIMIENTOS

Especialmente quiero dar gracias a mi familia por apoyarme durante estos años, a mi madre por darme la vida y la motivación para buscar algo más, a mi hermano Carlos por apoyarme con algunos consejos en redacción, a mis hermanas Jimena y Francisco por escucharme y darme palabras de ánimo cuando en algún punto fue necesario, a mi señor padre Joel Hernández Soto a quien antes de su partida conté mi proyecto y me animo a intentarlo y seguro desde lo alto también estuvo pendiente de este proceso.

Así mismo agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindar el apoyo durante estos dos años de investigación, a mi asesor el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, por brindar su orientación para llevar a buen fin este proyecto, al Dr. Ricardo Montoya Zamora coordinador de la maestría, y en general a todos mis profesores que compartieron durante estos años su conocimiento conmigo para tener así una mejor visión de lo que son las vías terrestres, a mis compañeros de generación con quienes compartí varios momentos de presión durante las entregas, proyectos y exámenes, pero también momentos de alegría, a mi compita Emmanuel Estrada Anaya quien estuvo conmigo desde que decidimos arrancar esta travesía.

Agradezco a CEVITER y todo su equipo de colaboradores por brindarme las facilidades para realizar los ensayos en sus instalaciones y darme orientación necesaria para ejecutar estos mismos, al M.I. Adrián Ramírez de Mega asfaltos por donar la emulsión asfáltica con la cual se elaboraron las muestras, al Ing. Basilio por dar las facilidades de obtener los agregados pétreos.

Y a cada una de las personas estuvieron en estos años de la maestría a mi lado, aportando consciente o inconscientemente algo de valor, pues al final del día sin cada una de esas personas, este trabajo no hubiera logrado tener hoy esta forma.

INDICE

Página

RESUMEN.....	iii
SUMMARY	iv
AGRADECIMIENTOS.....	vi
INDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Descripción Del Problema.....	16
1.2. Justificación.....	17
1.3. Hipótesis.....	18
1.4. Objetivos.....	18
2. ESTADO DEL ARTE.....	18
2.1. Pavimentos	18
2.2. Mezclas asfálticas.....	24
2.3. Material pétreo	29
2.4. Ligante asfáltico	31
2.5. Rellenos.....	35
2.5.1. Relleno ternario cementante	35
2.5.2. Cemento Pórtland Ordinario (CPO).....	35
2.5.3. Cenizas volantes (CV).....	35
2.5.4. Escoria de alto horno (EAH).....	36
2.6. Metodologías para diseño de mezcla asfáltica	36
2.7. Efecto de la temperatura.....	44
2.8. Efecto de los vacíos	45

3.	METODOLOGÍA	46
3.1.	Descripción del proceso	46
3.2.	Obtención y caracterización de materiales.	47
3.2.1.	<i>Agregados pétreos</i>	48
3.2.2.	<i>Emulsión asfáltica</i>	49
3.2.3.	<i>Relleno cementante ternario</i>	50
3.3.	Diseño de mezcla asfáltica.....	50
3.3.1.	<i>Elección de granulometría</i>	50
3.3.2.	<i>Determinación de porcentaje de emulsión inicial</i>	51
3.3.3.	<i>Prueba de cubrimiento del agregado</i>	51
3.3.4.	<i>Prueba de cubrimiento mediante gravedad máxima de Bulk.</i> 52	
3.3.5.	<i>Determinación del asfalto residual óptimo.</i>	55
3.4.	Elaboración y curado de especímenes para desempeño.....	56
3.4.1.	<i>Preparación de los agregados</i>	58
3.4.2.	<i>Incorporación de la fase líquida</i>	59
3.4.3.	<i>Incorporación de los rellenos (filler cmenetante)</i>	60
3.4.4.	<i>Compactación</i>	60
3.4.5.	<i>Curado</i>	62
3.5.	Pruebas de desempeño mecánico	62
3.5.1.	<i>Evaluación de la resistencia al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)</i>	62
3.5.2.	<i>Evaluación de la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad mediante la Rueda Cargada de Hamburgo</i> 65	
4.	RESULTADOS.....	67
4.1.	Agregados pétreos	67
4.1.1.	<i>Granulometría de agregados</i>	67
4.1.2.	<i>Partículas alargadas y lajeadas</i>	68
4.1.3.	<i>Densidad y absorción</i>	69
4.1.4.	<i>Desgaste de los ángeles</i>	69
4.1.5.	<i>Desgaste microdeval</i>	70
4.1.6.	<i>Equivalente de arena</i>	70

4.1.7.	Angularidad	71
4.2.	Diseño Marshall Illinois	72
4.2.2.	Elección de granulometría	72
4.2.3.	Determinación de porcentaje de emulsión inicial	73
4.2.4.	Prueba de cubrimiento del agregado	74
4.2.5.	Determinación de humedad de compactación	74
4.2.6.	Determinación de asfalto residual óptimo.	75
4.3.	Pruebas de desempeño mecánico:	77
4.3.2.	Resultados de pruebas de resistencia al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)	77
5.	CONCLUSIONES	80
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Requisitos de calidad de la fracción gruesa de material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (grava).	29
2	Requisitos de calidad de la fracción fina de material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (arena).	31
3	Niveles de diseño en función de ejes equivalentes ESAL.	37
4	Niveles de diseño metodología amaac en función de ejes equivalentes de 8.2	38
5	Número de pasadas para la deformación máxima en prueba de rueda cargada de Hamburgo	41
6	Requisitos para las mezclas asfálticas frías según el MS-14	44
7	Composición de cada tipo de mezcla a evaluar	58
8	Granulometría agregados 3/4"	67
9	Granulometría agregados 1/2"	67
10	Granulometría agregados 3/8	68
11	Granulometría agregado arena	68

12	Resultados de la prueba de partículas alargadas y lajeadas	69
13	Resultados de prueba de gravedad específica de los agregados gruesos y absorción.	69
14	Resultado prueba de desgaste de los ángeles.	70
15	Resultados prueba de desgaste microdeval.	70
16	Resultados prueba de equivalente de arena.	71
17	Resultados prueba de angularidad en finos.	71
18	Diseño granulométrico propuesto para la mezcla.	72
19	Resultados de prueba de cubrimiento.	74
20	Asfalto residual y estabilidad seca y humedad.	75
21	Contenido de asfalto residual y porcentaje de vacíos.	76
22	Contenido de asfalto residual y gravedad máxima bulk.	76
23	Contenido de asfalto residual y pérdida de estabilidad.	76
24	Obtención del valor óptimo de asfalto residual.	77
25	Resultados de las pruebas de TSR	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Representación gráfica de las capas que componen un pavimento flexible.	21
2	Representación gráfica de las capas que componen un pavimento rígido.	24
3	Tipos de mezclas, temperatura, uso de combustible y CO2 liberado en su producción.	28
4	Representación esquemática de una cadena de estireno-butadieno-34 estireno (SBS)	
5	Esquema de los resultados de un ensaye de la rueda cargad de Hamburgo.	40
6	Esquema representativo de la metodología de trabajo propuesta.	46
7	Toma de muestra de material pétreo en banco “La loma”.	47
8	Granulometría de los agregados pétreos.	48
9	Emulsión asfáltica ECS-62P.	49
10	Rellenos ternarios cementantes.	50
11	Resultado de las pruebas de cubrimiento del agregado.	52

12	Proceso de preparación de la mezcla asfáltica.	53
13	Proceso de compactación mezcla asfáltica usando martillo Marshall.	53
14	Determinación de peso seco al aire de la pastilla luego de curado.	54
15	Determinación de peso sumergido de especímenes Marshall.	54
16	Ensayo de estabilidad y flujo Marshall.	55
17	Proceso de saturación de las muestras con bomba de vacíos	56
18	Especímenes luego de ser sometidos a las pruebas de estabilidad y flujo.	56
19	Proceso de elaboración de los especímenes para pruebas de desempeño.	57
20	Aregados cribados y clasificados por su tamaño	59
21	Proceso de incorporación de fase líquida a la mezcla.	59
22	Proceso de incorporación de rellenos cementantes a la mezcla.	60
23	Compactación de especímenes para TSR mediante compactador Marshall.	61
24	Especimen para prueba de rueda cargada de Hamburgo compactado mediante compactador giratorio.	61
25	Curado de mezcla asfáltica en horno de secado.	62
26	Proceso de saturación de vacíos con agua y presión de vacío.	63
27	Proceso de congelamiento de especímenes.	64

28	Proceso de saturación y calentamiento con baño maría.	64
29	Ensayo de tensión indirecta (TSR)	65
30	Colocación de especímenes de rueda cargada.	66
31	Ensayo de rueda cargada de Hamburgo.	66
32	Curva granulométrica de diseño.	73
33	Grafica de Gmb vs. Humedad.	75
34	Formación de rodera en espécimen ensayado.	78
35	Gráfica de no. de pasadas vs profundidad de rodera.	79

1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras a nivel mundial juegan un papel importante en el desarrollo económico y social de los países, de acuerdo con Peng et al. (2017) hay una relación directa entre la accesibilidad vial y el crecimiento económico. Costa et al. (2017) menciona que el material con mayor demanda mundial en la construcción de carreteras es el asfalto, de acuerdo con Thives y Ghisi. (2017) en México el 96% de los caminos pavimentados están recubiertos con material asfáltico, con base en los datos de Red Nacional de Caminos (RNC), en el país se cuenta con un total de 174,779 km (IMT, 2020), lo cual indica que existen cerca de 167,787 km de carreteras con pavimento asfáltico, que requieren de una constante conservación con este mismo material y que, de acuerdo a esta tendencia de construcción, en México la mayor parte de las carreteras que se construirán (y se seguirán conservando) han de ser recubiertas por material asfáltico.

Las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras están compuestas por agregados pétreos y un aglutinante (derivado de hidrocarburos) y pueden ser clasificadas de acuerdo con la temperatura de fabricación en mezclas en caliente (a partir de 150°C), mezclas tibias (entre 100 y 140°C) y mezclas frías (menor a 60°C) como lo menciona Rubio et al. (2013). La mezcla asfáltica en caliente es la más usada, para la producción de este tipo de mezcla es necesario el calentamiento del material pétreo y aglutinante a temperaturas de hasta 190 ° C Al-Busaltan et al. (2012). Una de las ventajas del uso de esta mezcla es su rendimiento y costo, mientras que uno de los inconvenientes del uso de este tipo es que para alcanzar la temperatura de producción se genera una gran cantidad de gases de efecto invernadero. Jain et al. (2021), además de posibles problemas para la salud de los trabajadores (Tian et al., 2021).

Una alternativa para la construcción y mantenimiento de carreteras que ha despertado el interés de la comunidad científica son las mezclas frías Ling et al. (2016). Una mezcla asfáltica fría es una combinación de agregado mineral y emulsión asfáltica. (Asphalt Institute. 2001), este tipo de mezclas se aplican a

temperatura ambiente y no requieren de un proceso de compactación por laminación Zhu et al. (2019), por lo que se pueden obtener beneficios económicos y ambientales mediante la eliminación del proceso de calentamiento Du (2018).

La aplicación de las mezclas asfálticas en frío es aún muy limitada, debido a que las mezclas asfálticas en frío presentan altos niveles de vacíos Dulain et al. (2016), bajas resistencias a temprana edad y alta sensibilidad a la humedad Dodds et al. (2017). En México el uso de este tipo de mezclas se limita exclusivamente para la construcción carpetas asfálticas no estructurales y bacheo (SCT, 2002).

Debido a lo anterior, se han realizado varias investigaciones para la solución de estos efectos, se ha estudiado el uso de materiales aglomerantes asfálticos emulsionados, con solventes y espumados, y se ha detectado que el emulsionado presenta una mayor adhesión con los materiales pétreos, lo cual es un factor crucial para la viabilidad constructiva Oruc et al. (2007). Por otra parte, se ha observado que la adición del cemento Portland puede mejorar la estabilidad de la mezcla asfáltica al reducir la sensibilidad a la temperatura. Xiao et al. (2019) a pesar de esto la mezcla asfáltica en frío no cumple con los requerimientos de una capa estructural de alto desempeño, por lo que se ha propuesto una nueva mezcla de asfalto modificado con SBS, que se puede mezclar y construir a temperatura ambiente y se ha encontrado que no solo cumple con los requerimientos de capa estructural, sino que se tiene una reducción del 80 % de energía para su producción. Se ha descubierto que, a diferencia de las mezclas asfálticas en caliente, la mezcla asfáltica en frío con asfalto modificado con SBS presenta una mejor resistencia a la degradación inducida por temperatura y a la formación de roderas, esto debido a la formación de una red espacial y física más fuerte, producto de la reacción de hidratación del cemento portland y la formación de muchos enlaces de hidrogeno. Lu et al. (2021)

1.1. Descripción Del Problema

Las mezclas asfálticas en caliente son las más populares en la construcción y conservación de carreteras, sin embargo, para su producción se requieren de

grandes cantidades de combustible fósil que al ser quemado liberan a la atmósfera también grandes cantidades de gases de efecto invernadero Rubio et al. (2012), además durante el proceso de elaboración y colocación, el personal está constantemente expuesto a sufrir accidentes por las altas temperaturas, así como también expuestos a sustancias que pueden deteriorar su salud. Cui et al. (2020).

Una alternativa para la construcción de pavimentos asfálticos más limpia y con menor riesgo por ser producida a temperatura ambiente es el uso de las mezclas asfálticas frías, sin embargo, la aplicación de este tipo de mezclas es aún muy limitada, en México se limita exclusivamente su aplicación a carpetas asfálticas no estructurales y bacheo. (SCT, 2002) Esto es debido a que las mezclas asfálticas en frío presentan altos niveles de vacíos Dulain et. al (2016), bajas resistencia a temprana edad y alta sensibilidad a la humedad Dodd et al. (2017). Por ello es necesario mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas frías a fin de ampliar su uso y obtener así beneficios ambientales y disminuir los riesgos a la salud de los trabajadores de la construcción.

1.2. Justificación

Se ha encontrado evidencia de que la incorporación de SBS, en el cemento asfáltico con el cual se produce la emulsión asfáltica brinda un mejor comportamiento de las mezclas frías ante altas temperaturas en conjunto con un porcentaje de cemento portland Xu et al. (2021), por otra parte, derivado de que se busca el menor impacto ambiental sin disminuir la capacidad mecánica de la mezcla, y el cemento portland, aunque se usa en bajos porcentajes es un producto con una alta huella de carbono, por lo cual se busca reducir el uso de este y se ha encontrado que este se puede sustituir parcialmente por una combinación de materiales que son producto de la industria acerera y termo eléctrica, como lo es la escoria de alto horno y ceniza volante respectivamente, combinándolo en diferentes proporciones se puede tener un mejor comportamiento mecánico que el uso exclusivo de cemento portland como lo menciona Lu et al. (2021).

Por lo anterior esta investigación se centra en la evaluación mecánica de una mezcla asfáltica elaborada con emulsión modificada con SBS y la adición de filler compuesto por la combinación de cemento portland, ceniza volante y escoria de alto horno esperando así un mejor comportamiento mecánico y disminuyendo aún más la huella de carbono que produce por el uso de materiales producto de desecho.

1.3. Hipótesis

El uso de una emulsión modificada y la adición de relleno cementante en la fabricación de una mezcla asfáltica fría, reducirá la susceptibilidad a la humedad y la deformación permanente en comparación con una mezcla asfáltica en frío tradicional.

1.4. Objetivos

Diseñar una mezcla asfáltica fría usando una emulsión modificada y la adición de rellenos cementantes para posteriormente evaluar la susceptibilidad a daño por humedad y deformación permanente.

Comprobar si la combinación de la emulsión modificada y los rellenos cementantes dentro de la mezcla asfáltica fría brinda un mejor comportamiento que el uso de estas técnicas por separado.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se enuncian la teoría básica partir de la cual se desarrolla este proyecto de investigación, así como las normativas y manuales que se emplearán para la caracterización de agregados, diseño y evaluación mecánica de la mezcla asfáltica.

2.1. Pavimentos

Un pavimento puede definirse como una estructura integrada por un conjunto de capas de materiales apropiado cuyas funciones son las transmitir

adecuadamente los esfuerzos generados por las cargas del tránsito, y proporcionar una superficie de rodadura con textura adecuada para la seguridad de los usuarios que sea a su vez resistente a la acción de los vehículos, al intemperismo y otros agentes que puedan causar daño a las capas inferiores.

Los pavimentos se pueden clasificar en tres tipos de acuerdo con los materiales que está compuesta la superficie de rodamiento y la forma que esta distribuye los esfuerzos a las capas inferiores.

2.1.1. Pavimentos Flexibles:

Estos pavimentos se identifican por tener en una superficie de rodadura conformada por concreto asfáltico, comúnmente denominada carpeta asfáltica y capas inferiores tales como lo son base, subbase, subrasante y subyacente.

De acuerdo con Crespo (2002), estos pavimentos presentan poca resistencia a la flexión y deben ser diseñados de tal manera que resista los esfuerzos producidos sin ocasionar deformaciones permanentes severas que afecten la funcionalidad del pavimento.

Los pavimentos flexibles son analizados comúnmente con mediante la teoría multicapa de Burmister. En este tipo de sistemas se diseñan con materiales de una mejor calidad en las capas más superficiales, en donde se producen esfuerzos de tensión más grandes, y con materiales de una menor calidad en las capas inferiores subsecuentes dónde los esfuerzos de tensión que se deben soportar van disminuyendo con la profundidad. Huang (2004) menciona que este tipo de diseño permite el uso de materiales locales, lo cual resulta en un diseño más económico, mayormente eso es cierto en las regiones dónde no se dispone de material de alta calidad a bajo costo, pero si de materiales locales de calidad inferior, pero de bajo costo.

Un ejemplo de la estructura de un pavimento flexible observa en la figura 1, dónde, en la cual se pueden observar las siguientes capas:

1. **Carpeta asfáltica:** Capa que se construye mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos de cierta granulometría, aglutinante asfáltico y/o aditivos. (SCT, 2020), según menciona Higuera C. (2015) su principal función es la de proveer una superficie de rodadura, suave y segura, impermeabilizar la estructura y dar una mejor capacidad estructural.

2. **Base:** Capa de materiales pétreos seleccionados que se construye

generalmente sobre la subbase o la subrasante, cuyas funciones principales son proporcionar un apoyo uniforme a la carpeta asfáltica, la capa de rodadura asfáltica o la carpeta de concreto hidráulico; soportar las cargas que éstas le transmiten aminorando los esfuerzos inducidos y distribuyéndolos adecuadamente a la capa inmediata inferior, y proporcionar a la estructura del

pavimento la rigidez necesaria para evitar deformaciones excesivas, drenar el agua que se pueda infiltrar e impedir el ascenso capilar del agua subterránea (SCT, 2011), su función al igual que la de subbase es la de disminuir las deformaciones, amortiguar los cambios de volumen de la subrasante, resistencia a las cargas y drenaje según menciona Higuera C. (2015).

3. **Subbase:** Capa de materiales pétreos seleccionados que se construye sobre la subrasante, cuyas funciones principales son proporcionar un apoyo uniforme a la base de un pavimento asfáltico, soportar las cargas que éste le transmite aminorando los esfuerzos inducidos y distribuyéndolos adecuadamente a la capa inmediata inferior, y prevenir la migración de finos hacia las capas superiores. (SCT, 2011).

4. **Subrasante:** Es una capa de suelo natural que ha sido seleccionado o cribado,

producto de cortes o de extracción de banco, que se coloca inmediatamente después de la capa de subyacente (SCT, 2021 a).

5. **Subyacente:** Es una capa formada por suelo y fragmentos de roca, producto de cortes o de extracción de banco y es colocada inmediatamente después de la capa de terraplén. (SCT, 2021 b).

6. **Cuerpo de terraplén:** Un terraplén es una estructura que se construye con materiales producto de cortes o procedente de banco, colocada con el fin de obtener el nivel de la subrasante que indique el proyecto, ampliar la corona, cimentar estructuras, formar bermas y bordos y tender taludes. (SCT, 2016).

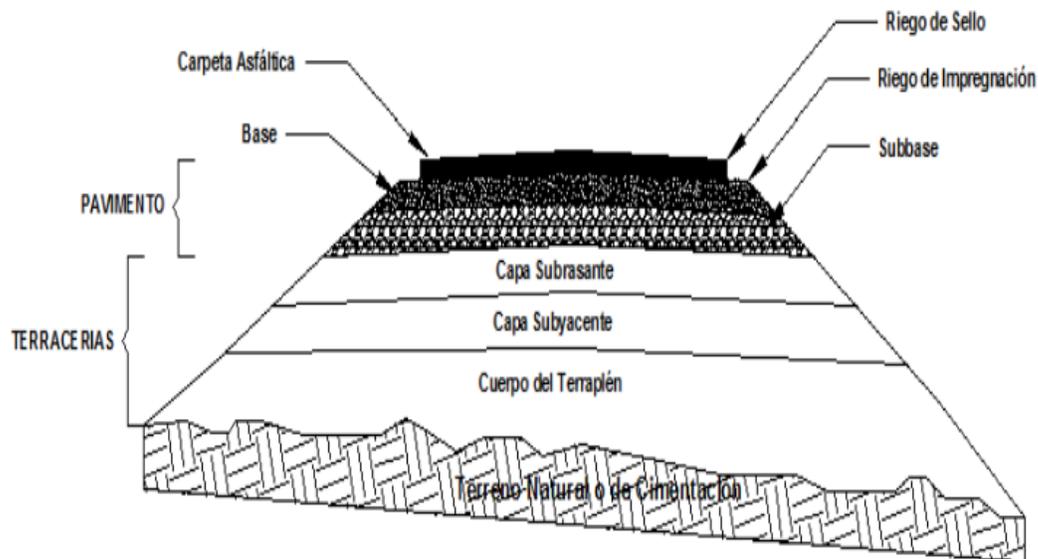


Figura 1. Representación gráfica de las capas que componen un pavimento flexible.

2.1.2. Pavimento rígido:

Estos pavimentos se identifican por tener en una superficie de rodamiento

hecha de concreto hidráulico, se le denominada losa, la cual se apoya sobre una capa de subrasante u otra capa de material seleccionado denominado subbase del pavimento rígido.

Es debido a que la losa de concreto hidráulico tiene una gran rigidez y un alto módulo de elasticidad, que los esfuerzos se producen en una zona muy amplia, por lo que los pavimentos rígidos que se construyen con concreto deben ser analizados por la teoría de placas, y no por la teoría de capas.

Puede decirse que la teoría de placas es variante simplificada de la teoría de capas en la cual se supone a la losa de concreto hidráulico como una placa de un grosor medio con un plano de la flexión que sigue siendo plano aún después de la flexión. Si se aplicara carga al interior de la losa, esta puede ser analizada mediante la teoría de placas o de capas y ambas deberían de producir casi el mismo esfuerzo o deformación por esfuerzos de flexión, mientras que, si se aplicara carga en torno al borde de la losa aproximadamente a unos 60 centímetros, sólo sería aplicable la teoría de placas. El motivo por el cual la teoría de capas es válida para pavimentos flexibles y no lo es para los pavimentos rígidos es debido a que la losa de concreto hidráulico es más rígida que una carpeta asfáltica y esta distribuye las fuerzas en una mayor área y por ello a una distancia de 60 centímetros del borde de esta se contempla demasiado alejada, además la presencia de juntas en un pavimento rígido produce que la teoría de capas sea inaplicable

Otra diferencia importante a considerar con un pavimento flexible es que un pavimento rígido se coloca después de la capa de subrasante, sobre una sola capa de material granular o bien sobre una capa de material estabilizado (Huang, 2004).

En función de las cargas a las que será sometido el diseño puede tener varias capas, como se observa en la figura 2.

- **Losa de concreto hidráulico:**

Es una estructura plana de concreto hidráulico, que puede o no estar reforzada con acero, cuya función es la de proporcionar una superficie de rodadura uniforme y cómoda para el usuario, resistir las cargas impuestas por el tránsito e impedir el paso de agua a las capas inferiores.

Existen diversos tipos de losas:

- a) De concreto simple
 - b) Concreto reforzado
 - c) Concreto preesforzado
-
- **Subbase:** es una capa conformada por material granular, cuyas principales funciones son las de ser una capa de transición de los esfuerzos a las capas inferiores, dar capacidad estructural al pavimento, amortiguar los cambios volumétricos de la subrasante y facilitar el drenaje.
 - **Subrasante:** Es una capa que se coloca debajo de la subbase y puede estar constituida por suelo o fragmentos de roca producto de corte o bien de material de banco, cuya principal función es la de servir de fundación para la estructura del pavimento Zalda L. (2019).
7. **Cuerpo de Terraplén:** al igual que en los pavimentos flexibles, el cuerpo del terraplén es una estructura que se construye con materiales producto de cortes o procedente de banco, colocada con el fin de obtener el nivel de la subrasante que indique el proyecto, ampliar la corona, cimentar estructuras, formar bermas y bordos y tender taludes. (SCT, 2016).

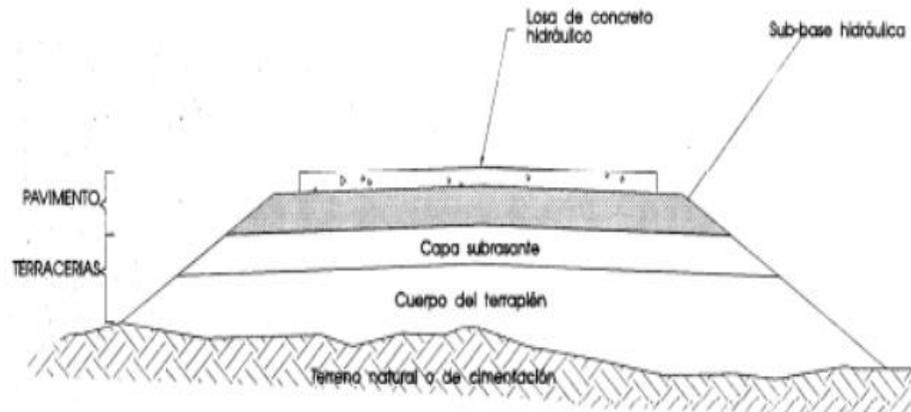


Figura 2. Representación gráfica de las capas que componen un pavimento rígido.

2.1.3. Pavimentos compuestos

Se considera un pavimento compuesto a aquel que está formado por capas de concreto hidráulico y carpeta asfáltica. El uso de concreto hidráulico como una capa inferior y mezcla asfáltica como capa de rodadura resulta en un pavimento idóneo, al combinar las características más deseables de ambas capas. Por su parte el concreto hidráulico proporciona un basamento bastante fuerte y la mezcla asfáltica proporciona una superficie más lisa. A pesar de gozar de estas características estos pavimentos no suelen usarse salvo escasas veces construidas desde un inicio. Huang (2004).

2.2. Mezclas asfálticas

2.2.1. Definición de mezcla asfáltica

Para la construcción un pavimento asfáltico se utiliza una mezcla de agregados pétreos junto con un aglutinante derivado de hidrocarburos, a este tipo de mezclas se les denomina mezclas asfálticas.

El comportamiento que tienen este tipo de mezclas está directamente ligado a las propiedades de sus componentes y a la dosificación de cada uno de ellos, comúnmente una mezcla asfáltica está compuesta de un 90% de agregados pétreos tanto en su fracción gruesa como fina, 5% de rellenos minerales y 5% de aglutinante asfáltico.

La calidad de cada uno de estos puede influir significativamente sobre las características mecánicas de la mezcla, por ello es necesario garantizar la calidad de todos los componentes.

2.2.2. Clasificación de Mezclas asfálticas

Existe una gran diversidad de mezclas asfálticas por lo cual dependiendo de cada una de las características se pueden clasificar de distintas maneras, a continuación se describen las principales clasificaciones.

Por fracciones del agregado

- a) Masilla asfáltica: este tipo de mezcla está constituida por relleno mineral y cemento asfáltico.
- b) Mortero asfáltico: constituido por agregados pétreos finos (arena) en combinación con masilla asfáltica.
- c) Concreto asfáltico: agregados gruesos en combinación con cemento asfáltico
- d) Macadam asfáltico: una combinación de agregados gruesos (grava) con cemento asfáltico.

Por granulometría

- a) Mezclas Continuas: en este tipo de mezclas existe una cantidad bien distribuida de diversos tamaños de agregado pétreo.
- b) Mezclas Discontinuas: existe una limitación en los tamaños de agregados.

Por proporción de los vacíos

- a) Mezclas densas: la proporción de vacíos es menor al 6%.
- b) Mezclas semidensas: la proporción de vacíos se encuentra entre un 6% a 10%.
- c) Mezclas abiertas: La proporción de vacíos es mayor al 12 %

- d) Mezclas porosas: La proporción de vacíos es mayor al 20%

Por el tamaño del agregado Pétreo

- a) Granulometría gruesa: Este tipo de mezclas tiene un tamaño máximo de 10 mm.
- b) Granulometría fina: se trata de mezclas asfálticas compuestas por áridos finos con polvo mineral y ligante asfáltico.

Por la estructura del agregado pétreo

- a) Mezclas con esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, debido a roce interno de los agregados.
- b) Mezclas sin esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente debido a que la resistencia viene principalmente de la cohesión con la masilla.

Por la temperatura de mezclado y tenido

Este tipo de mezclas se pueden clasificar de acuerdo a la temperatura en que se elaboran en tres categorías principales: Mezclas asfálticas calientes HMA (Hot mix asphalt, por sus siglas en inglés), Mezclas templadas WMA, (Warm mix asphalt, por sus siglas en inglés) y Mezclas frías CMA (Cold mix asphalt, por sus siglas en inglés) Jain et. al (2021).

- a) Mezclas asfálticas en caliente
- b) Mezclas asfálticas tibias
- c) Mezclas asfálticas en frío

2.2.3. Mezclas en caliente

La primera categoría corresponde a las HMA, este tipo de mezcla es la más usada a nivel internacional y es producida a altas temperaturas que van desde 150°C hasta los 190° C Al-Busaltan et al. (2012), este tipo de mezcla debe su popularidad debido a sus ventajas como los son un buen desempeño a temprana edad y su costo; sin embargo, su producción trae consigo la liberación de grandes cantidades de efecto invernadero, que contribuyen al calentamiento global y riesgos a la salud de los trabajadores que intervienen en el proceso. Cui et al. (2020).

2.2.4. Mezclas Tibias

Este tipo de mezclas son producidas en un rango de temperatura que va de 110 a 140°C, lo cual implica una reducción en la temperatura que trae consigo una disminución de la liberación de gases de efecto invernadero. La disminución del rango de temperatura en producción se logra mediante el uso de aditivos orgánicos, aditivos químicos o el uso de técnicas de espumado. Este tipo de mezclas a su vez se puede subdividir en dos: mezclas templadas y mezclas semitempladas HWMA (Half-warm mix asphalt, por sus siglas en inglés), en esta última subcategoría las temperaturas de producción son menores a 100°C, normalmente entre 70 a 95°C Rubio et. al (2012).

2.2.5. Mezclas Frías

En la última categoría se encuentran las CMA, este tipo de mezcla es fabricada en un rango de temperatura que va de 0 a 40°C Una mezcla asfáltica fría es una combinación de agregado mineral y emulsión asfáltica. (Asphalt institute, 1989), este tipo de mezclas se aplican a temperatura ambiente y no requiere de un proceso de compactación por laminación Zhu et al. (2019).

Dependiendo del tipo de ligante asfáltico las mezclas frías se pueden subdividir en

- a) Mezclas frías emulsificadas

2.2.6. Comparativa de mezclas asfálticas

De acuerdo con Jain et al (2021) el consumo de combustible usado en la elaboración de cada tipo de mezcla para las está entre 6.2 a 7.2 kg/ton, para las mezclas templadas va de 5.0 a 6.0 kg/ton, las mezclas semi- templadas de 1.5 a 2.6 kg/ton, mientras que para las mezclas frías es de aproximadamente cero; por otra parte, las emisiones de CO₂ de cada tipo de mezcla quedan de la siguiente manera: 22.0 kg/ton para HMA, 19.0 kg/ton para WMA, 8.0 kg/ton para las HWMA, y 1.0 kg/ton para las CMA. Figura 3

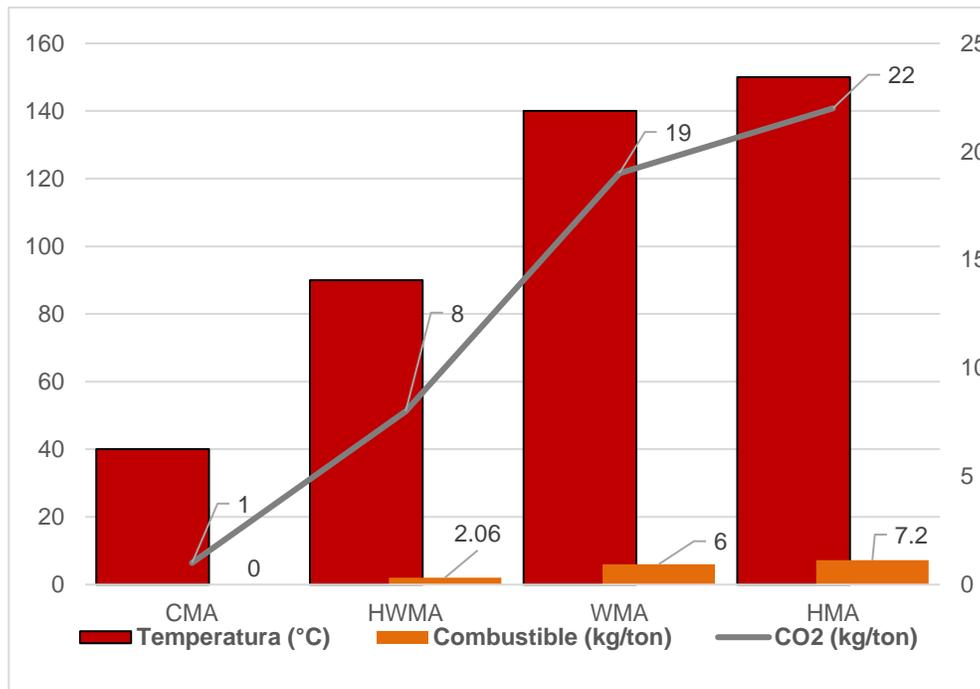


Figura 3. Tipos de mezclas, temperatura, uso de combustible y CO2 liberado en su producción, elaboración propia, adaptada de Jain et al. (2021)

Como se observa en la figura 3, las CMA son el tipo de mezclas que para su elaboración requieren una menor cantidad de combustible durante su elaboración y que menor cantidad de dióxido de carbono liberan a la atmosfera.

Además de la problemática ambiental que tienen las HMA, según Cui et al. (2019) durante la elaboración y colocación de mezclas asfálticas calientes, se generan compuestos orgánicos volátiles (COV), los cuales tienen efectos nocivos en la salud. Este tipo de compuestos se desprenden como vapor en el ambiente y entran en el organismo de los trabajadores en diferente medida dependiendo de su cercanía con el material, la dirección del viento y la temperatura de la mezcla, de acuerdo con lo investigado por Cui et al. (2019) las concentraciones de COV disminuyen a medida que disminuye la temperatura de la mezcla.

La evidencia sugiere que la mejor opción para la construcción y conservación de pavimentos asfálticos, en cuanto al cuidado del medio ambiente y la salud física de los trabajadores, es el uso de las CMA; sin embargo, estas mezclas presentan un bajo desempeño mecánico, por lo cual es importante solucionar este problema a fin de ampliar su uso y tener los beneficios ambientales que ofrecen.

Para este trabajo se revisarán dos factores que desempeñan un rol muy importante en el comportamiento de las CMA, el efecto de la temperatura sobre la capa de pavimento y el efecto del relleno mineral (filler), por una parte se tratará de minimizar el efecto de la temperatura, mediante el uso del modificador SBS en el cemento asfáltico a partir del cual se elabora la emulsión asfáltica y, por otra parte, se estudiará el efecto que tiene el sustituir el agregado mineral filler, por una combinación de cemento hidráulico, escoria de alto horno y cenizas volantes.

2.3. Material pétreo

2.3.1. Agregado grueso

En el caso de este estudio, la mezcla objetivo, es una que tenga características de alto desempeño nivel 2 en protocolo AMAAC, es decir, que el número de ejes equivalentes sea de entre 10 a 30 millones (AMAAC, 2011).

Las características físicas básicas que debe cumplir la fracción gruesa de los agregados pétreos se muestran a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (grava).

Característica	Norma	Especificación
Desgaste de los	ASTM C131-20	30 máx.

ángulos, %			
Desgaste Microdeval, %	ASTM D6928-17		18 máx.
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104-99/ASTM C88-05		15 máx., para sulfato de sodio 20 máx., para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 o más caras)	ASTM D5821		90 min
Partículas alargadas, %	ASTM D4791		Relación 5 a 1, 10% máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D4791		Relación 5 a 1, 10% máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	AMAAC RA-08/2010		90 min

Fuente: elaboración propia, retomada de AMMAC, 2011.

2.3.2. Agregado Fino

Por su parte para la fracción fina las características son las presentadas en la tabla 2.

Tabla 2. Requisitos de calidad de la fracción fina de material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (arena).

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM C131-06	50 min.
Angularidad, %	AASHTO T327-99/ASTM D6928-10	40 mín.
Azul de metileno, ml/g	Recomendación AMAAC RA05/2010	15 máx.

Fuente: elaboración propia, retomada de AMMAC, 2011.

De acuerdo con Jain et al. (2021) las recomendaciones de los agregados pétreos son las mismas para las mezclas frías que para las mezclas calientes, por lo que tomaremos como base las recomendaciones para los agregados pétreos utilizados en mezclas de alto desempeño, recomendadas en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño proporcionadas por AMAAC.

2.4. Ligante asfáltico

2.4.1. Cemento asfáltico

De acuerdo con la ASTM el cemento asfáltico es aquel material aglomerante de tonalidad café oscuro a negro, cuya consistencia puede ser sólida, semisólida o líquida, es producto de la destilación del petróleo, y entre sus componentes principales se encuentran los asfaltenos frecuentemente.

2.4.2. Emulsión asfáltica

En general una emulsión se refiere a la dispersión fina de un líquido en otro, los cuales son inmiscibles entre sí y están unidos por un emulsificante o emulgente (IMT, 2001). Por otra parte, Dybaiski (1976) define a una emulsión asfáltica como como una mezcla homogénea de diminutas gotas de asfalto suspendidas en una fase continua de agua. Mientras que Takamura, K., & James, A. (2015) menciona que las emulsiones de asfalto son dispersiones continuas de agua de finas gotas de asfalto de 1 a 10 μm de diámetro, fabricadas con la ayuda de un molino coloidal y tales as emulsiones pueden contener entre un 40% y un 80% en peso de asfalto, y pueden ser aniónicas o catiónicas de acuerdo con el origen químico de los emulsionantes utilizados.

Estos tipos de emulsiones se denominan generalmente emulsiones de aceite en agua (o/w). Su elaboración implica el uso de un dispositivo de gran velocidad con alto cizallamiento, tal como un molino coloidal. El molino coloidal descompone el asfalto fundido en gotas diminutas en presencia de agua y un químico, emulsionante de superficie activa. El emulsionante imparte sus propiedades al cemento asfáltico dispersado y mantenimiento estable de la suspensión de gotas de asfalto.

Los tres componentes químicos del asfalto emulsionado, es decir, asfalto, agua y emulsionante, unidos por la influencia química de un molino coloidal, son los ingredientes necesarios en el química y producción relacionada de emulsiones asfálticas para pavimentación.

1. Agua
2. Asfalto
3. Emulsificante

2.4.3. Modificadores

Con el paso de los años se ha ido incrementando cada vez más los volúmenes de tránsito que circulan por las carreteras, generando con ello una mayor demanda en los pavimentos, derivado de esto ha surgido la necesidad de hacer pavimentos que respondan a estas necesidades, algunos de estos esfuerzos se han enfocado en el control de los componentes de las mezclas asfálticas y principalmente en el asfalto, debido a que las propiedades de este dependen principalmente de su origen se han encontrado que se puede crear cierta uniformidad modificándolos con ayuda de polímeros. La modificación de un asfalto es una práctica que consta de adicionar polímeros a un asfalto natural con el fin de mejorar sus características físicas y químicas, una de las principales mejoras que se tienen en la modificación del asfalto es la reducción de la susceptibilidad a la temperatura, según lo menciona Montero A. (1998). El asfalto modificado se ha vuelto en los últimos años en una de las mejores opciones para construcción de carpetas asfálticas. Se sabe que para este tipo de aplicación los niveles de concentración del polímero son relativamente bajos: del 2 al 3 % cuando se usa SBS (estirenobutadieno-estireno) y del 4 al 8 % cuando se usan poli-olefinas amorfas del tipo APP (polipropileno amorfo) (IMT, 2001). Existe una gran cantidad de modificadores usados para el mejoramiento de los asfaltos, entre los que se pueden encontrar el caucho natural, caucho sintético, y otros diversos polímeros.

Caucho natural:

Tal como su nombre lo dice este caucho se obtiene de manera natural mediante la extracción de la sabia, conocida como látex, de cierto tipo de árboles que lo producen, como lo son especies Hevea, Ficus, entre otras.

Caucho sintético:

Existen diversos tipos de caucho sintético, pero dos de los más usados a nivel mundial para modificar el asfalto son el Estireno-butadieno (SBR) y el Estireno-butadieno-estireno (SBS)

Estireno-butadieno (SBR)

El Estireno butadieno es conocido por ser el caucho sintético más usado en todo el mundo, se estima que alrededor del 60% del del caucho sintético es el SBR. Este tipo de caucho sintético es un copolímero del estireno y el 1,3 butadieno.

Estireno-butadieno-estireno (SBS)

Más popular por sus siglas en inglés SBS (Styrene-Butadiene-Styrene), es un copolímero compuesto por una cadena de poliestireno seguida por una cadena larga de polibutadieno y al final otra cadena de poliestireno (Juárez, 2012). Figura 4

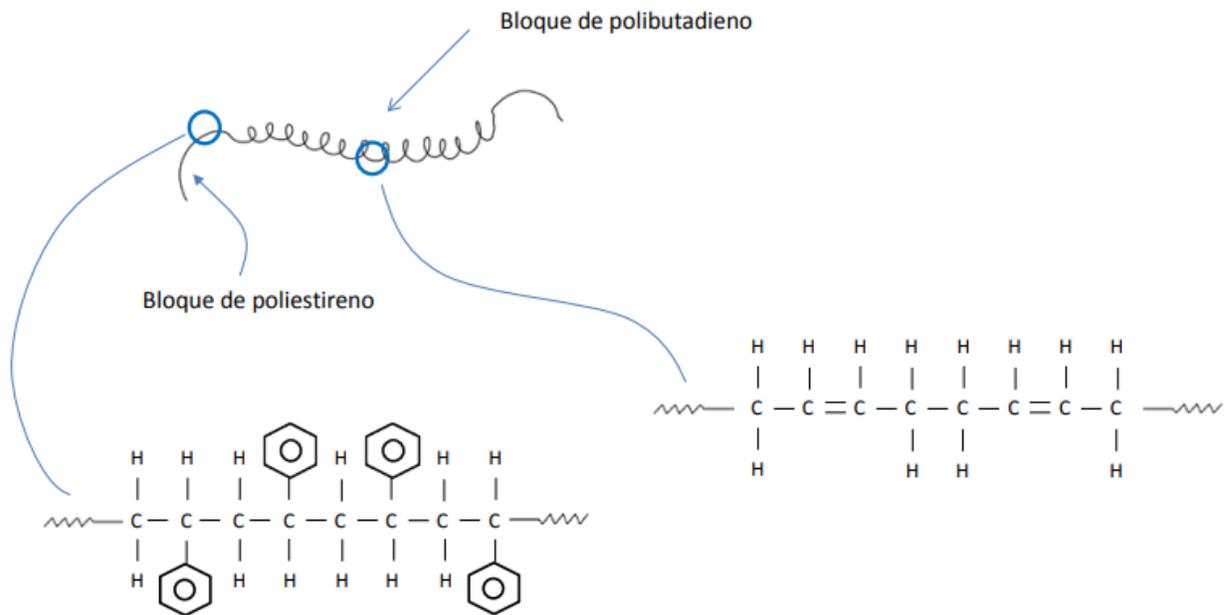


Figura 4. Representación esquemática de una cadena de estireno-butadieno-estireno (SBS)

Fuente: Juárez, 2012

Por una parte, el poliestireno es un polímero duro y resistente que brinda al SBS durabilidad, por otro lado el polibutadieno es un material con propiedades similares al caucho aportando estas características al SBS.

2.5. Rellenos

Se considera relleno o “filler” a la fracción del material cuyas partículas tienen un tamaño inferior a 0.075 mm, es decir que pasan por la malla no. 2000, este tiene un impacto directo sobre el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica debido a que llena principalmente los vacíos de aire y reduce el espacio entre los agregados, de acuerdo a Al – khateeb y Al Akahras (2011)

2.5.1. Relleno ternario cementante

La sustitución parcial del agregado mineral por cemento portland ordinario brinda una mayor resistencia a edades tempranas y Lu et *al.* (2021) menciona que el uso de cemento Pórtland, cenizas volantes y escoria de alto horno, brindan un mejor rendimiento que el uso exclusivo de cemento Pórtland, además que el hecho de subproductos industriales aminora aún más la huella de carbono de la CMA.

2.5.2. Cemento Pórtland Ordinario (CPO)

Los principales componentes del Cemento Pórtland Ordinario (OPC) son silicatos de calcio (Ca_3SiO_5 y Ca_2SiO_4), aluminato ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) y ferrita ($\text{Ca}_4(\text{Al}_x\text{Fe}_{1-x})_4\text{O}_{10}$) que se abrevian como C3S1 , C2S, C3A y C4AF. A cantidad de otros minerales como los sulfatos de calcio (presentes como yeso, anhidrita y / o hemihidrato), calcita, óxido de calcio, óxido de magnesio, sulfatos de Na y K están generalmente también presentes. Estos componentes reaccionan con el agua para formar varios productos de hidratación como C-S-H (silicato de calcio hidratado), portlandita, etringita, monosulfoaluminato de calcio o monocarboaluminato de calcio. Lothenbach y Winnefeld (2006).

2.5.3. Cenizas volantes (CV)

Las cenizas volantes son un subproducto de la combustión de carbón en la producción de energía eléctrica, generalmente este material este compuesto por partículas con un tamaño similar al limo.

(Menores a 0.075 mm) y tiene una gravedad específica que ronda entre 2.1 a 3.0 y una superficie de entre 170 a 1000 m²/kg. Los principales componentes de las cenizas volantes son sílice, alúmina, óxido de hierro y calcio M. Ahmaruzzaman (2010).

2.5.4. Escoria de alto horno (EAH)

De acuerdo con Espinoza y Escalante (2011) la escoria de alto horno es un subproducto no metálico obtenido de la fabricación del acero cuya composición es similar a la del Cemento Portland, al igual que dicho cemento tiene propiedades hidráulicas, lo cual significa que cuando se pone en contacto con agua forma nuevos productos mediante reacciones de hidratación.

2.6. Metodologías para diseño de mezcla asfáltica

2.6.1. Método Marshall

La metodología Marshall para el diseño de mezclas, fue elaborada en la década de 1930 por Bruce Marshall del departamento de carreteras de Mississippi, en esta menciona que la compactación en laboratorio produciría una densidad que representaría la de campo después del tránsito en situ y recomendaba seleccionar el contenido de asfalto que produjera la mayor densidad mientras se cumplirá con un mínimo de estabilidad y flujo, tras la segunda guerra mundial surge la necesidad de construir pistas en sitios remoto lo cual requirió un procedimiento con equipo portátil y sencillo, esto hizo que el cuerpo de ingenieros del ejército de EE.UU. adoptará la metodología Marshall. En la década de 1950 través de una exhaustiva investigación en y estudios de correlación, el cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, mejoró y añadió algunos aspectos a la metodología de pruebas Marshall, a través de los años se fue popularizando cada vez más que para principios de la década de 1990 aproximadamente el 75 % de las agencias estatales usaban ya la metodología Marshall para el diseño de mezclas. (*Asphalt institute, 2014*)

Esta metodología es aplicable a mezclas con granulometría densa, en donde con una sola selección de agregados, se ponen a prueba cinco diferentes contenidos de asfalto, para obtener sus propiedades y resistencia mecánica, para seleccionar de entre ellos el que mejor resultado brinde en función del tráfico, clima y los materiales cercanos al sitio.

2.6.2. Metodologías de alto desempeño

Con el fin de realizar investigación en pro de mejores pavimientos, el congreso de los Estados Unidos de América creó en 1987 el Strategic Highway Research Program

(SHRP), con un presupuesto de 150 millones de dólares, lo cuales fueron invertidos en el desarrollo de pruebas e investigaciones basadas en el asfalto para crear especificaciones relacionadas con el análisis de laboratorio y con aplicaciones en campo dando como resultado final el sistema de diseño y análisis de mezclas asfálticas Superpave, *Superior Performance Asphalt Pavements*, el cual está basado en el desempeño del pavimento para especificar ligantes asfálticos y agregados minerales. El sistema de análisis y diseño de mezcla Superpave utiliza grados cada vez más rigurosos de prueba y análisis para proporcionar una mezcla de buen desempeño para un proyecto de pavimento determinado. El procedimiento de diseño de la mezcla Superpave implica una cuidadosa selección de materiales y dosificación volumétrica como primer enfoque para producir una mezcla que se desempeñe con éxito.

Los cuatro pasos básicos del diseño de la mezcla asfáltica Superpave son la selección de materiales, la selección de la estructura agregada del diseño, la selección del contenido de ligante asfáltico del diseño y la evaluación de la sensibilidad a la humedad de la mezcla. De acuerdo al nivel de tránsito se considera en distintos niveles el análisis y diseño de la mezcla. Tabla 3.

Tabla 3. Niveles de diseño en función de ejes equivalentes ESAL.

<i>Transito (ESAL)</i>	<i>Nivel de Diseño</i>	<i>Requerimiento de ensayo</i>
<i>ESAL < 10⁶</i>	<i>Primer nivel de análisis</i>	<i>Diseño volumétrico</i>
<i>10⁶<ESAL < 10⁷</i>	<i>Análisis intermedio</i>	<i>Diseño volumétrico + pruebas de predicción del comportamiento</i>
<i>ESAL > 10⁷</i>	<i>Análisis completo</i>	<i>Diseño volumétrico + pruebas de predicción del comportamiento adicionales</i>

En México la metodología superpave fue adaptada con algunas variantes y adicionando algunas pruebas estableciéndose como Protocolo AMAAC, en el cual a diferencia de la metodología superpave, consta de cuatro niveles. Tabla 4

Tabla 4. Niveles de diseño metodología amaac en función de ejes equivalentes de 8.2 t.

Nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes	Requerimiento de ensayo
Nivel I Tránsito bajo	Menor a 1,000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	De 1,000,000 a 10, 000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Tránsito alto	De 10,000,000 a 30, 000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente • Módulo dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	Más de 30, 000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente • Módulo dinámico • Fatiga

Fuente: elaboración propia, retomada de AMMAC, 2011.

Evaluación de la susceptibilidad a la humedad mediante tensión indirecta TSR

La susceptibilidad al daño por humedad, se define como la relación existente entre la resistencia a la tensión indirecta promedio de un conjunto de probetas de mezcla asfáltica sometidas a un proceso de acondicionamiento y otro con semejantes características sin dicho acondicionamiento. Tales probetas son compactadas en laboratorio hasta conseguir un porcentaje de vacíos que este en un rango de 6 a 8 %, luego se selecciona un subconjunto de contenido semejante y se mantiene seco, mientras que el otro subconjunto se somete a un proceso de saturación parcial por vacío para llenar entre el 70 y 80 % de sus vacíos, luego a un proceso de congelamiento.

La intensidad del daño causado por la humedad, es medido por la relación de la

resistencia a la tracción de las probetas húmedas versus el de las probetas secas (IMT,2018)

La resistencia a la tensión TSR se expresa de la siguiente manera:

$$TSR = \frac{Stm}{Std} * 100$$

Donde:

$$TSR = \text{Resistencia a la tracción, \%}.$$

Stm

= Resistencia a la tracción promedio del grupo acondicionado en húmedo, kPa (psi).

Std = Resistencia a la tracción del grupo de probetas secas, kPa (psi).

De acuerdo al protocolo amaac el valor mínimo aceptable para todos los niveles de tránsito es de 80.00%.

Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente mediante Rueda Cargada de Hamburgo. AASHTO T 324

Esta prueba de control que se utiliza para determinar la susceptibilidad al daño prematuro debido a la debilidad del agregado, rigidez inadecuada del aglomerante o daño por humedad. En esta prueba se determina la profundidad de la rodera y el número de pasadas de una rueda que ejerce una determinada presión hasta la falla. Para obtener el valor de la deformación permanente es necesario graficar la profundidad de la rodera contra el número de pasadas (gráfica obtenida por el dispositivo de seguimiento de la rueda cargada de Hamburgo). (AASHTO T 324). Además de la gráfica de este ensayo se obtiene la consolidación post compactación, pendiente de creep, pendiente de desgranamiento y el punto de inflexión, parámetros que dan indicadores del comportamiento esperado en campo. Se estima que cerca de las la pendiente del 1000 pasadas la rueda densifica la mezcla y a la deformación en estos ciclos se le denomina consolidación post compactación, luego se tendría la pendiente *creep* la cual es inversa a la deformación en la región lineal de la curva, comienza inmediatamente después de los efectos de post compactación y concluye antes de que inicie el

desgranamiento, e indica la acumulación de la deformación permanente debido al flujo plástico. La pendiente de desgranamiento es el inverso de la tasa de deformación en la región lineal de la curva de deformación, después de comenzar el desgranamiento y hasta que finaliza el ensayo. La pendiente de desgranamiento indica la acumulación de la deformación permanente debido al daño por humedad. El punto de inflexión del desgranamiento es dónde se intersecan la pendiente de *creep* y la pendiente de desgranamiento indicando así el número de pasadas que una mezcla asfáltica puede soportar a una temperatura determinada antes de que el agregado y el asfalto comiencen a separarse. El punto de inflexión y la pendiente de desgranamiento están relacionados con la resistencia a la humedad de la mezcla asfáltica Figura 5. (IMT,2018).

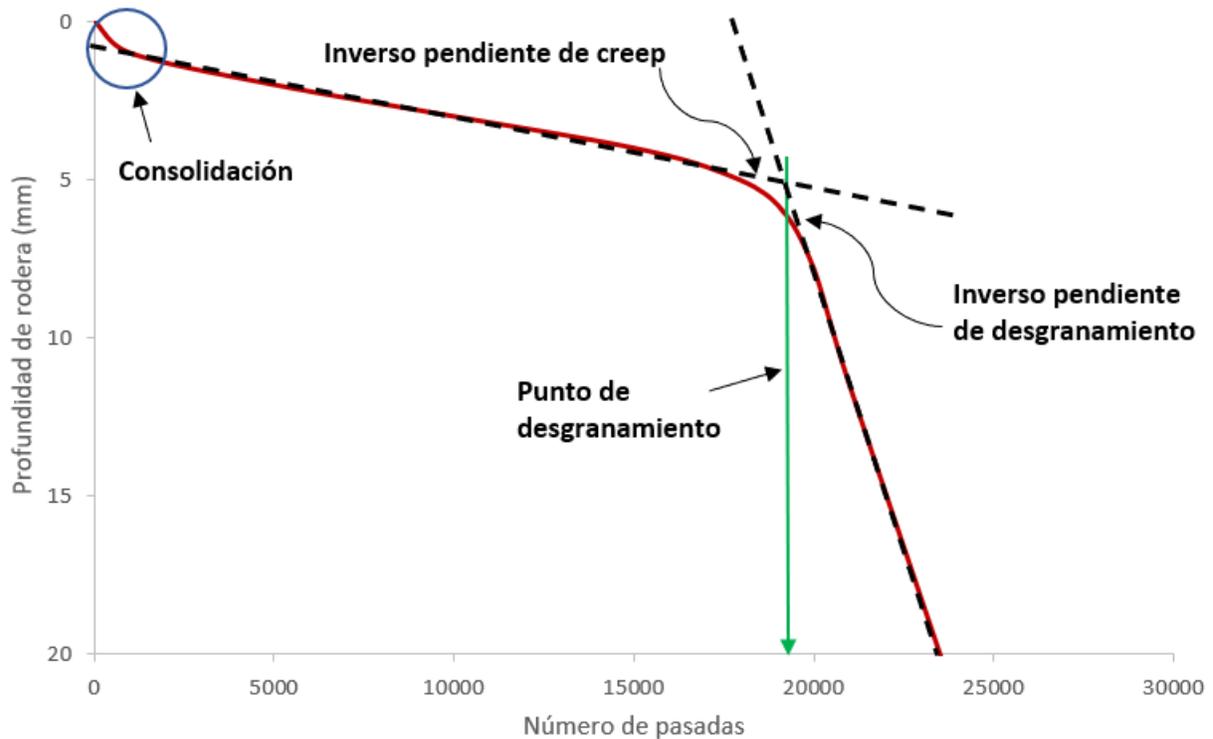


Figura 5. Esquema de los resultados de un ensayo de la rueda cargada de Hamburgo., Fuente: elaboración propia, retomado de (IMT, 2018).

Por su parte los requerimientos mínimos del protocolo amaac para la rueda cargada de Hamburgo dependen del mínimo de pasadas para llegar a la deformación máxima de 10.00 mm.

Tabla 5. Número de pasadas para la deformación máxima en prueba de rueda cargada de Hamburgo.

Nivel de tránsito	Mínimo de pasadas para la deformación de 10 mm
bajo	10,000
medio	15,0000
alto	20,000

Fuente: elaboración propia, retomada de AMMAC, 2011.

2.6.3. Metodología Marshall modificado de la Universidad de Illinois

En México actualmente no se cuenta con una metodología oficial para el diseño de mezclas asfálticas frías, por lo cual es común recurrir a manuales internacionales de diseño, como en este caso es uno de los referentes principal a nivel internacional lo es el manual Asphalt Cold Mix Manual No. 14 del Asphalt Intitute.

Esta metodología está basada en tres principales pruebas:

1. Prueba de cubrimiento del agregado.
2. Determinación de la humedad óptima de compactación.
3. Determinación del contenido óptimo de asfalto residual.

Previo a los pasos mencionados es necesario conocer las características de los dos principales elementos que componen la mezcla, los agregados y la emulsión asfáltica, puesto que además de asegurar que cumplen con ciertas características, por una parte se requiere conocer a detalle la granulometría y por otra la cantidad de cemento asfáltico presente en la emulsión.

Para este método se parte de la tener la granulometría propuesta para así determinar un contenido preliminar de emulsión a utilizar, dicho contenido esta expresado por la siguiente ecuación:

$$P = (0.05A + 0.1B + 0.5C) \times 0.7$$

Donde:

P= porcentaje de emulsión a usar por peso de agregados secos

A = Porcentaje retenido en la malla No. 8

B= Porcentaje que pasa la malla No. 8 y retenido en la malla No. 200

C= Porcentaje de agregado que pasa la malla No. 200

Una vez conocido el contenido de emulsión inicial se procede a realizar las otras pruebas.

Prueba de cubrimiento del agregado:

Para ello se toma una muestra de 500 g, se calcula el agua necesaria para llegar a cierta humedad considerando la humedad presente en la emulsión a agregar, se añade al material y se homogeniza, para posteriormente ahora si agregar el porcentaje de emulsión determinado con la formula, se mezcla por un minuto si es con medios mecánicos o por tres minutos si es de manera manual.

Posteriormente se vierte en un recipiente y se espera a que haya una perdida de humedad para después contar las partículas que fueron cubiertas con la emulsión.

Determinación de la humedad óptima de mezclado y compactación:

Es necesario determinar la cantidad de humedad presente en la mezcla en el momento de la compactación para lograr una mezcla con la mayor densidad posible, si se comparación con una mezcla caliente, las humedades de mezclado y compactación sería el equivalente al rango de temperatura de mezclado y compactación, esto debido a que se busca que la mezcla tenga una viscosidad adecuada para estos dos procesos.

Para obtener el contenido de agua optimo en la compactación se preparan tres especímenes por cada contenido de agua a evaluar, por lo general se hacen aumentando en 1 % dentro de un rango que definirá luego la curva de densidad vs

contenido de agua. (este rango es definido por la experiencia del diseñador, un punto de partida es el contenido de agua determinado en la prueba de cubrimiento y posteriormente ir incrementando).

El proceso comienza preparando los agradados pétreos, aprox. 1.2 kg para cada espécimen, se calculan los pesos de agregados, emulsión asfáltica, agua de pre humectación, y pérdida de agua al compactar. Una vez calculadas estas cantidades se procede a elaborar la mezcla añadiendo a los agregados el agua de prehumectación, mezclando hasta tener totalmente cubrimientos los agregados, luego añadiendo y mezclando de igual forma la emulsión para posteriormente dejarla airear cuidando la pérdida de agua, hasta llegar a la humedad objetivo de compactación (por lo regular es cuando pierde 1% de humedad), luego se lleva a compactar la mezcla con ayuda del martillo Marshall dando 50 golpes por cara, una vez compactado se lleva a un lugar ventilado y a temperatura constante por un lapso de 24 h, para posteriormente sacar la pastilla del molde y evaluar la gravedad específica bulk de cada uno de los especímenes elaborados. Con la humedad y la gravedad específica bulk se elabora la curva de densidad vs. Contenido de humedad, para así obtener la cantidad de agua necesaria para obtener la máxima densidad, que luego será usada en la determinación de asfalto óptimo residual.

Determinación del contenido óptimo de asfalto residual:

Una vez establecido la cantidad de agua presente en la mezcla, se procede a realizar una serie de especímenes, del mismo modo que se prepararon en la búsqueda del contenido de humedad óptimo, pero esta vez variando la cantidad de asfalto residual presente en la mezcla, con incrementos del 0.5 % y además llevando los especímenes a un horno de secado por otras 24h a una temperatura de 38° C.

Una vez concluido el curado se realizan una serie de pruebas para determinar las características de cada mezcla como lo son la densidad bulk, flujo, estabilidad seca y estabilidad saturada, pérdida de estabilidad, flujo. Se obtiene la cantidad de asfalto que mejor desempeño da en cada una de estas pruebas para luego promediarlos y revisar que cumpla con los parámetros requeridos mínimos para una mezcla asfáltica fría Tabla 6. (*Asphalt Institute, 2001*).

Tabla 6. Requisitos para las mezclas asfálticas frías según el MS-14.

Propiedad	Mínimo	Máximo
Estabilidad a 22° C (N)	2224	-
Perdida de estabilidad (%) después de inmersión en agua	-	50
Cubrimiento del agregado (%)	50	-

2.7. Efecto de la temperatura

Las altas temperaturas ambientales de entre 35-40°C pueden provocar que la temperatura del pavimento asfáltico llegue hasta 70°C o más debido a los efectos de la radiación solar, la temperatura del aire y otros factores como fricción provocada por los neumáticos de los vehículos en contacto con la superficie de rodamiento. Lo anterior en combinación con las altas cargas de los vehículos promueven la formación de roderas.

Xu et al. (2021) han investigado una nueva mezcla asfáltica en frío producida con asfalto emulsionado modificado con SBS y adición de cemento portland, que denominó S-CMA, esta mezcla fue sometida a pruebas de formación de roderas en distintas condiciones de carga y temperatura y comparada con mezclas HMA y WMA de características semejantes, encontrando que el incremento de la temperatura y la carga reduce la resistencia de las mezclas asfálticas a la formación de roderas; sin embargo, la mezcla S-CMA reportó una mayor resistencia a la formación de roderas que las HMA y WMA, dicho comportamiento atribuido a la estructura formada por la reticulación del ligante y la reacción de hidratación del

cemento portland.

2.8. Efecto de los vacíos

La proporción de los vacíos en la mezcla asfáltica juega un papel muy importante en el desempeño mecánico de una mezcla asfáltica, puesto que influye de manera directa en el desempeño mecánico de la mezcla, cuanto menor sea la cantidad de vacíos de aire menos permeable se vuelve la mezcla, mientras que un alto nivel de vacíos de aire da lugar a poros que permiten la entrada de aire y agua que dañan la estructura del pavimento (Asphalt Institute, 2014).

Los vacíos de aire son pequeñas burbujas de aire que se encuentran entre las partículas de los agregados y están recubiertas por asfalto. El agregar filler en una mezcla ayuda a reducir los vacíos contenidos en el agregado mineral (VMA), debido a que actúa como relleno de vacíos dificultando la entrada de agentes agresivos como el agua y aire además de que es el principal aglomerante dentro de la mezcla asfáltica, Mota (2018).

Se ha observado que el remplazo del filler mineral por el aglutinante cementante puede incrementar de manera significativa la resistencia a la formación de roderas y a disminuir la susceptibilidad a la humedad. Lu et. al 2021

3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción del proceso

A fin de cumplir con los objetivos se plantea un proceso que consta de cinco pasos, y se observa gráficamente en la figura 5. El primero de ellos consiste en la obtención, caracterización y/o preparación necesaria de los materiales a usar durante la investigación, esto incluye tanto los agregados pétreos, emulsión asfáltica y los rellenos con propiedades cementantes. Una vez que se han evaluado los agregados y estos cumplen con las características deseables, se procede a realizar el diseño de la mezcla asfáltica a través de la metodología Marshall modificada, para llegar a un contenido óptimo de asfalto residual del cual partir, con el la dosificación óptima obtenida se procede a realizar los especímenes para las pruebas de desempeño de acuerdo a las disensiones necesarias para dichas pruebas realizando distintos tipos de mezcla en dónde se varía el tipo de emulsión y el relleno presente en la mezcla, para ser sometidos entonces a un proceso de curado, cuando cumple el proceso de curado se realizan las pruebas de desempeño mecánico de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad a la deformación permanente, finalmente de los resultados de estas pruebas y se llega a la conclusión sobre el efecto que tienen las variables en el comportamiento de la mezcla.



Figura 6. Esquema representativo de la metodología de trabajo propuesta.

3.2. Obtención y caracterización de materiales.

En este proceso se realizó la obtención de cuatro tipos de agradados pétreos procedentes del banco “La loma” ubicado Carretera Querétaro- Huimilpan Km. 12+800. Ejido Santa Teresa, Huimilpan, Código Postal 76976, Querétaro, México con coordenadas 20.5014189 N, 100.329404 W, figura 4 y 5, para luego ser trasladados y caracterizados en las instalaciones de instalaciones del laboratorio de Mecánica de suelos y la Facultad de Ingeniería UAQ, lugar donde se llevaron a cabo diversas pruebas para evaluar sus características de este.



Figura 7. Toma de muestra de material pétreo en banco “La loma”

Así mismo se realizó la búsqueda y obtención del ligante asfáltico el cual fue proporcionada por la empresa Megafaltos S.A. de C.V., cuya planta se encuentra ubicada en el municipio de Salamanca, Gto., para este caso el ligante asfáltico fue emulsión de rompimiento superestable con y sin polímero SBS.

Por su parte los materiales que habrían de ser usados para fabricar el relleno cementante ternario, es decir la escoria de alto horno, ceniza volante y cemento hidráulico fueron obtenidos con diversos probedores, para la escoria fue necesario

hacer un proceso de triuración y cribado para obtener el tamaño de particula desead, para la ceniza volante solo fue necesario el proceso de cribado, mientras que para el cemento hidráulico no fue nesario realizar nigún proceso.

3.2.1. Agregados pétreos

Los pétreos obtenidos fueron, para la fracción gruesa, grava de $\frac{3}{4}$ ", grava de $\frac{1}{2}$ ", grava de $\frac{3}{8}$ ", mientras que para la fracción fina arena de $\frac{1}{4}$ " a finos, para cada uno de estos agregados se realizó una granulometría. Figura 8.



Figura 8. Granulometría de los agregados pétreos.

Posteriormente a haber realizado la granulometría se procedió a realizar diversas pruebas con la finalidad de determinar si los agregados cumplen con las características deseables para ser usados en la fabricación de mezcla asfáltica.

Las pruebas realizadas a la fracción gruesa de los agregados fueron:

- Desgaste de los ángeles (ASTM C131)
- Desgaste Microdeval (ASTM D 6928-06)
- Partículas planas y alargadas (ASTM D4791)
- Partículas trituradas (ASTMD5821)

- Desprendimiento por fricción
- Densidad relativa (ASTM C 127-07)
- Densidad específica (ASTM C 127-07)
- Intemperismo acelerado (ASTM C88-90)

Mientras que las pruebas realizadas a la fracción fina fueron:

- Equivalente de arena (ASTM D2419)
- Azul de metileno (M-MMP-4-04-014/09)
- Angularidad (AASHTO T 304-08)
- Densidad relativa (ASTM C128-07)

3.2.2. Emulsión asfáltica

Por las características de diseño de la mezcla, se seleccionó una emulsión que permitiese el tiempo necesario para mezclar y compactar adecuadamente la mezcla, y para ello se eligió una emulsión que tuviese un rompimiento estable, tanto sin modificar como modificada con el polímero SBS. Figura 9.

La obtención de la muestra se realizó en la planta de MEGASFALTOS S.A. de C.V., ubicada en el municipio de Salamanca, Gto.



Figura 9. Emulsión asfáltica ECS-6

3.2.3. Relleno cementante ternario

El relleno cementante propuesto en investigación está compuesto por, cemento hidráulico, escoria de alto horno y ceniza volante, de acuerdo a la literatura la mejor combinación para este tipo de rellenos es: 44.11% cemento hidráulico, 28.0% escoria de alto horno y 28.0% ceniza volante (Lu et al, 2021). El cemento hidráulico usado en fue CP-30, la escoria de alto horno fue obtenida en forma granulada, por lo que fue necesario realizar un proceso de pulverización para llegar al tamaño deseado (Figura 7), mientras que la ceniza volante obtenida contaba con un tamaño adecuado y solo fue necesario un cribado a través de la malla no.200 para eliminar los sobre tamaños una vez que se obtuvieron los tres tipos de relleno fueron combinados en esta proporción y homogenizado. Figura 10.



Figura 10. Rellenos ternarios cementantes

3.3. Diseño de mezcla asfáltica

3.3.1. Elección de granulometría

En el proceso de selección de la granulometría adecuada para la mezcla asfáltica se realizaron varias propuestas de combinación de los agregados

Una vez determinada la granulometría a utilizar para el diseño se procedió a realizar un cribado de cada material para obtener muestras de cada tamaño, y recrear la granulometría en cada una de las pruebas a realizar.

3.3.2. Determinación de porcentaje de emulsión inicial.

Para determinar el porcentaje de emulsión se usó la siguiente fórmula y la combinación propuesta de los agregados.

$$P = (0.05A + 0.1B + 0.5C) \times 0.7$$

Donde:

P= porcentaje de emulsión a usar por peso de agregados secos

A = Porcentaje retenido en la malla No. 8

B= Porcentaje que pasa la malla No. 8 y retenido en la malla No. 200

C= Porcentaje de agregado que pasa la malla No. 200

3.3.3. Prueba de cubrimiento del agregado.

Se realizó la prueba para la determinación de cubrimiento del agregado, para diferentes contenidos de humedad y la misma cantidad de emulsión.

Para lo cual fue necesario determinar, en función de la masa seca de la muestra, la cantidad de agua necesaria agregar para llegar a la humedad buscada en conjunto con la cantidad de agua presente en la emulsión que a agregar determinada anteriormente (9.185%).

Posterior a esto se mezcló durante tres minutos con ayuda de una espátula para posteriormente vaciar la mezcla en un recipiente donde se dejaría curar y después mediante inspección visual se determinó la cantidad de partículas cubiertas con asfalto.

Se observa en la figura 11 la mezcla para cada una de los contenidos de humedad realizados en la prueba después.



Figura 11 Resultado de las pruebas de cubrimiento del agregado.

3.3.4. Prueba de cubrimiento mediante gravedad máxima de Bulk.

Preparación de las muestras:

Se homogenizó la fracción fina y gruesa de los agregados dentro de un recipiente, con ayuda de una báscula se añadió el agua calculada para obtener un determinado porcentaje de humedad respecto a la masa de los pétreos, se mezcló el agua y los pétreos hasta obtener una mezcla uniforme.

Posteriormente se agregó la emulsión asfáltica calculada para llegar al porcentaje de asfalto residual buscado, como se observa en la figura 12, se mezcló durante un tiempo aproximado de 1:30 min, hasta que observó que la mezcla fuese lo más homogéneo posible. Una vez mezclada se dejó reposar en el recipiente el tiempo necesario para que perdiese un porcentaje del 1% de agua a través de evaporación, para ello fue necesario estar constantemente revisando el peso de la mezcla. se introdujo la mezcla dentro de cada molde procurando vaciarla desde una altura al bode del molde para evitar segregar el material, colocada la mezcla se introdujo una varilla de punta de bala 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro del molde, se llevó el molde con la mezcla al martillo Marshall, programado previamente para dar 50 golpes por cara como se muestra en la figura 13.

Una vez que se terminó de compactar se colocó en una superficie estable y ventilada

por un periodo de 24 horas y una vez cumplido este tiempo se desmoldó con ayuda de un dispositivo hidráulico, cuidando no dañar el espécimen.



Figura 12. Proceso de preparación de la mezcla asfáltica.



Figura 13. Proceso de compactación mezcla asfáltica usando martillo Marshall.

Posterior que se compactaran y se curaran los especímenes se procedió a la determinación de los pesos; al aire (Paire) figura 14, sumergido (Psum) figura 15 y en la condición saturado superficialmente seco (Psss), esto para determinar la gravedad específica de bulk (Gmb) de cada una de las pastillas.



Figura 14. Determinación de peso seco al aire de la pastilla luego de curado



Figura 15. Determinación de peso sumergido de especímenes Marshall.

3.3.5. Determinación del asfalto residual óptimo.

Una vez que se determinó el contenido de humedad óptimo de compactación se procedió a realizar probetas variando el contenido de asfalto.

Se elaboraron cuatro probetas por cada contenido de emulsión para posteriormente ser curadas 24 horas dentro del molde a temperatura ambiente y posteriormente 42 horas en horno de secado a 38° C, una vez realizado este proceso se tomaron dos probetas por cada contenido para ser ensayadas en seco a temperatura de 22° C en la prensa Marshall (figura 16), mientras que las otras dos fueron sometidas a un proceso de saturación por vacío a 100 mm Hg durante una hora (figura 17) para posteriormente ser ensayadas en condición saturada y así obtener la pérdida de estabilidad por humedad.

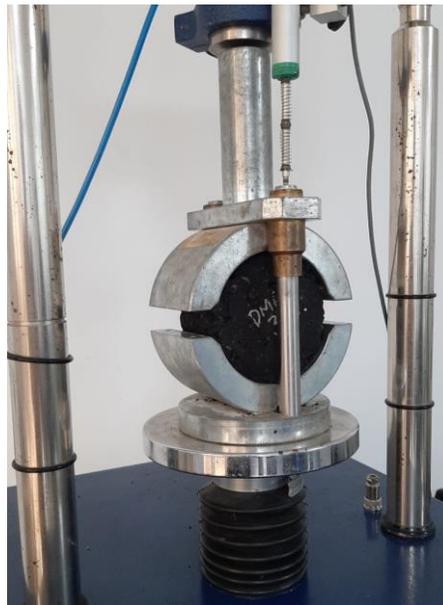


Figura 16. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall



Figura 17. Proceso de saturación de las muestras con bomba de vacíos.



Figura 18. Especímenes luego de ser sometidos a las pruebas de estabilidad y flujo.

3.4. Elaboración y curado de especímenes para desempeño

A diferencia de los especímenes elaborados para el diseño base, la mezcla asfáltica de la cual están elaborados los especímenes para las pruebas de desempeño requieren un proceso diferente puesto que se adiciona el elemento de rellenos cementante dosificado de manera precisa por lo cual hay que tener especial cuidado de no perder

material durante el mezclado, debido a esto se propuso un método para proceso que consta de cinco pasos: preparación de los agregados, incorporación de la fase líquida, incorporación de los rellenos, compactación y finalmente curado de los especímenes, Figura 19.

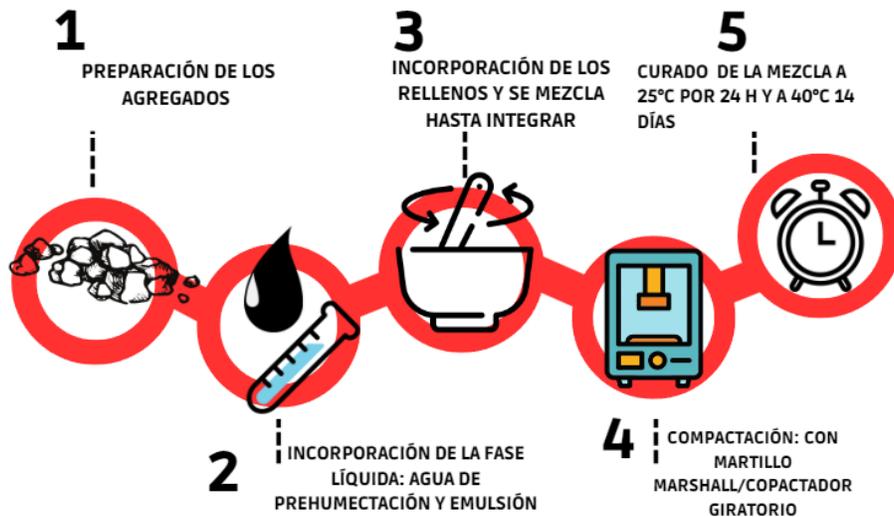


Figura 19. Proceso de elaboración de los especímenes para pruebas de desempeño.

Para apreciar el efecto que tiene el tipo de emulsión usada y el relleno usado se elaboraron cuatro distintos tipos de mezcla, la primeras dos con el uso de la emulsión simple usando rellenos minerales (S-RM) y usando rellenos cementantes ternarios (S-RC), y los otros dos tipos de mezcla usando la emulsión modificada, usando rellenos minerales (M-RM) y usando rellenos cementantes ternarios (M-RC). Tabla 7

Tabla 7. Composición de cada tipo de mezcla a evaluar.

	Emulsión	Relleno
S-RM	ECS-60	Mineral
S-RC	ECS-60	Cementante
M-RM	ECS-62P	Mineral
M-RC	ECS-62P	Cementante

A diferencia de estos especímenes a los elaborados en el diseño, se realizó dos procesos distintos de compactación, con martillo Marshall para los especímenes de TSR y con compactador giratorio para los de rueda cargada de Hamburgo, otra diferencia es el proceso de curado, debido a que se buscó la condición más óptima para la evaluación del desempeño mecánico y esta es cuando existe la menor cantidad de agua presente en la mezcla por lo cual el periodo de curado fue de 24h a 25°C y 14 días a 40°C, puesto que se ha observado que dicho proceso asegura tener la mínima cantidad de humedad en la mezcla sin incurrir en elevadas temperaturas que provoquen un envejecimiento del material asfáltico que pusiera afectar el desempeño de la mezcla.

3.4.1. Preparación de los agregados

Con el fin de replicar con mayor precisión la granulometría de diseño, se realizó un cribado de cada uno de los agregados y así tener distintas porciones de tamaños homogéneos (Figura 20) y mediante un cálculo inverso determinar la masa exacta de cada agregado y tamaño para la elaboración de cada uno de los especímenes y además controlar así la sustitución del relleno mineral presente en los agregados y posteriormente compensado con el relleno cementante en una posterior etapa.



Figura 20. Agregados cribados y clasificados por su tamaño.

3.4.2. Incorporación de la fase líquida

Teniendo el material pétreo homogenizado se inició a agregar el agua de pre humectación, y luego mezclándola por un periodo de un minuto hasta observar que las partículas han quedado cubiertas, posteriormente se añadió la emulsión y con movimientos envolventes se mezcla por un tiempo de 3 minutos. Figura 21



Figura 21. Proceso de incorporación de fase líquida a la mezcla.

3.4.3. Incorporación de los rellenos (filler cementante)

Una vez que se ha homogenizado la mezcla de agregados, agua y emulsión se procedió a incorporar de manera manual el filler cementante como se muestra en la figura 22 y se mezcla manualmente hasta lograr la completa homogenización en la mezcla y se determina el peso de la mezcla en ese momento.



Figura 22. Proceso de incorporación de rellenos cementantes a la mezcla.

3.4.4. Compactación

Hasta este punto la producción de la mezcla se realiza del mismo modo para ambas pruebas pero para el proceso de compactación dependiendo cual es la prueba que se hará se realizará de dos maneras diferentes, esto debido principalmente a las dimensiones de los especímenes, por una parte los especímenes de TSR tienen dimensiones de 4" de diámetro y altura de 6.35 cm por lo cual se realizó mediante el compactador Marshall, figura 23, mientras que para las pruebas de rueda cargada de Hamburgo se tienen dimensiones de 6" de diámetro y altura 5.00 cm, por lo cual se realiza el proceso de compactación con el compactador giratorio.

Integrados todos los materiales da inicio el proceso de rompimiento de la emulsión, en el cual se libera el agua contenida en esta, y para ello se dejó reposar la mezcla en un

sitio aireado, como se recomienda en el MS-14 para acelerar este proceso y llegar así a la humedad óptima de compactación, cuando se obtuvo dicha pérdida de humedad (lo cual se observó mediante la pérdida de peso), se vació la mezcla dentro de su correspondiente molde, ya sea en el Marshall o en el del compactador giratorio, y se introduce una varilla dando 15 inserciones en el perímetro y 10 en el centro para luego proceder a la compactación, ya sea por el método Marshall como se ve en la figura 23, o bien con el compactador giratorio como se ve en la figura 24.



Figura 23. Compactación de especímenes para TSR mediante compactador Marshall.



Figura 24. Espécimen para prueba de rueda cargada de Hamburgo compactado mediante compactador giratorio.

3.4.5. Curado

Una vez se realizó la compactación se procede con el proceso de curado y lo que se busca en tal proceso es retirar toda el agua presente en el espécimen para que esta no tenga influencia en el comportamiento de la mezcla sin alterar las propiedades del material asfáltico, por lo cual se realizó un curado que permita esto, como lo indica Thanaya (2003), fue necesario dejar la mezcla 24 h a temperatura ambiente y luego 14 días a temperatura de 40 °C en un horno de secado como se observa en la figura 25.



Figura 25. Curado de mezcla asfáltica en horno de secado.

3.5. Pruebas de desempeño mecánico

Para el proceso de evaluación de la mezcla asfáltica, se realizaron dos pruebas que son las de evaluación de la susceptibilidad a la humedad y la de evaluación a la deformación permanente mediante rueda cargada de Hamburgo, a continuación, se describe el proceso seguido para estas dos pruebas.

3.5.1. Evaluación de la resistencia al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)

Por cada una de las combinaciones se elaboraron seis especímenes, de los cuales tres

son sometidos a un proceso de acondicionamiento, en el cual mediante la aplicación de presión de vacío se satura entre el 70 y el 80% de los vacíos de aire contenidos en la mezcla, Figura 26.



Figura 26. Proceso de saturación de vacíos con agua y presión de vacío.

Una vez que se ha saturado la muestra se procede a ser sometida a un proceso de congelamiento a una temperatura de -18°C por un periodo de al menos 15 h, Figura 27. Posteriormente se lleva el espécimen a baño maría a una temperatura de 60°C por un periodo de 24 h., después de este periodo tanto especímenes acondicionados como no acondicionados se someten a baño maría a temperatura de 25°C por un periodo de 30 min previo a el ensayo de tensión indirecta. Figura 28.

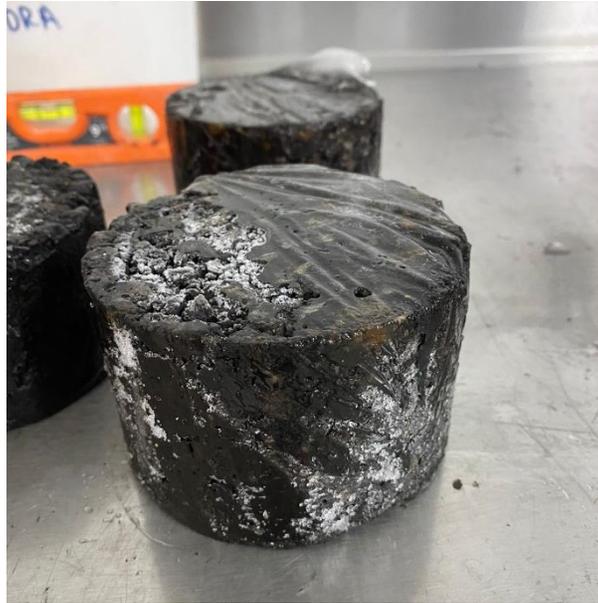


Figura 27. Proceso de congelamiento de especímenes

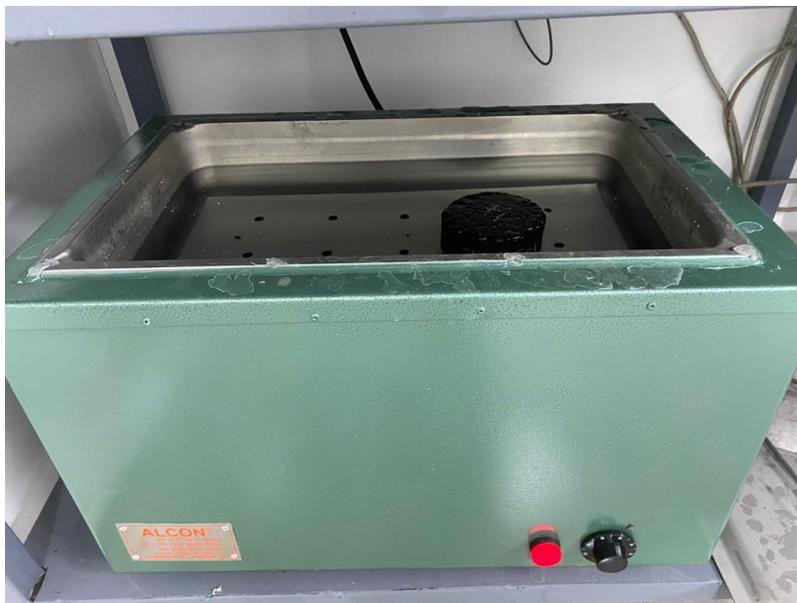


Figura 28. Proceso de saturación y calentamiento con baño maría

Finalmente, tanto los tres especímenes acondicionados como los que no fueron acondicionados se ensayan a tensión indirecta, y del promedio de la resistencia de los especímenes sin acondicionar y los acondicionados se obtiene el valor de la resistencia al daño por humedad.



Figura 29. Ensayo de tensión indirecta (TSR)

3.5.2. Evaluación de la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad mediante la Rueda Cargada de Hamburgo

Por cada tipo de mezcla fueron preparados dos especímenes de 6" para la prueba de rueda cargada de Hamburgo, cada par fue cortado con ayuda de una cortadora de disco en a una distancia aproximada del 16 mm del centro al borde del espécimen para ser ajustados al molde de propileno, Figura 30, que se encargó de mantenerla en su lugar durante el ensayo y posteriormente sometidos a un proceso de acondicionamiento de entre 30 a 60 min a una temperatura de 50°C antes de iniciar con la prueba.



Figura 30. Colocación de especímenes de rueda cargada

Una vez concluido el periodo de acondicionamiento se colocó la rueda sobre la muestra y se comenzó el ciclo de 20,000 pasadas (figura 31), en el caso de que una muestra llegase a la profundidad de la rodera de 10 mm la prueba fue detenida.

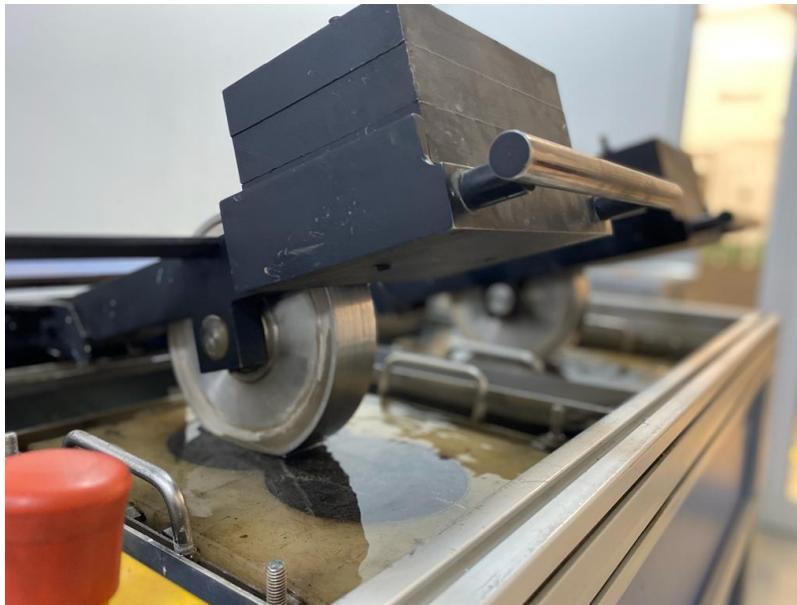


Figura 31. Ensayo de rueda cargada de Hamburgo.

4. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos y el análisis de estos.

4.1. Agregados pétreos

Se presentan los resultados de las pruebas realizadas a los agregados pétreos

4.1.1. Granulometría de agregados

Tabla 8. Granulometría agregados 3/4"

Malla	TAMAÑO (MM)	Pasa (%)
1"	25	100.00
3/4"	19	92.61
1/2"	12.5	27.04
3/8"	9.5	11.88
1/4"	6.35	3.00
No.4	4.75	1.79
No.8	2.36	0.45
No. 16	1.18	0.42
No. 50	0.3	0.41
No. 100	0.15	0.40
No. 200	0.075	0.39

Tabla 9. Granulometría agregados 1/2"

Malla	TAMAÑO (MM)	Pasa (%)
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
1/2"	12.5	94.79
3/8"	9.5	83.03
1/4"	6.35	46.00
No. 4	4.75	30.57
No. 8	2.36	5.79
No. 16	1.18	3.17
No. 50	0.3	2.64
No. 100	0.15	2.50
No. 200	0.075	2.36

Tabla 10. Granulometría agregad 3/8"

Malla	Tamaño (Mm)	Pasa (%)
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
1/2"	12.5	100.00
3/8"	9.5	91.11
1/4"	6.35	41.01
No. 4	4.75	20.85
No. 8	2.36	1.33
No. 16	1.18	0.50
No. 50	0.3	0.49
No. 100	0.15	0.48
No. 200	0.075	0.47

Tabla 11. Granulometría agregado arena

MALLA	TAMAÑO (MM)	PASA (%)
1"	25	100.00
3/4"	19	100.00
1/2"	12.5	100.00
3/8"	9.5	100.00
1/4"	6.35	100.00
No. 4	4.75	100.00
No. 8	2.36	89.85
No. 16	1.18	60.77
No. 50	0.3	30.81
No. 100	0.15	23.84
No. 200	0.075	19.37

4.1.2. Partículas alargadas y lajeadas

Se llevó a cabo la prueba de partículas alargadas y lajeadas conforme a lo establecido obteniendo que en una relación de 5:1 se tiene el 1.01% de partículas alargadas y lajeadas, dicho porcentaje indicó que no se presentan problemas por este tipo de partículas presentes en la mezcla.

Tabla 12. Resultados de la prueba de partículas alargadas y lajeadas.

P. Planas y Alargadas	33.9
P ni planas ni alargadas	3318.3
Muestra	3352.2
Partículas alargadas y lajeadas	1.01%

4.1.3. Densidad y absorción

La gravedad específica del material en todas sus formas es mayor a 2.4 g/cm³, la mínima requerida por el protocolo AMAAC, por lo cual es un material adecuado Tabla 13

Tabla 13. Resultados de prueba de gravedad específica de los agregados gruesos y absorción.

Gravedad Específica SH	2.803
Gravedad en condición SSS	2.836
Gravedad Específica Aparente	2.899
Absorción	1.18%

4.1.4. Desgaste de los ángeles

Después de la realización de los ensayos se obtuvo un valor de 8.2% de desgaste, mientras que el valor máximo permitido es de 30%, esto es indicativo que el material presenta una mayor resistencia a la degradación.

Tabla 14. Resultado prueba de desgaste de los ángeles.

Pasa	Retiene	Masa (g)
3/4"	1/2"	2502.2

1/2"	3/8"	2501.1
Masa inicial para prueba		5003.3
Masa final		4592.8
Diferencia		410.5
%Desgaste		8.20%

4.1.5. Desgaste microdeval

El valor obtenido para la prueba de desgaste microdeval, fue de 10.05 % y siendo el máximo permitido de 18.00%, se tiene que el material es resíentete a ser degradado por abrasión, cualidad deseable para soportar las condiciones a las cuales serán sometidos los especímenes que se elaboraron

Tabla 15. Resultados prueba de desgaste microdeval.

<i>Pasa</i>	<i>Retiene</i>	<i>Masa (g)</i>
3/4"	5/8"	376.0
5/8"	1/2"	375.3
1/2"	3/8"	751.1
Masa inicial para prueba		5003.3
Masa final		1351.4
Diferencia		151
%Desgaste		10.05%

4.1.6. Equivalente de arena

Realizada la prueba de equivalente de arena se encontró que en el agregado fino un 77.8% de este es arena, lo cual cumple con el requerimiento normativo de 50% mínimo.

Tabla 16. Resultados prueba de equivalente de arena.

	Ensaye 1	Ensaye 2
Lectura Arcilla	5	4.9
Lectura Arena	3.8	3.9
Equivalente de Arena	76.0%	79.6%
Equivalente de Arena promedio	77.8%	

4.1.7. Angularidad

En la prueba de angularidad se obtuvo un resultado de 41.18 % promedio, por lo cual se cumple satisfactoriamente el requisito establecido por la normativa de 40%.

Tabla 17. Resultados prueba de angularidad en finos.

No. Prueba	Masa cilindro + suelo (g)	Masa suelo (g)	Masa promedio (g)	U %	U promedio %
1	407.1	145.6			
2	407.3	145.8	145.6	45.42%	
3	406.9	145.4			41.48%
4	428.9	167.4			
5	425.8	164.3	166.7	37.53%	
6	429.8	168.3			

4.2. Diseño Marshall Illinois

4.2.2. Elección de granulometría

Una vez realizadas las granulometrías de cada material se hizo una revisión de cuál sería la mejor combinación de los agregados muestreados de manera que se encontrara dentro de los límites normativos y que se tuviese una estructura cerrada para reducir la cantidad de vacíos presentes en la mezcla, tal combinación se muestra en la tabla 15, mientras que la curva granulométrica se observa en la figura 29.

Tabla 18. Diseño granulométrico propuesto para la mezcla.

Malla	tamaño mm	Agregado 3/4		Agregado 1/2		Agregado 3/8		Arena		Mezcla Propuesta
		20 %		35%		15%		30%		100%
		% Pasa	% Aporte	% Pasa	% Aporte	% Pasa	% Aporte	% Pasa	% Aporte	%Pasa
1"	25	100.00	-	100.00	-	100.00	-	100.0	-	100.00
3/4"	19	92.61	18.52	100.00	-	100.00	-	100.0	-	98.52
1/2"	12.5	27.04	5.40	94.79	33.17	100.00	-	100.0	-	83.58
3/8"	9.5	11.88	2.37	83.03	29.06	91.11	13.66	100.0	-	75.10
1/4"	6.35	3.00	0.60	46.00	16.09	41.01	6.15	100.0	-	52.85
No.4	4.75	1.79	0.36	30.57	10.70	20.85	3.13	100.0	-	44.18
No.8	2.36	0.45	0.09	5.79	2.02	1.33	0.20	89.9	26.96	29.27
No. 16	1.18	0.42	0.08	3.17	1.10	0.50	0.07	60.8	18.23	19.50
No. 50	0.3	0.41	0.08	2.64	0.92	0.49	0.07	30.8	9.24	10.32
No. 100	0.15	0.41	0.08	2.50	0.87	0.48	0.07	23.8	7.15	8.18
No. 200	0.075	0.40	0.08	2.36	0.82	0.47	0.07	19.4	5.81	6.80

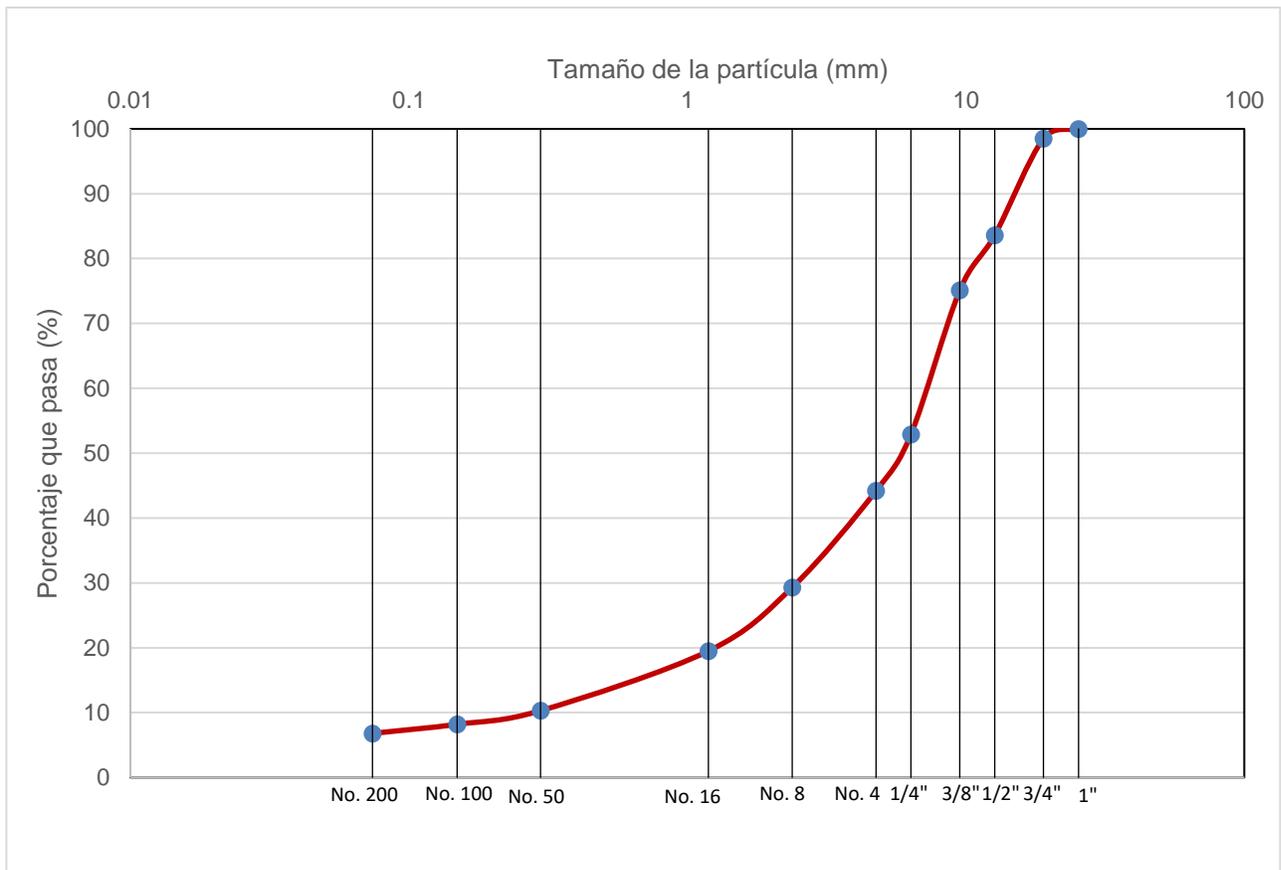


Figura 32. Curva granulométrica de diseño, elaboración propia

4.2.3. Determinación de porcentaje de emulsión inicial.

En función de la granulometría elegida, se obtuvo un porcentaje inicial de 9.815 % para iniciar las pruebas de cubrimiento y posteriormente determinar la humedad óptima.

$$P = (0.05A + 0.1B + 0.5C) \times 0.7$$

$$P = ((0.05(29.28)) + (0.1(19.0)) + (0.5(6.8))) \times 0.7$$

$$P = 9.185$$

Donde:

P= porcentaje de emulsión a usar por peso de agregados secos

A = Porcentaje retenido en la malla No. 8

B= Porcentaje que pasa la malla No. 8 y retenido en la malla No. 200

C= Porcentaje de agregado que pasa la malla No. 200

4.2.4. Prueba de cubrimiento del agregado.

Puede observarse que al aumentar el contenido de humedad aumenta también el cubrimiento, partiendo de un 75% con el 5% de humedad, hasta llegar al 100% con una humedad del 7%, tabla 15.

Tabla 19. Resultados de prueba de cubrimiento.

Contenido de humedad, W (%)	Estimado de partículas cubiertas
5	75%
6	95%
7	100%
8	100%

4.2.5. Determinación de humedad de compactación

Se realizaron 3 especímenes por cada contenido de humedad, siendo el de mayor densidad alcanzada el de 8.5%, por lo cual se toma este valor para la humedad óptima de mezclado y el 7.5% como la humedad óptima de compactación. Figura 33

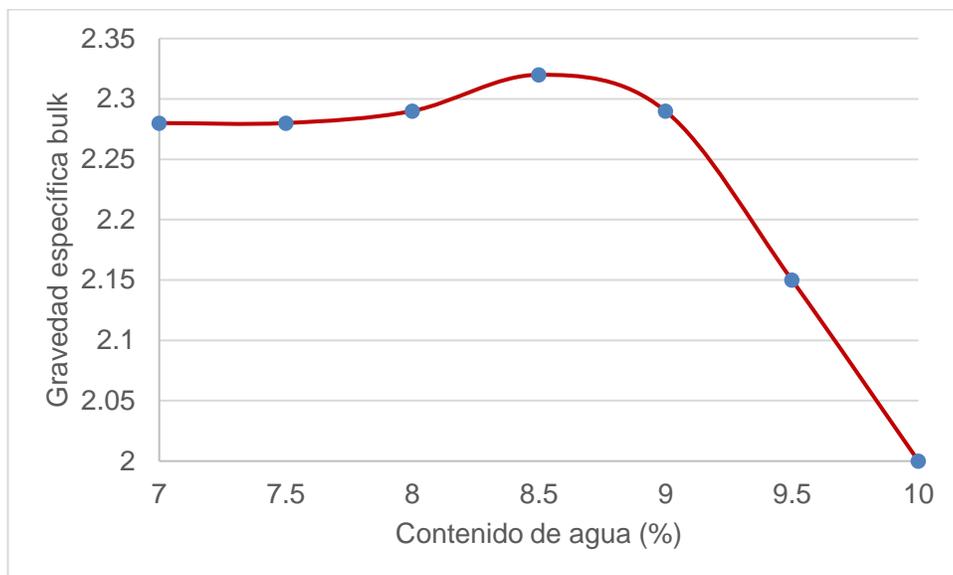


Figura 33. Grafica de Gmb vs. Humedad

4.2.6. Determinación de asfalto residual óptimo.

Una vez determinada la humedad óptima, se procedió a realizar varios especímenes variando el contenido de asfalto residual y se analizaron, la estabilidad seca y saturada, el porcentaje de vacíos, gravedad máxima Bulk, pérdida de estabilidad, así como el flujo, para observar el comportamiento de la mezcla y promediar cual es el contenido de asfalto residual óptimo que satisfaga todos los requerimientos.

Tabla 20. Asfalto residual y estabilidad seca y humedad

Contenido de asfalto residual (%)	Estabilidad Seca Corregida (N)	Estabilidad Húmeda Corregida (N)
3.6	15397.96	12600.47
4.2	18232.38	17842.39
4.8	16627.00	15022.93
5.4	11541.90	10203.13
ÓPTIMO:	4.25	

Tabla 21. Contenido de asfalto residual y porcentaje de vacíos.

Contenido de asfalto residual (%)	Porcentaje en volumen de vacíos (%)
3.6	11.52
4.2	10.57
4.8	13.58
5.4	13.21
Óptimo:	4.25

Tabla 22. Contenido de asfalto residual y gravedad máxima bulk.

Contenido de asfalto residual (%)	Gravedad máxima bulk
3.6	2.35
4.2	2.37
4.8	2.29
5.4	2.30
Óptimo:	4.0

Tabla 23. Contenido de asfalto residual y pérdida de estabilidad.

Contenido de asfalto residual (%)	Pérdida de estabilidad (%)
3.6	18.17
4.2	2.14
4.8	9.65
5.4	11.60
ÓPTIMO:	4.25

Tabla 24. Obtención del valor óptimo de asfalto residual

Propiedad analizada	Contenido de asfalto residual %
Estabilidad seca y húmeda	4.25
Porcentaje en volumen de vacíos	4.25
Gravedad máxima bulk	4.0
Perdida de estabilidad	4.25
Flujo seco y húmedo	3.6
Volumen de vacíos	4.0
ÓPTIMO PROMEDIO:	4.08

4.3. Pruebas de desempeño mecánico:

La evaluación del desempeño mecánico se llevó a cabo mediante dos principales pruebas, la primera enfocada evaluar la pérdida de resistencia a la tensión entre dos estados, uno que no ha sufrido un proceso de saturación, congelación y calor y otro que ha pasado por dicho proceso, mientras que en la segunda se evalúa la resistencia a la formación de surco causada por el paso de una carga determinada en condiciones de humedad y temperatura.

4.3.2. Resultados de pruebas de resistencia al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)

Para las mezclas que utilizaron rellenos cementantes ternarios se observa un valor más alto de TSR, tabla 19, para las mezclas S-RC Y M-RC los valores superan el 80.0 %, mientras que las mezclas S-RM Y M-RC los resultados no superan el 75%. Este comportamiento es un indicativo que hace referencia a que las muestras con rellenos cementantes ternarios independientemente del tipo de emulsión asfáltica utilizada mantiene en mayor medida la resistencia a la tensión de la mezcla asfáltica ante condiciones de saturación.

Tabla 25. Resultados de las pruebas de TSR

MEZCLA	VALOR PROMEDIO TSR
S-RM	73.2 %
S-RC	84.4 %
M-RM	73.4 %
M-RC	82.2 %

4.3.3. Resultados de pruebas de susceptibilidad a la deformación permanente mediante Rueda Cargada de Hamburgo.

Se observó que el comportamiento de los especímenes con relleno mineral fue inferior al de los especímenes con relleno cementante ternario, la mezcla S-RM fue la que menos pasadas resistió, llegando a obtener una deformación de 10 mm superando apenas las 6000 pasadas, de la misma manera la mezcla M-RM, mientras que la mezcla M-RC alcanzo dicha deformación a las 14000 pasadas, mientras que la mezcla S-RC, resistió las 20000 pasadas con una profundidad de rodera de 5.3 mm (figura 35).



Figura 34. Formación de rodera en espécimen ensayado.

En el ensayo de rueda cargada de Hamburgo puede observarse dos tipos principales de comportamientos, cuando se usa un filler mineral y cuando se usa el filler ternario cementante, en el primer caso las dos primeras curvas, S-RM y M-RM, que son mezclas con relleno mineral se observa una pendiente más pronunciada, mientras que en las curvas S-RC y M-RC se tiene una caída de la pendiente menos abrupta.

Se observa que esta caída en la pendiente indica el punto de desgranamiento en los especímenes y de acuerdo a esto se infiere que es más la influencia la presencia de rellenos cementantes en comparación a el uso de una emulsión u otra, o bien viéndolo de otra forma y recordando que la pendiente de desgranamiento indica la acumulación de deformación debido a la humedad, las mezclas con rellenos minerales son más susceptibles a la humedad en comparación con las que tienen rellenos cementantes.

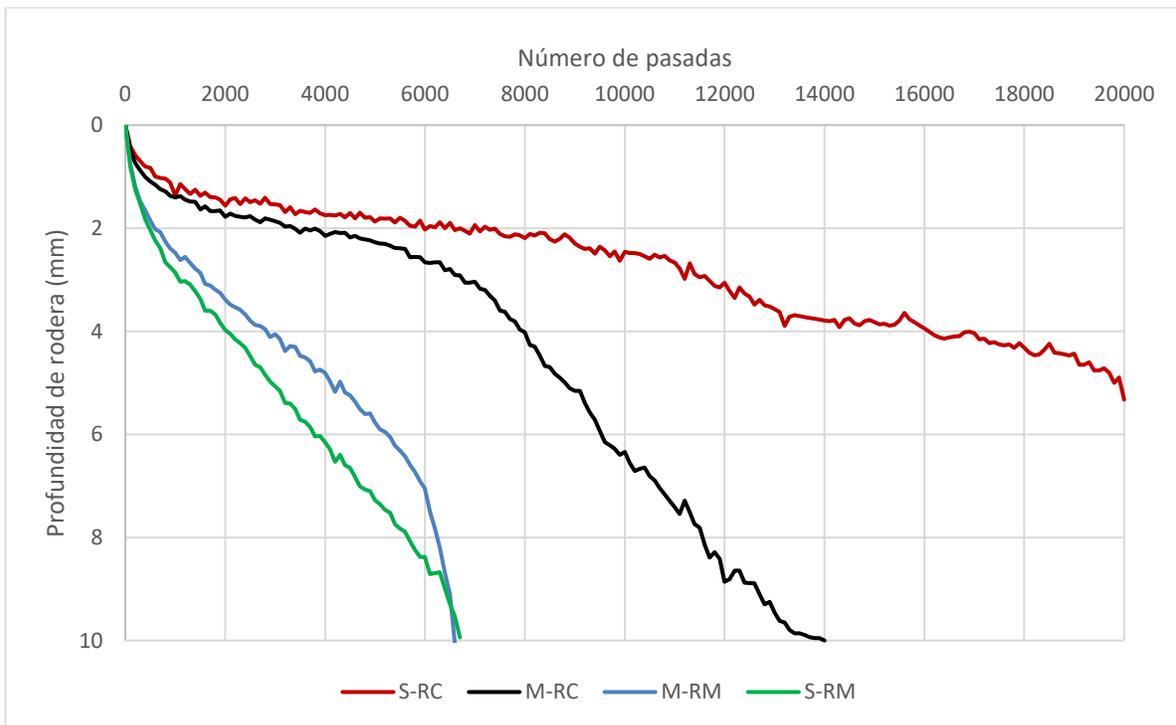


Figura 35. Gráfica de no. de pasadas vs profundidad de rodera.

5. CONCLUSIONES

En comparación a la mezcla asfáltica, simple la mezcla asfáltica con emulsión modificada y filler cementante tiene un mejor desempeño mecánico, en las pruebas de susceptibilidad a la humedad TSR obtuvo un incremento de 10%, y en la prueba de la susceptibilidad a la deformación permanente soporto el doble de pasadas antes de alcanzar la deformación de 10 mm. Por lo cual la hipótesis planteada se cumple. Cabe destacar que a pesar que la hipótesis planteada fue cumplida se observó un mejor desempeño en las pruebas realizadas a la mezcla con emulsión simple y filler cementante, lo cual en la prueba de rueda cargada de Hamburgo fue más evidente, mientras que la mezcla con emulsión simple soportó 14060 pasadas antes de llegar a la deformación de 10 mm, la mezcla con emulsión simple resistió 20,000 y obtuvo una deformación de 5 mm.

Es posible observar que el factor más importante para la mejora en el desempeño mecánico es el uso del filler cementante y no tanto el uso de la emulsión modificada, a diferencia de lo que indican otros autores como Xiao et al. (2019).

En las mezclas dónde no se usó filler cementante de acuerdo a su comportamiento no se logran los requerimientos mínimos necesarios para ser consideradas como mezclas de alto desempeño según el protocolo amaac, mientras que la mezcla con emulsión modificada y filler cementante cumple los requisitos para ser considerada una mezcla de alto desempeño, para un nivel de tránsito bajo ($TSR \geq 80\%$, No. de pasadas en RCH=10000 pasadas), y la mezcla con emulsión simple cumple con los requisitos para ser considerada de nivel de tránsito alto ($TSR \geq 80\%$, No. de pasadas en RCH=20000 pasadas).

De los resultados anteriores si se considera que el nivel de tránsito será el mismo al igual que las condiciones climáticas para dos pavimentos, uno construido con mezcla asfáltica fría tradicional y otro con mezcla asfáltica con filler cementante, este último tendría una mayor cantidad de años con buen nivel de servicio, en relación al costo, el precio aproximado de colocar un metro cubico de mezcla fría tradicional es de \$2,969.73 MN, el costo de una mezcla en caliente es de \$3,280.09 MN, mientras que el costo de una mezcla con rellenos cementantes sería de aproximadamente \$3,065.73, si hay un

incremento en el costo con relación a la mezcla fría tradicional, pero sigue siendo menor que el costo de una mezcla en caliente.

Hay un desarrollo en la tecnología de las mezclas asfálticas, sin embargo aún falta por hondar más en la mezclas asfálticas frías con rellenos cementantes, por ello como futuras líneas de investigación que podrían derivarse de este estudio, son el remplazo del cemento hidráulico como principal desencadenador de las reacciones puzolánicas por otros elementos alcalinos, como lo es la ceniza de arroz o la sosa caustica que han sido probados en la producción de concreto hidráulico puzolánico, así como también un análisis de la durabilidad de la mezcla en un periodo de tiempo prolongado y su factibilidad para ser reutilizado una vez cumplido su tiempo de vida útil.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AASHTO. (2019). AASHTO T 324 Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures.
2. Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327–363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>
3. Al-Busaltan, S., al Nageim, H., Atherton, W., & Sharples, G. (2012). Mechanical Properties of an Upgrading Cold-Mix Asphalt Using Waste Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(12), 1484–1491. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000540](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000540)
4. Al-Khateeb, G. G., & Al-Akhras, N. M. (2011). Properties of Portland cement-modified asphalt binder using Superpave tests. *Construction and Building Materials*, 25(2), 926–932. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.091>

5. American Society for Testing and Materials. (2005). Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. American Society for Testing and Materials. <https://doi.org/10.1520/c0088-05>
6. American Society for Testing and Materials. (2006). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures: Vol. 04.03 (ASTM D6927-06 ed.). ASTM. <https://doi.org/10.1520/D6927-06>
7. American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus: Vol. 04.03 (ASTM D6928-17 ed.). <https://doi.org/10.1520/D6928-17>
8. American Society for Testing and Materials. (2019). Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. astm. <https://doi.org/10.1520/d4791-19>
9. American Society for Testing and Materials. (2020). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine: Vol. 04.02. https://doi.org/10.1520/C0131_C0131M-20
10. Asociación Mexicana Del Asfalto, A. C. (2011). Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011. Asociación Mexicana de Asfalto, A.C. ISBN: 6078134027
11. Asphalt Institute. (2001). Asphalt Cold Mix Manual: Vol. MS-14 (3.a ed.). Asphalt Institute. ISBN: 9781934154090
12. Asphalt Institute. (2014). Asphalt Mix Design Methods: Vol. MS-2 (7.a ed.). Asphalt Institute. ISBN: 9781934154700
13. ASTM International. (2010). ASTM D4867/D4867M-04 Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures (ASTM D4867/D4867M-04).
14. Becker, Y., Méndez, M. P., & Rodríguez, Y. (2001). Polymer modified

- asphalt. , 9, 39–50. *Vision Tecnologica*, 9, 39–50. <https://www.semanticscholar.org/paper/Polymer-modified-asphalt-Becker-M%C3%A9ndez/efbd8baa5deaf2d291cfe0e4b9f42b7698bce3e7>
15. Chen, M., Geng, J., Xia, C., He, L., & Liu, Z. (2021). A review of phase structure of SBS modified asphalt: Affecting factors, analytical methods, phase models and improvements. *Construction and Building Materials*, 294, 123610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123610>
 16. Cominsky, R. J., Huber, G. A., Kennedy, T. W., Anderson, M., University of Texas at Austin, Strategic Highway Research Program (U.S.), Heritage Research Group, & Asphalt Institute. (1994). *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*. Strategic Highway Research Program. <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-407.pdf>
 17. Costa, L., Fernandes, S., Silva, H., & Oliveira, J. (2017). Study of the interaction between asphalt and recycled plastics in new polymer modified binders (PMB). *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(1), e192-e197. <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2016.04.005>
 18. Crespo, C., & Villalaz, C. C. (2007). *VIAS DE COMUNICACION : CAMINOS, FERROCARRILES, AEROPUERTOS, PUENTES Y PUERTOS*. Limusa.
 19. Cui, P., Schito, G., & Cui, Q. (2020). VOC emissions from asphalt pavement and health risks to construction workers. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118757. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118757>
 20. Dodds, W., Christodoulou, C., Goodier, C., Austin, S., & Dunne, D. (2017). Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on rapid chloride migration and accelerated corrosion. *Construction and Building Materials*, 155, 511–521. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.073>

21. Du, S. (2018). Effect of curing conditions on properties of cement asphalt emulsion mixture. *Construction and Building Materials*, 164, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.179>
22. Dulaimi, A., al Nageim, H., Ruddock, F., & Seton, L. (2016). New developments with cold asphalt concrete binder course mixtures containing binary blended cementitious filler (BBCF). *Construction and Building Materials*, 124, 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.114>
23. Dybaiski, J. N. & Akzo Chemicals Inc. McCook. (1976, enero). The Chemistry of Asphalt Emulsions (Fifty-Fifth Annual Meeting). Transportation Research Board. https://e-asphalt.com/wp-content/uploads/2019/04/TRB1976_Aspphalt_Emulsions.pdf
24. Espinoza, L., & Escalante, I. (2011). Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cemento Pórtland ordinario. *Nexo Revista Científica*, 21(01), 11–18. <https://doi.org/10.5377/nexo.v21i01.405>
25. Higuera Sandoval, C. H. (2015). Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
26. Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall.
27. Instituto Mexicano del Transporte. (2020). Red Nacional de Caminos. Gobierno de México. Recuperado 21 de octubre de 2021, de <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>
28. Jain, S., & Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124378>
29. Juárez D., Balart R., Ferrándiz S., García D. (2012). “Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos”. *Revista 3 Ciencias*. No. 8,

pp. 1-22.

30. Ling, C., Hanz, A., & Bahia, H. (2016). Measuring moisture susceptibility of Cold Mix Asphalt with a modified boiling test based on digital imaging. *Construction and Building Materials*, 105, 391–399. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.093>
31. Lothenbach, B., & Winnefeld, F. (2006). Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 36(2), 209–226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.001>
32. Lu, D., Wang, Y., Leng, Z., & Zhong, J. (2021). Influence of ternary blended cementitious fillers in a cold mix asphalt mixture. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128421>
33. Montero Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de pavimentos [Libro electrónico]*. Universidad Católica de Colombia. Recuperado 5 de junio de 2022, de <https://samustuto.files.wordpress.com/2014/09/ingenieric3ada-de-pavimentos-para-carreteras-tomo-i-ed-3ra-alfonso-montejo-fonseca.pdf>
34. Mota, A. J. J. (2018, 14 diciembre). Repositorio Institucional UAQ: Influencia del polvo rellenedor en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas SUPERPAVE. Repositorio Institucional UAQ. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/804>
35. Ng, C. P., Law, T. H., Wong, S. V., & Kulanthayan, S. (2017). Relative improvements in road mobility as compared to improvements in road accessibility and economic growth: A cross-country analysis. *Transport Policy*, 60, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.08.004>
36. Oruc, S., Celik, F., & Akpınar, M. V. (2007). Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(5), 578–583. <https://doi.org/10.1007/s11665-007->

37. Polacco, G., Muscente, A., Biondi, D., & Santini, S. (2006). Effect of composition on the properties of SEBS modified asphalts. *European Polymer Journal*, 42(5), 1113–1121. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.11.024>
38. Puello Méndez, J., & Nikolaevna Afanasjeva, N. (2009). Técnicas instrumentales para la evaluación del envejecimiento en los asfaltos. *ITECKNE*, 6(2). <https://doi.org/10.15332/iteckne.v6i2.272>
39. Rubio, M. D. C., Moreno, F., Martínez-Echevarría, M. J., Martínez, G., & Vázquez, J. M. (2013). Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 41, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.036>
40. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras [Libro electrónico]. En CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES: Vol. n-cmt-4-05-003-02 (pp. 1–16). <https://normas.imt.mx/normativa/n-cmt-4-05-003-02.pdf>
41. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2011). Subbases y bases [Libro electrónico]. En Pavimentos: Vol. N-CTR-CAR-1-04-002/11 (pp. 1–11). Recuperado 8 de junio de 2022, de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CTR-CAR-1-04-002-11.pdf>
42. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). Terraplenes [Libro electrónico]. En CTR. CONSTRUCCIÓN: Vol. N-CTR-CAR-1-01-009/16 (pp. 1–16). Recuperado 22-06-03, de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CTR-CAR-1-01-009-16.pdf>
43. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2020). Pavimentos [Libro electrónico]. En CTR. CONSTRUCCIÓN: Vol. N-CTR-CAR-1-04-006/20 (pp. 1–19). Recuperado 22-06-03, de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CTR-CAR-1-04-006-20.pdf>

44. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2021a). Materiales para subrasante. En CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES: Vol. n-cmt-1-03-21 (pp. 1–15). <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-1-03-21.pdf>
45. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2021b). Materiales para subyacente [Libro electrónico]. En CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES: Vol. n-cmt-1-02-21 (pp. 1–3). Recuperado 8 de junio de 2022, de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-1-02-21.pdf>
46. Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897–1905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013>
47. Thanaya, I. (2003). Improving the performance of cold bituminous emulsion mixtures (CBEMs): incorporating waste (Tesis de doctorado). Universidad en Leeds, Inglaterra. Thanaya, Improving the performance of cold bituminous emulsion mixtures incorporating waste materials, University of Leeds, UK, 2003.
48. Takamura, K., & James, A. (2015). Paving with asphalt emulsions. *Advances in Asphalt Materials*, 393–426. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100269-8.00013-1>
49. Thives, L. P., & Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>
50. Tian, Y., Lu, D., Ma, R., Zhang, J., Li, W., & Yan, X. (2020). Effects of cement contents on the performance of cement asphalt emulsion mixtures with rapidly developed early-age strength. *Construction and Building Materials*, 244, 118365. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118365>
51. Xiao, J., Jiang, W., Ye, W., Shan, J., & Wang, Z. (2019). Effect of cement

and emulsified asphalt contents on the performance of cement-emulsified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 220, 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.051>

52. Xu, S., Ruan, P., Lu, Z., Liang, L., Han, B., & Hong, B. (2021). Effects of the high temperature and heavy load on the rutting resistance of cold-mix emulsified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 298, 123831. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123831>

53. Zhang, B., Xi, M., Zhang, D., Zhang, H., & Zhang, B. (2009). The effect of styrene–butadiene–rubber/montmorillonite modification on the characteristics and properties of asphalt. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3112–3117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.011>

54. Zhu, C., Zhang, H., Guo, H., Wu, C., & Wei, C. (2019). Effect of gradations on the final and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixture. *Journal of Cleaner Production*, 217, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.264>